

**Автономная некоммерческая общеобразовательная организация  
"Физтех-лицей"  
(АНОО «Физтех-лицей» им. П.Л. Капицы)**

**XX научно-практическая конференция  
«Старт в инновации»**

**Вязкое трение**

Выполнил: Дедов А.В.  
Руководитель: Курносков В.М.

Московская область, г. Долгопрудный

2021 г.

## Оглавление

Цель, задачи, методы исследования.....	2
Сила трения. Возникновение силы трения .....	2
Вязкое трение. Механизм возникновения вязкости. Вязкость жидкости.....	3
Движение твердого тела в жидкости. Формула Стокса. Число Рейнгольда.....	4
Обтекание тела. Лобовое сопротивление.....	7
Смачивание.....	7
Капиллярные явления.....	9
Практическая часть .....	10
Вывод.....	11
Список литературы.....	12

# Вязкое трение

Область исследования: трение в жидкостях

Цель: изучить движение твердого тела в вязкой среде

Задачи:

- 1) выяснить, что такое вязкость жидкости, механизм возникновения вязкости;
- 2) движение твердого тела в жидкости. Зависимость силы сопротивления от скорости движения и размеров тела;
- 3) обтекание тела;
- 4) смачиваемость.

Методы исследования: изучение теории по теме, проведение эксперимента, измерения.

Предполагаемый результат: сила сопротивления зависит от скорости движения, размеров тела и свойств жидкости.

**Сила трения** – сила механического сопротивления, возникающая в плоскости соприкосновения двух прижатых друг к другу тел при их относительном перемещении (внешнее трение), либо при относительном смещении параллельных слоёв жидкости, газа или деформируемого твёрдого тела (внутреннее трение, или вязкость).

Сила сопротивления, действующая на тело, направлена противоположно относительному перемещению данного тела.

Сила трения возникает по двум причинам:

1. первая и основная причина заключается в том, что в местах соприкосновения молекулы веществ притягиваются друг к другу, и для преодоления их притяжения требуется совершить работу. Соприкасающиеся поверхности касаются друг друга лишь в очень небольших по площади местах. Их суммарная площадь составляет  $0,01 \div 0,001$  от общей (кажущейся) площади соприкосновения.

При скольжении, площадь реального соприкосновения не остается неизменной. Сила трения скольжения в процессе движения изменяется. Если тело, которое скользит, прижать сильнее к телу, по которому происходит скольжение, то, вследствие деформации тел, площадь пятен соприкосновения и сила трения увеличится пропорционально прижимающей силе.  $F_{ТР} \sim F_{ПРИЖ}$ ;

2. вторая причина возникновения силы трения – это наличие шероховатостей (неровностей) поверхностей и деформация их при движении одного тела по поверхности другого. Глубина проникновения (зацепления) шероховатостей зависит от прижимающей силы, а от этого зависит и величина деформаций. Последние, в свою очередь, определяют величину силы трения.  $F_{ТР} \sim F_{ПРИЖ}$

При относительном скольжении обе причины имеют место, потому характер взаимодействия имеет вид простого соотношения:

$$F_{ТР} \sim F_{ПРИЖ} \quad \text{или} \quad F_{ТР} = \mu F_{ПРИЖ} \quad \text{или}$$

$F_{ТР} = \mu N$  — сила трения скольжения (формула Кулона), где

$\mu$  — коэффициент трения скольжения,

$N$  — сила реакции опоры, равная прижимающей силе.

Величина коэффициента трения различна для разных комбинаций трущихся веществ даже при одинаковой их обработке (силы притяжения и упругие свойства зависят от рода вещества).

Если между трущимися поверхностями будет находиться смазка, то сила притяжения изменится заметным образом (будут притягиваться другие молекулы, и сила трения скольжения частично заменится силой вязкого трения).

**Вязкое трение** возникает в случае, если одно из тел - жидкая или газообразная среда.

Основной закон вязкого трения был установлен **И. Ньютоном** (1687). Отличие сил вязкого трения от сухого трения в том, что тело при наличии только вязкого трения и сколь угодно малой внешней силы обязательно придет в движение. Т.е. **вязкого трения покоя нет**. Под действием только вязкого трения тело, вначале двигавшееся, никогда полностью не остановится, хотя движение и будет бесконечно замедляться.

Различают **динамическую вязкость** - единица измерения в Международной системе единиц (СИ)—Па·с, и **кинематическую вязкость**, измеряемую по СИ  $\text{м}^2/\text{с}$  в Стоксах (Ст), является отношением динамической вязкости к плотности вещества.

#### **Механизм возникновения вязкости**

Молекулы жидкости совершают малые колебания в пределах, ограниченных межмолекулярными расстояниями. Время от времени колеблющаяся молекула получает от соседних молекул избыточную энергию, достаточную для того, чтобы совершить скачок на некоторое расстояние. В новом месте частица проводит некоторое время, совершая колебания, затем снова получает нужную для скачка энергию, вновь совершает скачок и т.д. Такие колебания, сменяющиеся скачками, – это **тепловые движения молекул жидкости**.

#### **Исчезновение вязкости**

Есть одна жидкость, не похожая ни на какие другие жидкости. Это жидкий гелий. Гелий при температуре выше 2 Кельвинов (точнее, 2,19 К) и гелий ниже этой температуры - это совсем разные жидкости. Выше двух К свойства гелия ничем не выделяют его среди других жидкостей. Ниже этой температуры гелий становится «чудесной жидкостью» или гелием II. Самое поразительное свойство гелия II - это открытая П. Л. Капицей в 1938 г. сверхтекучесть, т. е. полное отсутствие вязкости. Гелий II ведет себя таким образом, как будто бы он состоит из смеси двух жидкостей; движущихся совершенно независимо "одна через другую". Одна обладает обычной вязкостью, другая является сверхтекучей. Способность участвовать в двух разных движениях порождает совершенно необычные теплопроводящие свойства гелия. Теплопроводность гелия II возрастает примерно в миллиард раз. Гелий II проводит тепло лучше, чем самые лучшие обычные проводники тепла - такие, как медь и серебро.

**Вязкость жидкости** — свойство текучих тел оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой.

Вязкость жидкости обусловлена молекулярным взаимодействием, ограничивающим движение молекул. При движении жидкости в ней возникают силы внутреннего трения, оказывающие сопротивление движению. Эти силы действуют между соседними слоями жидкости, перемещающимися друг относительно друга.

Если жидкость течет по горизонтальной трубе постоянного сечения, то по закону Бернулли давление жидкости должно быть одинаковым по всей длине трубы. В действительности давление вдоль направления движения жидкости равномерно падает (рис.1).

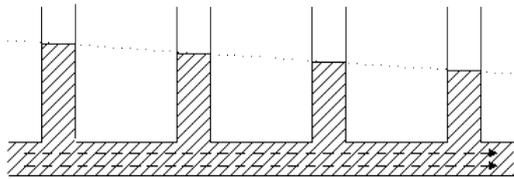


Рис. 1. Падение давления в трубе с движущейся жидкостью.

Поэтому для сохранения устойчивого течения на концах трубы надо поддерживать определенную разность давлений. Это связано с тем, что скорости движения жидкости на разных расстояниях от стенки трубы неодинаковы, между отдельными слоями движущейся жидкости возникают силы внутреннего трения и часть механической энергии переходит во внутреннюю. Соседние слои стремятся затормозить тот из двух соприкасающихся слоев, который движется быстрее, и ускорить тот, который движется медленнее. У разных жидкостей этот эффект проявляется по-разному. У густых жидкостей, подобно меду, он выражен сильнее, чем, например, у воды. Есть более вязкие и менее вязкие жидкости.

### **Движение твердого тела в жидкости. Формула Стокса. Число Рейнольдса**

При движении твердого тела в вязкой среде сила трения, испытываемая этим телом, зависит от скорости движения, от формы и размеров тела и от свойств жидкости. Для вязкого трения есть два разных закона: один – верный при малых, а другой – при больших скоростях движения. Т.е. при больших и малых скоростях движения твердых тел в жидкостях (и газах) обтекание средой движущегося в ней тела происходит по-разному.

Как и при любом виде трения движения в случае вязкого трения происходит превращение энергии механического движения во внутреннюю энергию (тепловое движение молекул), возникает сопротивление движению тела в жидкости.

При малых скоростях движения сила сопротивления прямо пропорциональна скорости:

$$f = \alpha v.$$

Такую силу сопротивления испытывают, например, частицы тумана и дыма, оседающие в воздухе, маленькие твердые шарики, падающие в вязкой жидкости (например, в глицерине).

При больших скоростях сила сопротивления прямо пропорциональна квадрату скорости:

$$f = \beta v^2.$$

Например, при падении в воздухе зависимость силы сопротивления от квадрата скорости имеет место уже при скоростях около нескольких метров в секунду. Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  зависят от формы и размеров тела, от физических свойств поверхности тела и вязкой среды.

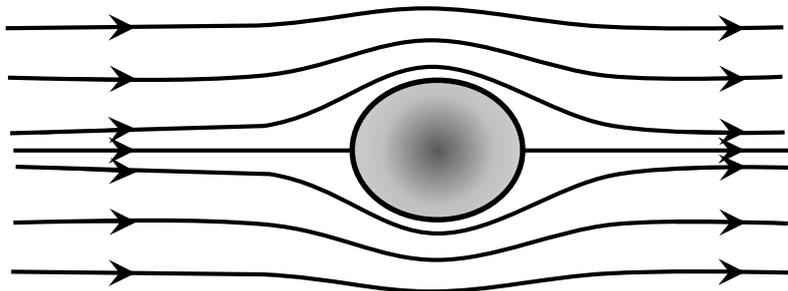
*(Так, парашютист при затяжном прыжке не набирает скорость безгранично, а с определённого момента начинает падать с установившейся скоростью, при которой сила сопротивления становится равна силе тяжести:*

$$\beta v^2 = mg.$$

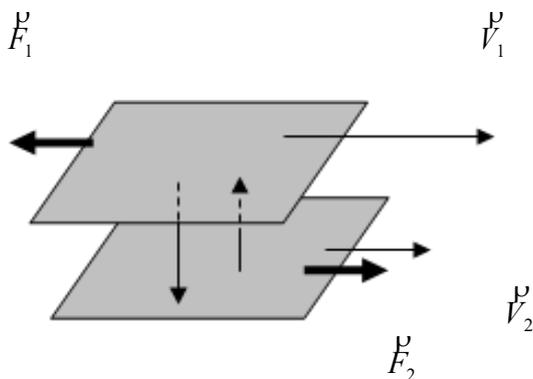
*Отсюда установившаяся скорость:*

$$v = \sqrt{\frac{mg}{\beta}}$$

С уменьшением температуры вязкость жидкости возрастает. В ряде случаев она становится настолько большой, что жидкость затвердевает без образования кристаллической решетки. В этом заключается механизм образования аморфных тел.



Допустим, что тело массой  $M$  движется в жидкости со скоростью  $V$ . Будем считать, что все молекулы имеют одинаковую скорость хаотичного движения. При столкновении тела с молекулой массы  $m$  ей передается импульс  $m\vec{V}$ . При многочисленных столкновениях тело передает жидкости часть своего импульса. Жидкость испытывает действие силы со стороны тела  $\vec{F}$ . Тело испытывает действие такой же, но противоположной силы,  $-\vec{F}$ , которая замедляет его движение. Тело увлекает за собой слой жидкости, прилегающий к поверхности тела (благодаря силам молекулярного сцепления). Между соседними слоями, движущимися с разными скоростями, также возникает сила внутреннего трения.



Явление объясняется процессом обмена молекулами между слоями. Из верхнего слоя, движущегося со скоростью  $\vec{V}_1$  в нижний слой, движущийся со скоростью  $\vec{V}_2$ , перелетает молекула вследствие хаотичного движения. Оказавшись в другом слое, она обменивается горизонтальным импульсом с молекулами этого слоя. Влетевшая молекула уменьшает свой горизонтальный импульс и увеличивает горизонтальный импульс соседних молекул. Это приводит к ускорению нижнего слоя, что и означает появление силы  $\vec{F}_2$ , действующей на него. В верхний слой тоже прилетают молекулы, но движущиеся с меньшей горизонтальной скоростью. Обмен горизонтальным импульсом приводит к ускорению молекулы и к замедлению слоя, что и означает появление замедляющей силы  $\vec{F}_1$ , действующей на верхний слой.

При небольших скоростях движения тела относительно жидкости или газа сила сопротивления будет определяться выражением:

$F_{TP} = 6\pi\eta rV$  — закон Стокса для шара, где

$\eta$  — вязкость вещества, в котором движется тело;

$r$  — средний поперечный размер (радиус) тела;

$V$  — относительная скорость тела;

$6\pi$  — коэффициент, соответствующий сферической форме тела.

Вывод о величине скорости можно сделать, определив безразмерный коэффициент, называемый *числом Рейнольдса*:

$Re = \frac{\rho rV}{\eta}$  — число Рейнольдса, где

$\rho$  — плотность вещества, в которой движется тело.

Если  $Re < 1700$ , то движение жидкости (газа) вокруг тела ламинарное (слоистое), и скорость можно считать малой.

Если  $Re > 1700$ , то движение жидкости (газа) вокруг тела турбулентное (с завихрениями), и скорость можно считать большой.

В последнем случае на образование вихрей тратится большая часть кинетической энергии тела, а значит сила трения становится большей, а зависимость перестает быть линейной.

$F_{TP} = kV^2 \rho S$  — сила вязкого трения при больших скоростях, где

$S$  — площадь поперечного сечения тела,

$k$  — постоянная величина, зависящая от поперечных размеров тела.

Часто последнюю формулу можно видеть в виде:

$$F_{TP} = \beta V^2$$

Число Рейнольдса, выбранное равным 1700, определяется конкретными условиями. Объясняется это тем, что зависимость силы вязкого трения от скорости носит сложный характер: при некотором значении скорости  $V_1$  линейная зависимость начинает нарушаться, а при некотором значении скорости  $V_2$  эта зависимость становится квадратичной. В промежутке от  $V_1$  до  $V_2$  степень принимает дробные значения. Число Рейнольдса характеризует состояние динамической системы, при котором движение слоев остается ламинарным и сильно зависит от внешних условий. К примеру: стальной шар, двигаясь в воде вдали от границ жидкости (в океане) сохраняет ламинарным движение слоев при  $Re=1700$ , а тот же шар, движущийся в вертикальной трубе немного большего, чем шар, радиуса, заполненной водой, уже при  $Re=2$  вызовет появление завихрений воды вокруг шара. (число Рейнольдса не единственное, применяемое для описания подобного движения. Применяют еще числа Фруда и Маха.)

При малых скоростях движения тела в жидкости слой жидкости, непосредственно прилегающий к телу, прилипает к нему и движется со скоростью тела. По мере удаления от поверхности тела скорость слоев жидкости уменьшается, но движутся они параллельно. Если в ламинарный поток ввести подкрашенную струйку, то она сохраняется, не размываясь, на всей длине потока, так как частицы жидкости в ламинарном потоке не переходят из одного слоя в другой. Ламинарное течение стационарно.

При турбулентном течении скорость частиц в каждом данном месте все время изменяется беспорядочным образом — течение нестационарно. Если в турбулентный поток ввести окрашенную

струику, то уже на небольшом расстоянии от места ее введения окрашенная жидкость равномерно распределяется по всему сечению потока.

### Обтекание тела. Лобовое сопротивление

Сила сопротивления, с которой жидкость действует на движущееся в ней тело, направлена под углом к направлению движения (рис. 4).

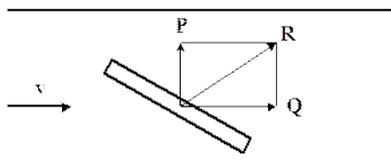


Рис. 4. Силы, действующие на пластину, движущуюся в жидкости.

Силу **R** можно разложить на две составляющие, одна из которых **Q** направлена в сторону, противоположную движению тела (или в сторону движения потока, набегающего на тело), а вторая **P** перпендикулярна к этому направлению. Составляющие **Q** и **P** называются соответственно *лобовым сопротивлением* и *подъемной силой*. На тело, симметричное относительно направления движения, может действовать только лобовое сопротивление, подъемная же сила равна нулю.

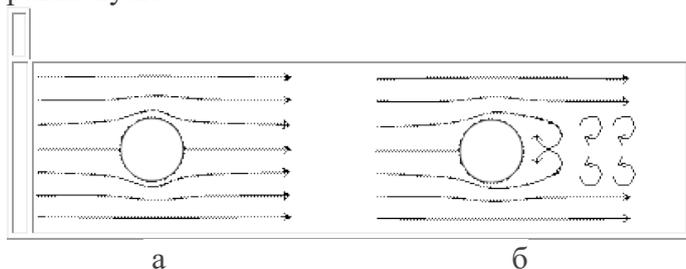


Рис. 5. Ламинарное (а) и турбулентное (б) обтекание шарика.

Уменьшение лобового сопротивления тела можно достичь уменьшением зоны вихреобразования за счет придания телу более обтекаемой формы.

### Смачивание

Если поместить каплю жидкости на плоскую поверхность, она либо растечется по ней, либо примет округлую форму. Размер и выпуклость лежащей капли определяется тем, насколько хорошо она смачивает данную поверхность. Если молекулы жидкости притягиваются друг к другу сильнее, чем к молекулам твердого тела, жидкость стремится собраться в капельку. Так ведет себя ртуть на стекле, вода на парафине или на «жирной» поверхности. Если же, наоборот, молекулы жидкости притягиваются друг к другу слабее, чем к молекулам твердого тела, жидкость «прижимается» к поверхности, расплывается по ней. Это происходит с каплей ртути на цинковой пластине или с каплей воды на чистом стекле. В первом случае говорят, что жидкость не смачивает поверхность, а во втором — смачивает. Иначе говорят, что в первом случае поверхность по отношению к данной жидкости лиофобна (от греч. лио — растворяю, фобио – бояться), а во втором — лиофильна (филио — любить) (рис.6).



Рис. 6

При смачивании краевой угол острый (Рис. 7.1). В случае несмачиваемости краевой угол тупой (7.2).

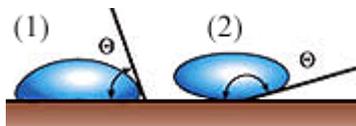


Рис. 7

При смачивании чем меньше угол тем сильнее смачивание. Если краевой угол равен нулю, смачивание называют *полным (идеальным)*. К случаю идеального смачивания можно отнести растекание спирта по чистой поверхности стекла. В этом случае жидкость растекается по поверхности твердого тела до тех пор, пока не покроет всю поверхность.

При несмачивании чем меньше угол, тем сильнее несмачивание. При значении краевого угла, равном  $180^\circ$  наблюдается полное несмачивание. В этом случае жидкость не прилипает к поверхности твердого тела и легко скатывается с нее. Подобное явление можно наблюдать, когда мы пытаемся вымыть жирную поверхность холодной водой.

Сила взаимного притяжения молекул жидкости и твердого тела зависит от природы жидкости и от свойств поверхности. При смачивании шероховатый или пористый рельеф способствует улучшению смачивания (губки, махровые полотенца). При несмачивании развитый рельеф способствует собиранию капелек воды на выступах и скатыванию (так называемый «эффект лотоса»). Лепестки лотоса всегда остаются сухими. Рельеф лепестка лотоса образован набором холмов и впадин микронного размера, покрытых отдельными «крупинками» гидрофобного (воскоподобного) вещества диаметром в несколько нанометров. Попав на такую поверхность, капля принимает форму, близкую к сферической, и легко скатывается с нее, унося с собой частицы загрязнений. Похожим образом устроены крылья бабочек и многих других насекомых, для которых защита от избыточной воды жизненно необходима: намкнув, они потеряли бы способность летать.

### Мениск

Находясь в сосуде смачивающая жидкость в месте соприкосновения с его стенкой образует выпуклость книзу (вогнутый мениск), как бы стараясь растечься по большей площади твердой поверхности, и оттого приподнимается (Рис.8.1). В стеклянной посуде так себя ведут вода, спирт, мыльный раствор и другие жидкости. А ртуть, растительное масло и некоторые другие жидкости в стеклянных или других сосудах будут иметь уже выпуклость кверху – выпуклый мениск (Рис.8.2).

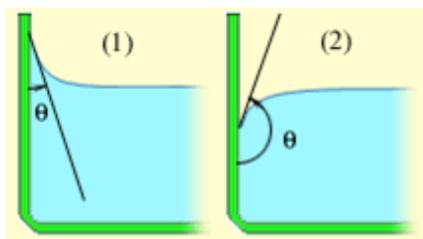


Рис. 8

Если жидкость является смачивающей, то краевой угол острый (рис. 8.1). В том случае, когда жидкость не смачивает твердое тело, краевой угол тупой (рис. 8.2).

### **Значение смачивания**

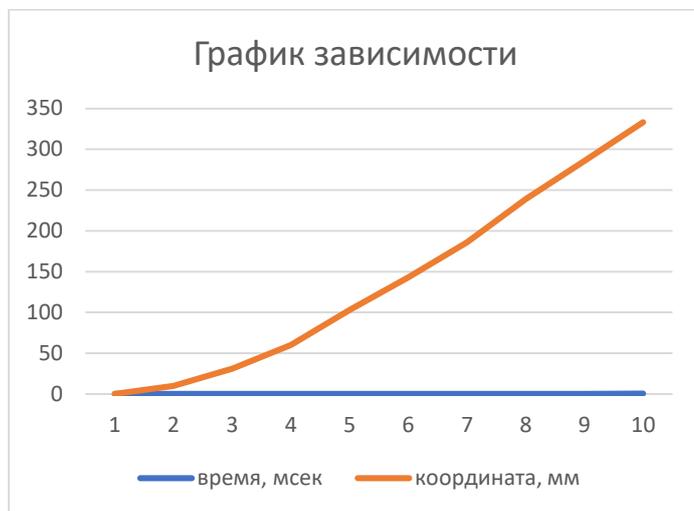
При таких производственных процессах, как склеивание, покраска, нанесение лакокрасочных покрытий, пайка, обработка фотоматериалов, обогащение руд очень важно обеспечить смачивание поверхностей. В то время, как обеспечение несмачивания очень важно при создании гидроизоляции, синтезе непромокаемых материалов. В медицине явления смачивания важны для обеспечения движения крови по капиллярам, дыхания и других биологических процессов. Ткани, не смачиваемые водой, применяют для изготовления зонтов и плащей. Хорошо защищает от смачивания жир и масло. Водоплавающие птицы смазывают свои перья при помощи клюва жиром, который выделяется специальной железой. Поэтому гусь, утка, лебедь и многие другие птицы выходят из воды сухими.

### **Капиллярные явления**

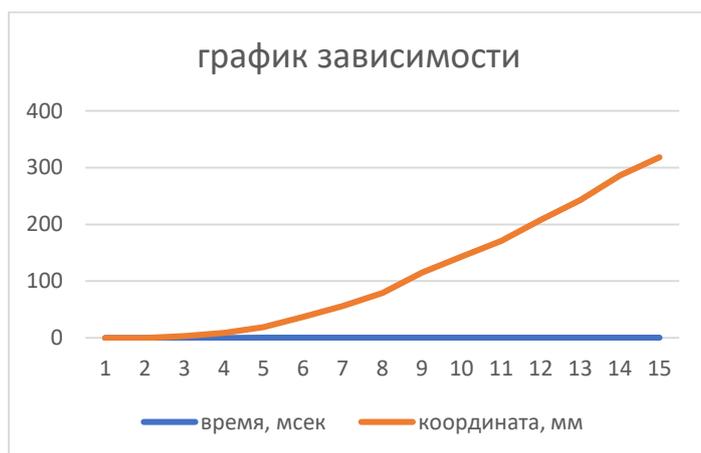
– это подъем или опускание жидкости в капиллярах по сравнению с уровнем жидкости в широких трубках. Смачивающая жидкость поднимается по капилляру. Жидкость, не смачивающая стенки сосуда, опускается в капилляре. Под вогнутым мениском смачивающей жидкости давление меньше, чем под плоской поверхностью. Поэтому жидкость в капилляре поднимается до тех пор пока давление поднятой в капилляре жидкости на уровне плоской поверхности не скомпенсирует разность давлений. Под выпуклым мениском несмачивающей жидкости давление больше, чем под плоской поверхностью, это приводит к опусканию жидкости в капилляре. Капиллярные явления можно наблюдать и в природе, и в быту. Например, почва имеет рыхлое строение и между ее отдельными частицами находятся промежутки, представляющие собой капилляры. При поливе по капиллярам вода поднимается к корневой системе растений, снабжая их влагой. Также находящаяся в почве вода, поднимаясь по капиллярам, испаряется. Чтобы уменьшить эффективность испарения, тем самым сократив потери влаги, почву разрыхляют, разрушая капилляры. В быту капиллярные явления используются при промокании влажной поверхности бумажным полотенцем или салфеткой.

## Практическая часть

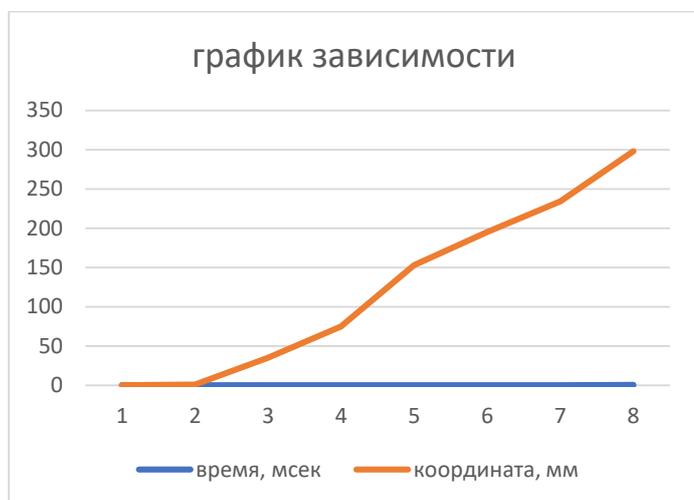
Я провел эксперимент с тремя металлическими шариками разного диаметра в воде и в глицерине. Залил в калиброванную колбу воду и поочередно опускал в нее шарики. Измерял координаты шарика в разное время в процессе его падения на дно колбы. Результаты измерений заносил в таблицу (координату и время). Такие же действия проводил в глицерине. На основании табличных данных построил графики:



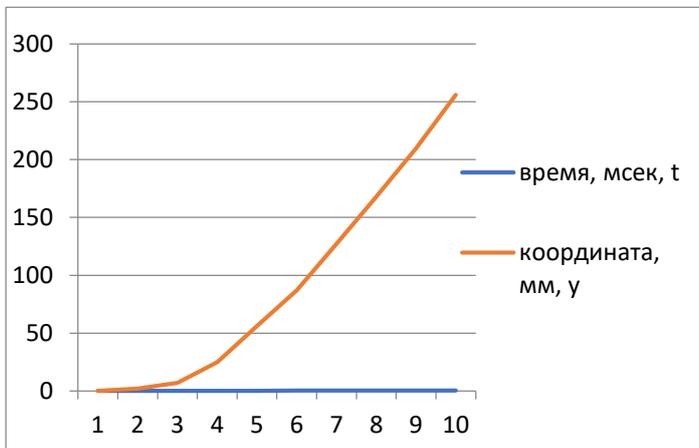
- для маленького шарика в воде



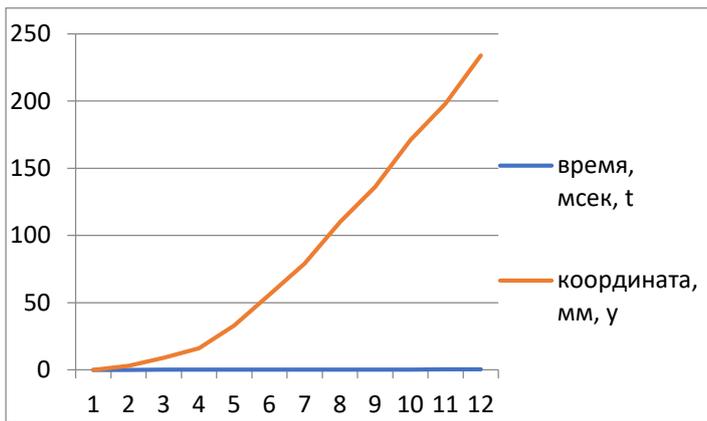
- для среднего шарика в воде



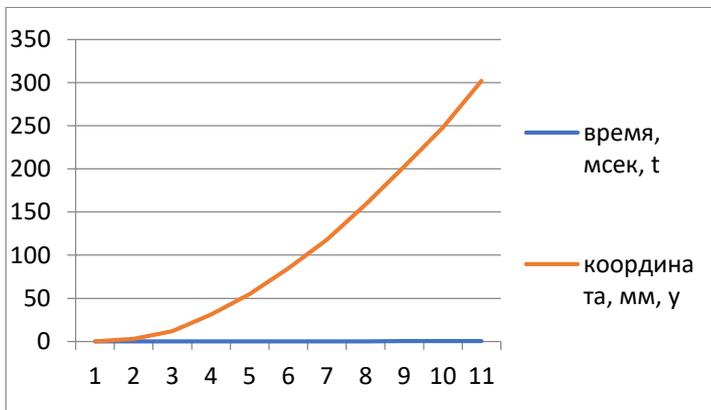
- для большого шарика в воде



- для маленького шарика в глицерине



- для среднего шарика в глицерине



- для большого шарика в глицерине

На графиках видна зависимость силы вязкого трения от скорости движения.

## Вывод

Исходя из нашего опыта можно сделать вывод, что сила сопротивления зависит от скорости тела и свойств жидкости.

## Список литературы

Перельман Я.И. Занимательные опыты и задачи по физике. - М.: Аванта, 2017 г. -224с.

Перельман Я.И. Занимательная физика и механика.- М.: Аванта, 2019.-240с.

Попова И.А. Физика удобно и понятно.- М.: Эксмо-Пресс, 2017.-192с.

[https://studopedia.ru/3\\_50144\\_vyazkoe-trenie.html](https://studopedia.ru/3_50144_vyazkoe-trenie.html)

<https://helpiks.org/6-19732.html>

<https://ege-study.ru/ru/ege/materialy/fizika/sila-treniya/>

[ens.tpu.ru/posobie\\_fis\\_kusn/физические основы механики/04-4.htm](https://ens.tpu.ru/posobie_fis_kusn/физические_основы_механики/04-4.htm)

<https://helpiks.org/6-19733.html>