

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
КАРАГАНДИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра физики

А.К. Сыздыков, А.А. Морозов, Ю.М. Смирнов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ:

по дисциплинам «Физика 1», «Физика»

**2.1. Определение коэффициента вязкости жидкости
методом Стокса**

**40. Определение ёмкости конденсатора
баллистическим гальванометром**

для технических специальностей

Караганда 2015

УДК 530 (075.8)

Сыздыков А.К., Морозов А.А., Смирнов Ю.М. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ к лабораторным работам: 2.1. «Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса», 41. «Определение ёмкости конденсатора баллистическим гальванометром». Караганда: Изд-во КарГТУ, 2015. 22 с.

Методические указания разработаны в соответствии с типовыми учебными программами для технических специальностей и содержат теоретическую часть и описание метода измерений для двух лабораторных работ по разделам дисциплин «Физика», «Физика 1»: **Механика, Электростатика.**

Работа выполняется в КарГТУ в соответствии с рабочими учебными планами дисциплины.

Рецензент — член Редакционно-издательского совета КарГТУ
Смирнов Ю.М., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Физика».

Утверждено Редакционно-издательским советом университета

© Карагандинский государственный технический университет,
2015

Лабораторная работа № 2.1

Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса

Цель работы: изучение свойств реальных жидкостей и экспериментальное определение вязкости глицерина.

Оборудование: герметично закрытый цилиндр с глицерином, установленный вертикально и способный вращаться вокруг горизонтальной оси, ИК-барьеры с электронным секундомером, ручной электронный секундомер.

Описание жидкости

Жидкость — это агрегатное состояние вещества, промежуточное между твёрдым и газообразным.

Если в газах молекулы располагаются **хаотически**, а в твёрдых телах наблюдается **дальний порядок** (молекулы образуют упорядоченную кристаллическую решётку), то в жидкостях налицо только **ближний порядок** в расположении молекул — их упорядоченное расположение повторяется только на расстояниях, сравнимых с межатомными.

В жидкости (как и в газе) молекулы подвержены тепловому воздействию. Однако проявляется оно здесь иначе:

*молекула жидкости совершает **тепловые колебания** около положения равновесия, затем происходит смещение молекулы скачком на расстояние порядка межатомного вместе со всем её ближним окружением, и процесс повторяется снова.*

На расстоянии $r \sim 10^{-9}$ м силами межмолекулярного притяжения уже можно пренебречь. Это расстояние называется **радиусом молекулярного действия**. А сфера радиуса r получила название **сферы молекулярного действия**.

Из всей совокупности свойств жидкости в данной лабораторной работе рассматриваются только те, которые связаны с её течением.

Идеальная жидкость

При течении жидкости (и газа) между частицами (молекулами), находящимися в соседних слоях, за счёт проникновения молекул из одного слоя в

другой и межмолекулярного взаимодействия возникают силы **внутреннего трения**, называемыми **силами вязкости**.

Коэффициент силы внутреннего трения (**коэффициент вязкости** или просто **вязкость**) для многих веществ (например, воздух, вода, бензин и т.п.) очень мал, поэтому достаточно часто можно рассматривать течение жидкости (или газа) как течение **идеальной жидкости**, **лишённой вязкости**. Конечно, это приближённый подход, но, выяснив законы поведения идеальной жидкости, можно ввести поправки на межмолекулярное взаимодействие для учёта её вязкости. Такой подход позволяет разобраться с довольно сложным поведением жидкости достаточно простыми способами.

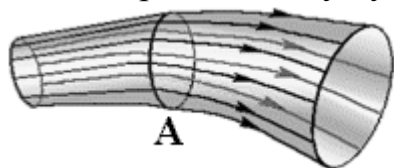
Изучением процессов, сопровождающих течение жидкостей и газов, занимается специальная область науки — гидрогазодинамика. Подробное рассмотрение всех вопросов и проблем гидрогазодинамики не входит в программу курса общей физики. Тем не менее, для лучшего понимания рассматриваемых здесь вопросов введём некоторые понятия.

Линии и трубки тока

Течение жидкости (или газа) называется **стационарным**, если скорость, давление, плотность, температура и т.д. — остаются постоянными всё время во всех точках текущей жидкости.

В противном случае движение называется **неустановившимся** (**нестационарным**).

Анализ картины стационарного течения жидкости очень сильно упростится, если разбить текущую жидкость на достаточно тонкие трубки тока. Для



этого представим, что в некотором месте текущей жидкости расположено колечко **A** из очень тонкой проволоки, стоящее поперёк потока. Проведём траектории тех частиц, которые коснулись колечка с внешней стороны. Совокупность этих траекторий образуют стенки трубки. Если продолжить такую трубку в обе стороны, то в направлении **против течения** её стенки будут образованы теми частицами, которые **коснутся** колечка **в будущем**, а в направлении **по течению** — теми, которые **уже прошли** *вблизи* проволочного кольца.

Траектории этих частиц образуют линии, называемые **линиями тока**.

Поскольку жидкость непрерывна, можно считать, что стенки выделенной нами трубки непроницаемы (сплошные).

На подобные трубки, называемые *трубками тока*, можно разбить всё пространство, занятое текущей жидкостью.

Скорости частиц направлены *по касательной к поверхности трубки*,

поэтому течение внутри **трубки тока** будет точно таким же, как течение без трения внутри трубки с жёсткими стенками, сечение которой плавно изменяется.

Ламинарное и турбулентное течение жидкости

Различают два основных вида течения: **ламинарное** и **турбулентное**.

Ламинарным (или *слоистым*) называется течение, при котором каждый выделенный вдоль потока тонкий слой скользит относительно соседних, *не перемешиваясь* с ними,

то есть **линии тока** нигде **не пересекаются**.

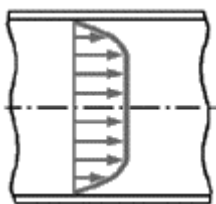
Ламинарное течение жидкости наблюдается при небольших скоростях её движения.



При **ламинарном течении** в трубе внешний слой жидкости, примыкающий к поверхности трубы из-за сил молекулярного сцепления, прилипает к ней и остается неподвижным. Скорости последующих слоёв тем больше, чем больше их расстояние до поверхности трубы. Наибольшей скоростью обладает слой, движущийся вдоль оси трубы.

Турбулентным (или *вихревым*) называется течение, при котором частицы жидкости *переходят* из слоя в слой (имеют составляющие скоростей, перпендикулярные течению). Это сопровождается интенсивным *вихреобразованием* и *перемешиванием* жидкости (газа).

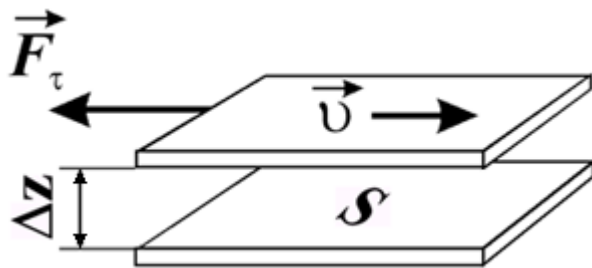
Линии тока при турбулентном течении *могут* не только *пересекаться*, но и *претерпевать разрыв*.



При **турбулентном течении** в трубе скорость частиц сначала быстро возрастает по мере удаления от поверхности трубы, а затем из-за интенсивного перемешивания изменяется очень незначительно, оставаясь практически постоянной.

Гидродинамика вязкой жидкости

Характер течения реальной жидкости из-за наличия вязкости может существенно отличаться от идеальной. Силы, действующие между частицами движущейся жидкости, могут кардинальным образом повлиять как на распределение скоростей в потоке жидкости, так и на обтекание жидкостью тел, помещенных в движущийся поток.



Еще Исаак Ньютон опытным путем установил, что при скольжении друг относительно друга двух параллельных плоскостей, пространство между которыми заполнено жидкостью, силы вязкого трения препятствуют ему. Так, при движении со скоростью u верхней плоскости с площадью S относительно нижней, возникает **сила вязкого трения**, направленная против движения и равная

силы вязкого трения, направленная против движения и равная

$$F_{\tau} = \eta \frac{\Delta u}{\Delta z} \cdot S \quad (1)$$

Эта формула представляет собой математическую запись **закона внутреннего трения Ньютона**.

Сила F_{τ} пропорциональна площади S и изменению скорости на единицу длины в поперечном направлении $\Delta u / \Delta z$ (градиенту скорости в направлении перпендикулярном движению) и зависит от свойств жидкости.

Величина, показывающая, как быстро меняется скорость u при переходе от слоя к слою в направлении, перпендикулярном к направлению движения слоёв, называется **градиентом скорости** $\Delta u / \Delta z \equiv \text{grad}(\vec{u})$

Коэффициент пропорциональности η , зависящий от природы жидкости и температуры, называется **динамической вязкостью** (или просто **вязкостью**).

Единица вязкости в СИ: $[\eta] = \text{Па}\cdot\text{с}$ — паскаль-секунда.

Однако на практике **вязкость** часто измеряют в **Пуазах (Пз)**.

Эта единица пришла из системы СГС и $1 \text{ Пз} = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$

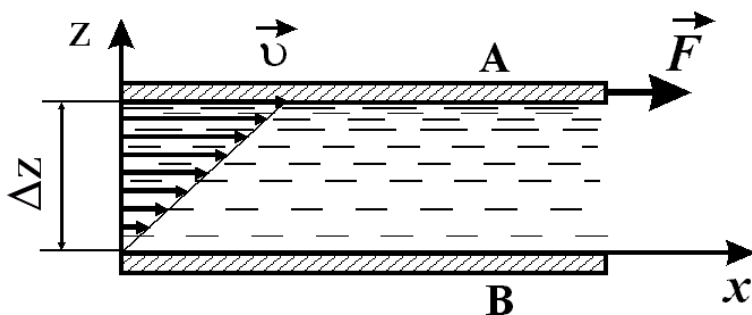
1 Па·с — это динамическая вязкость среды, в которой при ламинарном течении и градиенте скорости с модулем равным 1 м/с на 1 м, возникает сила внутреннего трения 1 Н на 1 м^2 поверхности касания слоёв ($1 \text{ Па}\cdot\text{с} = 1 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$).

Для характеристики свойств жидкости иногда используется величина, обратная **вязкости** — **текучесть** ($\tau = 1/\eta$).

Чем **выше вязкость**, тем **больше** жидкость отличается от **идеальной**, и тем **больше величина** возникающих в ней **сил внутреннего трения**.

Формула (1) справедлива, если расстояние Z между пластинами значительно меньше их линейных размеров $z \ll \sqrt{S}$. Следует отметить, что частицы жидкости, прилегающие к верхней пластине, движутся вместе с ней со скоростью v (увлекаются пластиной). А вот частицы жидкости вблизи нижней (неподвижной) пластины, напротив, находятся в покое (прилипают к пластине).

Если мысленно разбить жидкость на параллельные плоские слои, движущиеся равномерно, то нетрудно понять, что каждый вышележащий слой увлекает за собой нижний соседний слой с силой F_τ . В свою очередь, этот нижний слой тормозит движение верхнего слоя с силой, численно



равной F_τ . На каждый слой действует сверху и снизу две равные, но противоположные силы. Скорость слоев нарастает линейно с их высотой (см. рис. слева), а сила трения передается от одного слоя к другому. В результате

усилие $F = F_\tau$, приложенное к верхней пластине **А**, передается на нижнюю пластину **В**.

В общем случае формула (1), выведенная Ньютоном для силы внутреннего трения, дополняется знаком “—”

$$F_{\text{Внутр.тр.}} = -\eta \frac{\Delta v}{\Delta x} \cdot S, \quad (2)$$

который имеет физический смысл и показывает, что сила $F_{\text{Внутр.тр.}}$ направлена в сторону, *противоположную течению* жидкости.

Для лучшего понимания причин возникновения внутреннего трения в жидкости уместна следующая аналогия.

Пусть по параллельным рельсовым путям движутся две железнодорожные платформы с несколько разными скоростями. На одной из платформ лежат мешки с песком. Если теперь эти мешки начать перебрасывать с одной платформы на другую, то скорости обеих платформ начнут изменяться, причём более медленная платформа станет ускоряться, а более быстрая — замедляться. Как и в жидкости (газе), в приведённом примере будет происходить **передача импульса**, которая и приводит к изменению скоростей платформ.

Практически то же самое происходит и на молекулярном уровне в жидкости и газе.

Если различные слои газа или жидкости с одинаковой концентрацией и температурой двигаются с различными скоростями (существует **градиент** скорости), то за счёт хаотического движения молекул происходит их взаимное проникновение из одного слоя в другой. При этом происходит **перенос импульса**. В результате

медленный слой *ускоряется*, а **быстрый** — *замедляет* скорость своего движения (тормозится).

Вязкое трение (наряду с **теплопроводностью** и **диффузией**) относится к **явлениям переноса**. Все эти процессы объясняются с помощью **молекулярно-кинетических представлений** и описываются сходными математическими формулами. Этот факт говорит об общности их механизмов.

Поскольку $F = \frac{dp}{dt}$ и $dp = F \cdot dt$, то формула (2) может быть записана в виде:

$$dp = -\eta \frac{\Delta v}{\Delta x} \cdot S \cdot dt. \quad (3)$$

Из (2) видно, что

в основе существования вязкого трения лежит процесс **переноса импульса** в направлении, перпендикулярном слоям.

Для **динамической вязкости газа** молекулярно-кинетическая теория даёт выражение

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot \langle \lambda \rangle \cdot \langle v \rangle \cdot \rho, \quad (4)$$

где

$\langle \lambda \rangle$ — средняя длина свободного пробега молекул;

$\langle v \rangle$ — средняя скорость поступательного движения молекул;

ρ — плотность газа.

Опыт показывает, что

вязкость **жидкостей** с увеличением температуры **уменьшается**,
вязкость **газов** с ростом температуры **увеличивается**.

Для качественного объяснения различной зависимости вязкости жидкостей и газов от температуры воспользуемся формулой (4) и показанными выше различиями в строении жидкости и газа.

В **газе** расстояния между молекулами значительно больше радиуса действия межмолекулярных сил. Поэтому вязкость обусловлена постоянным хаотическим движением молекул, благодаря которому молекулы переходят из одного слоя в другой, перенося импульс.

С ростом температуры T возрастает скорость теплового движения молекул $\langle v \rangle$, несколько увеличивается и их средняя длина свободного пробега $\langle \lambda \rangle$. В итоге это приводит, как видно из (4), к увеличению динамической вязкости $\eta \sim \sqrt{T}$.

	Воздух				
$t, ^\circ\text{C}$	0	20	50	100	200
$\eta, \text{мкПа}\cdot\text{с}$	17,1	18,2	19,6	21,2	25,1

Однако

от плотности ρ вязкость газов η **не зависит**.

В **жидкости** с ростом температуры характер поведения молекул практически не меняется. Расстояния между молекулами во много раз меньше, чем в газах и вязкость обусловлена в основном межмолекулярным взаимодействием, которое ограничивает подвижность молекул. В жидкости моле-

кула может проникнуть в соседний слой лишь при образовании в нём полости, достаточной для размещения в ней молекулы. На образование этой полости (на “рыхление” жидкости) тратится так называемая *энергия активации вязкого течения*. Энергия же активации понижается с ростом температуры T и уменьшением плотности (понижением давления p). В этом и заключается одна из основных причин снижения вязкости жидкости при повышении температуры T и резком росте вязкости при высоких давлениях p .

При повышении в жидкости давления p до нескольких тысяч атмосфер её динамическая вязкость η увеличивается в десятки и сотни раз.

Примерами жидкостей с небольшой вязкостью могут служить бензин, вода ($\eta = 0,1$ Па·с при тех же условиях), с большой вязкостью — глицерин $C_3H_8O_3$ ($\eta = 1,48$ Па·с), масло, смола.

Глицерин					
$t, ^\circ C$	– 20	0	20	100	200
$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$	134	12,1	1,499	0,129	0,000216

Число Рейнольдса

На каждую молекулу движущейся (текущей) жидкости в направлении движения действуют **силы инерции**, а против её движения — **силы вязкости** (внутреннего трения). Отношение этих двух сил называется **числом Рейнольдса** и обозначается **Re**.

$$\text{Re} = \frac{F_{\text{Инерции}}}{F_{\text{Внутр.тр.}}} = \frac{\rho \cdot v_{\text{ср.}} \cdot d}{\eta} = \frac{v_{\text{ср.}} \cdot d}{\mu}. \quad (5)$$

Здесь

- ρ — плотность жидкости (газа);
- $v_{\text{ср.}}$ — средняя по сечению скорость течения жидкости (газа);
- d — характерный линейный размер потока (например, диаметр трубы);
- η — динамическая вязкость жидкости (газа);
- μ — кинематическая вязкость жидкости ($\mu = \eta / \rho$).

Текущую жидкость можно рассматривать как невязкую, если силы инерции превышают силы внутреннего трения, то есть если число Рейнольдса для такого течения $Re > 1$. Однако и в этом случае вязкость играет вспомогательную роль. При не очень высоких скоростях течения силы вязкости «гасят» компоненты скорости жидкости, поперечные к потоку, препятствуя, тем самым, возникновению неустойчивого течения.

Переход течения жидкости от одного режима к другому **количественно** также характеризуется числом Рейнольдса.

Ламинарному течению соответствуют малые значения числа Рейнольдса ($Re < 1000$).

При значениях числа Рейнольдса $1000 \leq Re \leq 2000$ наблюдается неустановившееся **переходное** от ламинарного к турбулентному **течение**.

Если $Re > 2000$ (в гладких трубах при $Re = 2300$), то течение полностью **турбулентное**.

Число Рейнольдса **Re** является *единственной* безразмерной комбинацией входящих в него величин.

Приведём некоторые оценки течения жидкости по круглой трубе радиуса

R . Число Рейнольдса в этом случае $Re = \frac{v_{\text{ср.}} \cdot R}{\mu}$.

Если принять радиус трубы $R = 1$ см и скорость течения $v = 1$ см/с, то для воды ($\rho = 10^3$ кг/м³, $\eta = 1,004 \cdot 10^{-3}$ Па·с при $t = 20^\circ\text{C}$) число $Re = 86$. Это означает, что силы вязкости не существенны, и воду можно рассматривать как невязкую жидкость. Однако это приближение становится несправедливым, если радиус трубки уменьшить на два порядка, и $Re = 0,86 < 1$. При таком течении распределение давлений и скоростей в потоке уже не подчиняется уравнению Бернулли. Еще в большей степени это относится к вязкому глицерину ($\rho = 1260$ кг/м³, $\eta = 1,4$ Па·с).

При течении воздуха по трубе ($\rho = 1,2$ кг/м³, $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с) число Рейнольдса приблизительно на порядок меньше, чем при аналогичном течении воды. Это указывает на то, что силы вязкости при течении воздуха и других газов играют бóльшую роль, чем при аналогичном течении воды.

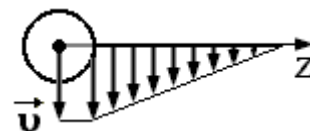
Вывод рабочей формулы

Вязкость — очень важный параметр. Достаточно только вспомнить, что ни один из существующих двигателей и механизмов не обходится без жид-

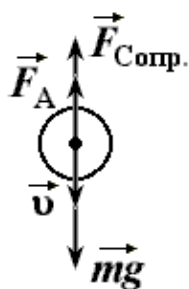
костного охлаждения или жидкой смазки. Поэтому понятен интерес и к методам измерения вязкости. В данной работе рассматривается один из них, получивший заслуженное признание и ставший классическим.

Измерение вязкости методом Стокса

Если в жидкости под действием, например, силы тяжести со скоростью v движется шарик (см. рис. справа), то *прилегающий к поверхности шарика слой*



жидкости имеет ту же скорость, что и шарик. За счёт межмолекулярных сил этот слой вовлекает в движение следующий. Тот побуждает к движению другой, прилегающий к нему слой, и так далее.



Из-за малости сил внутреннего трения объём вовлекаемой в движение жидкости тоже мал и *скорость движения слоёв* по мере удаления от шарика *быстро падает*.

При свободном падении шарика в измеряемой жидкости на шарик действуют три силы: вес шарика mg , выталкивающая сила Архимеда F_A и сила сопротивления со стороны жидкости $F_{\text{сопр.}}$ (часто она называется *силой Стокса*). Закон движения шарика имеет вид:

Закон движения шарика имеет вид:

$$mg - (F_{\text{сопр.}} + F_A) = ma.$$

Поскольку **сила Стокса** $F_{\text{сопр.}}$ зависит от скорости движения шарика v , то через некоторое время от начала падения (это время называется **временем релаксации**) устанавливается равновесие. При этом ускорение становится равным нулю ($a = 0$) и в соответствии с 1^{ым} законом Ньютона выполняется равенство:

$$mg = F_{\text{сопр.}} + F_A.$$

Используя выведенное Стоксом на основе формулы (1) выражение для силы сопротивления:

$$F_{\text{сопр.}} = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v,$$

записав массу шарика как

$$m = (4/3) \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{\text{ш}},$$

а силу Архимеда как

$$F_A = (4/3) \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g,$$

получаем расчётную **формулу Стокса** для определения вязкости жидкости:

$$\eta = \frac{2 \cdot (\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}) \cdot g \cdot r^2}{9 \cdot v}. \quad (6)$$

Здесь

$\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости;

$\rho_{\text{т}}$ — плотность материала шарика (твёрдого тела);

v — скорость равномерного (установившегося) движения шарика;

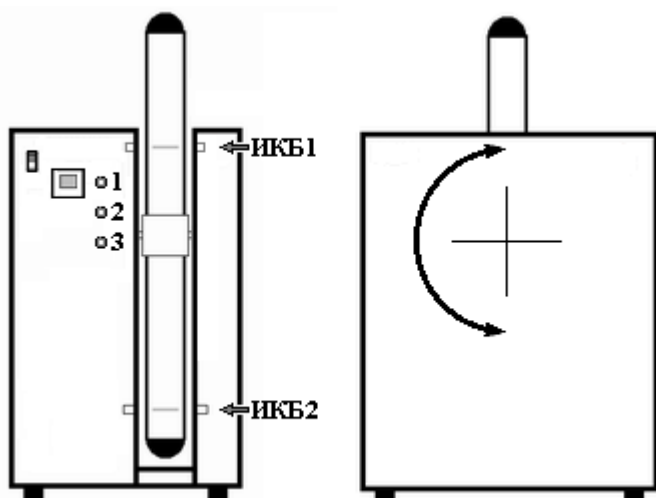
r — радиус шарика.

Уравнение (6) справедливо лишь тогда, когда шарик падает в безграничной среде. Если шарик падает вдоль оси трубки радиуса R , то приходится учитывать влияние боковых стенок. Поправки в формуле Стокса для такого случая теоретически обосновал **Ладенбург**.

Формула для определения коэффициента вязкости с учётом поправок Ладенбурга принимает следующий вид:

$$\eta = \frac{2 \cdot (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}}) \cdot g \cdot r^2}{9 \cdot v \cdot \left(1 + 2,4 \frac{r}{R}\right)}. \quad (7)$$

Описание экспериментальной установки



В лабораторной установке реализован метод измерения вязкости, предложенный Стоксом. На рисунке слева показан общий вид установки.

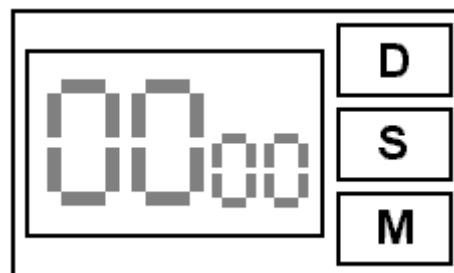
Шарик свободно падает в жидкости (глицерине), налитой в герметично закрытый цилиндрический сосуд, что позволяет избежать поглощения глицерином воды из воздуха и обеспечивает повторяемость результатов измерений.

Время движения шарика в глицерине между двумя метками измеряется электронным секундомером с двумя инфракрасными барьерами (ИКБ1 и ИКБ2). Для повторения эксперимента снизу цилиндра подводится кольцевой магнит, фиксирующий шарик, и цилиндр вместе с магнитом переворачивается. Новое измерение проводится после приведения секундомера в рабочее состояние и удаления фиксирующего магнита.

Внимание! Поворот цилиндра следует делать плавно и только в направлениях, показанных стрелками на рисунке.

В установке предусмотрен и режим проведения измерений с ручным секундомером, расположенным в правой верхней части передней панели. Его кнопки выполняют следующие функции:

- М** — перевод в режим секундомера,
- D** — старт/стоп,
- S** — сброс показаний.



Контрольные вопросы

1. Объясните, в чем заключается явление вязкости.
2. Что такое коэффициент вязкости? От чего он зависит?
3. Чем объясняется различный характер зависимости вязкости от температуры газов и жидкостей?
4. Каков физический смысл числа Рейнольдса?
5. Что такое ламинарное и турбулентное течения?
6. Как зависит сила сопротивления движению тела в жидкости от скорости? Почему?
7. Что представляют собой линии и трубки тока?
8. Что такое время релаксации?
9. Имеется 2 шарика из одинакового материала, но различного размера. Какой шарик будет быстрее падать в вязкой жидкости?
10. Когда шарик быстрее падает в вязкой жидкости: в узком сосуде или в широком?

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Механика. Молекулярная физика. 350 с. т.1.— М. Наука. 1989.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Учебное пособие для втузов. В 5 книгах. – М. Астрель/АСТ 2003 г.
3. Трофимова Т.И. Краткий курс физики: Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, испр.— 352 стр – М: Высшая школа, 2002 г.
4. Грабовский Р.И. Курс физики: Учебник для вузов. Изд. 6-е – 608 с. {Учебники для вузов; специальная литература}, СПб; Лань, 2002 г.

Лабораторная работа № 40

Определение емкости конденсатора баллистическим гальванометром

Цель работы: изучение принципов работы конденсаторов, определение ёмкости конденсаторов.

Оборудование: миллиамперметр, вольтметр, исследуемый конденсатор, реостат.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Конденсатором называют систему, состоящую из двух изолированных проводников, пространство между которыми может быть заполнено диэлектриком. Эти проводники называют *обкладками конденсатора*. В зависимости от геометрии обкладок конденсаторы бывают *плоские* (рис.1а), *цилиндрические* (рис.1б) или *сферические* (рис.1с).

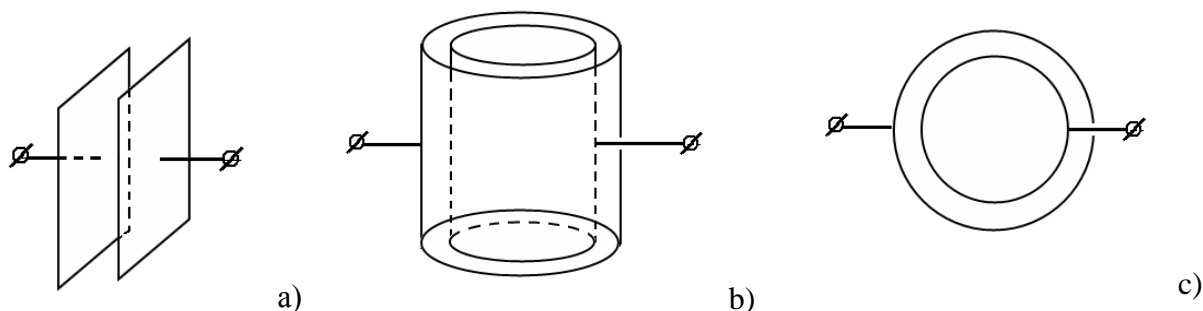


Рис. 1. Геометрия конденсаторов

При зарядке конденсатора на его обкладках появляются равные по модулю и противоположные по знаку заряды. Заряд q конденсатора (под зарядом конденсатора понимают заряд положительно заряженной его обкладки) оказывается пропорциональным напряжению U , созданному на его обкладках:

$$q = CU.$$

Физическую величину C , равную отношению заряда q конденсатора к напряжению U на его обкладках:

$$C = \frac{q}{U}, \quad (1)$$

называют ёмкостью (или просто ёмкостью) конденсатора. Являясь коэффициентом пропорциональности между зарядом и разностью потенциалов на пластинах конденсатора, ёмкость C не зависит от заряда и потенциала пластин, а определяется их размером, формой, толщиной и диэлектрической проницаемостью изолятора, разделяющего пластины.

Рассмотрим в качестве примера плоский конденсатор. Обкладками плоского конденсатора являются две одинаковые плоские проводящие пластины. Пусть S - площадь каждой из пластин, d - расстояние между ними, а ε - диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего пространство между пластинами. Будем считать, что расстояние между пластинами много меньше их размеров, т.е.

$$d \ll \sqrt{S}.$$

Предположим, что в результате зарядки конденсатора на его обкладках появились заряды $+q$ и $-q$. Поле каждой из обкладок можно найти по формуле напряжённости электрического поля, создаваемого бесконечной равномерно заряженной плоскостью (т.к. $d \ll \sqrt{S}$):

$$E_+ = E_- = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}, \quad (2)$$

где $\sigma = q/S$ - поверхностная плотность заряда, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ - электрическая постоянная.

Напряженность \vec{E} результирующего поля находится согласно принципу суперпозиции:

$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-. \quad (3)$$

Таким образом, для напряжённости поля внутри конденсатора имеем:

$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_- = \frac{q}{S\varepsilon\varepsilon_0}.$$

Напряжение (разность потенциалов) на обкладках конденсатора при этом будет равным:

$$U = \varphi_+ - \varphi_- = Ed = \frac{qd}{\varepsilon_0\varepsilon S}. \quad (4)$$

Для ёмкости плоского конденсатора окончательно получаем выражение:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}. \quad (5)$$

Отметим, что при выводе формулы ёмкости плоского конденсатора мы считали поле в конденсаторе однородным. Однако однородность поля нарушается вблизи краёв конденсатора, и краевые эффекты вносят некоторую поправку к формуле (5).

Существуют различные экспериментальные способы определения ёмкости конденсатора.

Для определения емкости с помощью баллистического гальванометра используется тот факт, что при быстрой разрядке конденсатора через баллистический гальванометр отклонение стрелки гальванометра пропорционально протекающему через него заряду. Если исследуемые конденсаторы заряжать до одного и того же напряжения, то отклонение стрелки гальванометра будет соответственно пропорционально емкости конденсатора.

Баллистический гальванометр устроен практически так же, как и обычный гальванометр, но у него увеличен момент инерции вращающейся рамки, на которой закреплено зеркало. На зеркало падает свет от источника, который, отражаясь от зеркала на рамке и от ещё одного фиксированного зеркала, в итоге попадает на шкалу, по которой можно с довольно большой точностью определить угол поворота рамки.

Одним из методов определения емкости конденсатора является метод Сотти. Мостовая схема Сотти (рис. 2) работает на переменном токе. Мостик питается переменным током через трансформатор. Принцип измерения емкости основан на нахождении такого положения движка D на реохорде АВ, при котором ток через индикатор И отсутствует.

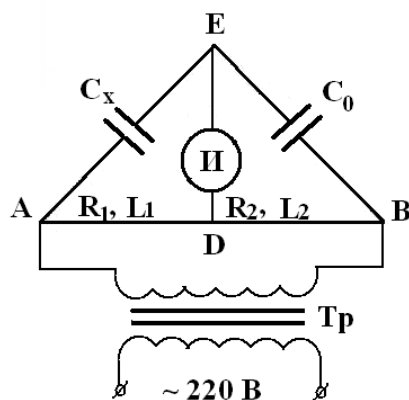


Рис. 2. – Мостовая схема Сотти

Здесь:

- C_0 – эталонный конденсатор;
- C_x – исследуемый конденсатор;
- R_1, R_2 – сопротивления плеч AD и DB соответственно;
- L_1, L_2 – длины плеч AD и DB соответственно;
- AB – реохорд;
- И – индикатор нуля (отсутствия тока);
- D – подвижный контакт;
- Tr – трансформатор.

В качестве индикатора равновесия моста используются различные электронные устройства и, в частности, осциллограф. Равновесию моста соответствует фокусировка электронного пучка в точку на экране трубки.

Следующий способ определения емкости конденсатора – по схеме, представленной на рис. 3.

Постоянный ток через конденсатор не проходит, ибо он разрывает цепь. Пусть к конденсатору приложено переменное синусоидальное напряжение (индуктивностью цепи и омическим сопротивлением подводящих проводов пренебрегаем):

$$U = U_0 \sin \omega t, \quad (6)$$

Конденсатор непрерывно перезаряжается, вследствие чего в цепи потечет переменный ток. Заряд на конденсаторе изменяется со временем, а его мгновенное значение из (1) $q = CU$.

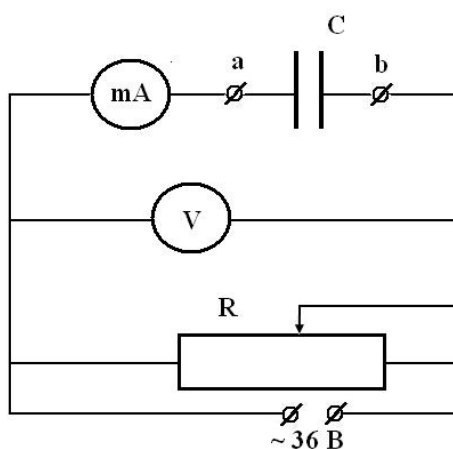


Рис. 3.Схема экспериментальной установки.

где U_0 — амплитудное значение напряжения, ω — циклическая частота; в сети $\omega = 2\pi \cdot 50c^{-1}$.

Тогда ток в конденсаторе будет:

$$I = \frac{dq}{dt} = C \frac{dU}{dt}. \quad (7)$$

ё

Подставив (6) в (7), получим мгновенное значение тока в конденсаторе:

$$I = U_0 C \omega \cos \omega t. \quad (8)$$

Видно, что в конденсаторе ток опережает напряжение по фазе на 90° . Причина опережения заключается в том, что пока ток течет в одном и том же направлении, заряд на обкладках конденсатора растет. Ток проходит через максимум и начинает убывать. Заряд и, следовательно, напряжение все еще продолжают расти, достигая максимума в тот момент, когда ток

обращается в нуль. Вслед за этим ток изменяет направление, и начинается убывание зарядов.

Амплитудное значение тока будет $I U_0 C \omega$, откуда емкостное сопротивление

$$X_c = \frac{U_0}{I_0} = \frac{1}{C \omega}. \quad (9)$$

X_c можно выразить через эффективные значения тока и напряжения:

$$X_c = \frac{U_{\text{э}}}{I_{\text{э}}} = \frac{1}{C \omega},$$

откуда

$$C = \frac{I_{\text{э}}}{\omega U_{\text{э}}}. \quad (10)$$

Измерив эффективные значения тока и напряжения, можно по формуле (10) вычислить емкость конденсатора.

ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Соединить электрическую цепь по схеме (рис.3).
2. Установить движок реостата на «min».
3. Подсоединить в ветвь **a-b** схемы конденсатор C_1 .
4. Включить питание $\sim 36 \text{ В}$.
5. Задавая движком реостата различные значения сопротивления R (5 значений), записать в таблицу соответствующие эффективные значения напряжения $U_{\text{эф}}$ и силы тока $I_{\text{эф}}$.
6. Используя полученные данные, вычислить емкость конденсатора по

формуле $C = \frac{I_{\text{эф}}}{U_{\text{эф}} \cdot \omega}$,

где $\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ с}^{-1}$ – циклическая частота.

7. Найти среднее значение \bar{C} , среднюю квадратичную ошибку $S_{\bar{C}}$, и доверительный интервал ΔC по формулам:

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n}, \quad S_{\bar{C}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{C} - C_i)^2}{n(n-1)}},$$

$\Delta C = S_{\bar{C}} \cdot t_{p,n}$, где n – число измерений, $t_{p,n}$ – коэффициент Стьюдента.

8. Полученные результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1:

Таблица 1

	$I_{эф}$, А	$U_{эф}$, В	C , $\cdot 10^{-6}$ Ф	\bar{C} , $\cdot 10^{-6}$ Ф	$S_{\bar{c}}$, $\cdot 10^{-6}$ Ф	ΔC , $\cdot 10^{-6}$ Ф
C_1						
C_2						
Последовательное соединение						
Параллельное соединение						

9. Подсоединить в ветвь **a-b** схемы конденсатор C_2 и повторить пункты 4-8.
10. Соединить конденсаторы C_1 и C_2 последовательно (см. рис. 4) и повторить п.п. 4-8.

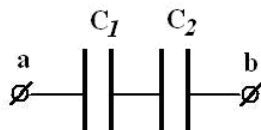


Рис. 4. Последовательное соединение

11. Соединить конденсаторы C_1 и C_2 параллельно (см. рис. 5) и повторить п.п. 4-8.

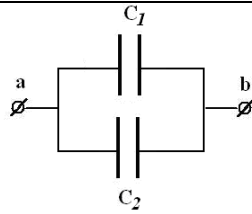


Рис. 5. Параллельное соединение

12. Сравнить полученные значения емкости конденсаторов при последовательном и параллельном соединении со значениями, полученными по формулам:

а) $\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ - последовательное соединение,

б) $C_{\text{общ}} = C_1 + C_2$ - параллельное соединение.

13. По окончании работы схему обесточить.

Контрольные вопросы

1. Что такое конденсатор?
2. Что называют электроемкостью уединенного проводника, конденсатора? От чего зависит, в каких единицах измеряется?
3. Формулы емкости плоского, цилиндрического, сферического конденсаторов.
4. Последовательное и параллельное соединение конденсаторов.
5. Какое поле называется однородным? Связь между разностью потенциалов и напряженностью однородного электрического поля.
6. Движение заряженных частиц в электрическом поле.
7. Энергия электрического поля конденсатора. Объемная плотность энергии электрического поля.
8. Ток и напряжение в конденсаторе. Емкостное сопротивление.
9. Эффективные значения тока и напряжения.
10. Вывод расчетной формулы.

Литература

- 1 Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие для вузов: В 5 кн.: Кн. 3: Электричество и магнетизм. - М.: АСТ: Астрель. - 336 с. 2005.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: Уч. Пособие. М.: Академия, - 560с. 2004
3. Трофимова Т.И. Краткий курс физики: Учебное пособие для вузов Изд. 2-е, испр. - 352 с, М: Высшая Школа, 2002.

РАССМОТРЕНО
на заседании кафедры физики
«__» _____ 2015 г.
Протокол № _____
Зав. кафедрой
_____ Ю.М.Смирнов

УТВЕРЖДЕНО
учебно-методическим советом ФЭТ
«__» _____ 2015 г.
Протокол № _____
Председатель УМС ФЭТ
_____ А.Р. Тенчурина

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ:

по дисциплинам «Физика 1», «Физика»

2.1. Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса

40. Определение ёмкости конденсатора баллистическим гальванометром

Разработчики: Сыздыков А.К.,
Морозов А.А.,
Смирнов Ю.М.

Редактор Искакова Р.С.

Подписано к печати

Тираж экз.

Объем 1,4 уч.-изд. л.

Издательство КарГТУ, 100027, Караганда, Б. Мира, 56

Формат 60x84x16

Заказ №