

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Механико-математический факультет

УТВЕРЖДЕНО:
Декан ММФ ТГУ
Л. В. Гензе

Оценочные материалы по дисциплине

Физика

по направлениям подготовки

01.03.01 Математика

02.03.01 Математика и компьютерные науки

01.03.03. Механика и математическое моделирование

Направленность (профиль) подготовки:

**Основы научно-исследовательской деятельности в области математики
Основы научно-исследовательской деятельности в области математики и
компьютерных наук**

**Основы научно-исследовательской деятельности в области механики и
математического моделирования**

Форма обучения

Очная

Квалификация

Бакалавр

Год приема

2023

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
Л. В. Гензе

Председатель УМК
Е.А.Тарасов

Томск – 2023

1. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания в области математического анализа, комплексного и функционального анализа, алгебры, аналитической геометрии, дифференциальной геометрии и топологии, дифференциальных уравнений, дискретной математики и математической логики, теории вероятностей, математической статистики и случайных процессов, численных методов, теоретической механики как для использования в профессиональной деятельности, так и для консультирования.

ОПК-3 Способен использовать методы физического моделирования, современное экспериментальное оборудование или специализированное программное обеспечение для проведения вычислительных экспериментов в профессиональной деятельности.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 1.1 Демонстрирует навыки работы с профессиональной литературой по основным естественнонаучным и математическим дисциплинам.

ИОПК 1.2 Демонстрирует навыки выполнения стандартных действий, решения типовых задач с учетом основных понятий и общих закономерностей, формулируемых в рамках базовых математических и естественнонаучных дисциплин.

ИОПК 1.3 Владеет фундаментальными знаниями, полученными в области математических и (или) естественных наук.

ИОПК 3.1 Участвует в проведении эксперимента (физического, мысленного или компьютерного) на основе сформулированной с руководителем физической модели явления или модели из другой научной области.

ИОПК 3.2 Владеет методами физического или компьютерного моделирования, методами планирования эксперимента, теорией подобия и размерностей.

ИОПК 3.3 Анализирует полученные экспериментальные результаты.

2. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания

Элементы текущего контроля:

- контрольная работа или тест;
- лабораторная работа.

Контрольная работа (ИОПК 1.1, ИОПК 1.2) состоит из 4-х задач

Примеры задач:

Задача 1. Радиус-вектор материальной точки изменяется со временем по закону $\vec{r}(t) = At^2\vec{i} + Bt\vec{j}$, где $A = 0,4 \text{ м/с}^2$, $B = 0,1 \text{ м/с}$. Определите: а) скорость v и ускорение a частицы в зависимости от времени; модули скорости и ускорения в момент времени $t = 2 \text{ с}$.

Задача 2. Через невесомый блок перекинута невесомая нерастяжимая нить с грузами массы $M = 1,4 \text{ кг}$ (см. рис. 1). На один из грузов положен перегрузок массой $m = 0,2 \text{ кг}$. Считая, что грузы первоначально находились на одном уровне и пренебрегая трением, определите разность высот Δh , на которых будут находиться грузы через промежуток времени $t = 1 \text{ с}$.

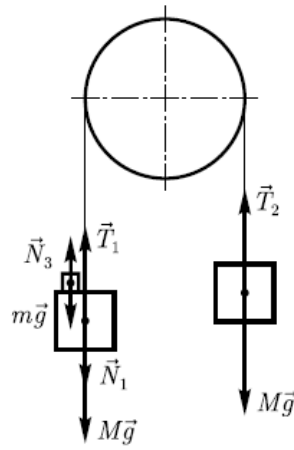


Рис. 1. К задаче 2.

Задача 3. Груз массой $m = 80 \text{ кг}$ поднимают вдоль наклонной плоскости с ускорением $a = 1 \text{ м/с}^2$. Длина наклонной плоскости $l = 3 \text{ м}$, угол α её наклона к горизонту равен 30° , а коэффициент трения $f = 0,15$. Определите: 1) работу, совершаемую подъемным устройством; 2) его среднюю мощность; 3) его максимальную мощность. Начальная скорость груза равна нулю. См. рис.2.

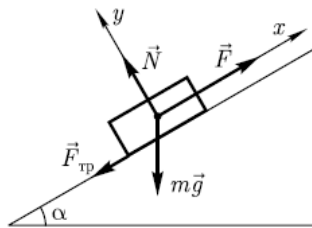


Рис. 2. К задаче 3.

Задача 4. На гладкой наклонной плоскости, составляющей угол $\alpha = 30^\circ$ с горизонтом, находится катушка с ниткой, свободный конец которой укреплен (см. рис. 3). Масса катушки $m = 200 \text{ г}$, ее момент инерции относительно собственной оси $I = 0,45 \text{ г} \cdot \text{м}^2$, радиус намотанного слоя ниток $r = 3,0 \text{ см}$. Найти ускорение оси катушки. Ответ представьте в СИ.

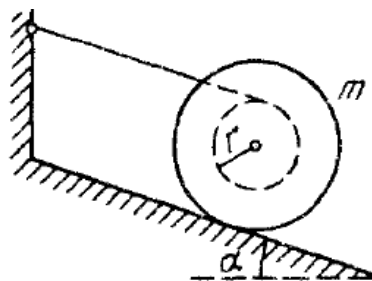


Рис. 3. К задаче 4.

Ответы: Задача 1. $\vec{v}(t) = 2At\vec{i} + B\vec{j}$, $\vec{a}(t) = 2A\vec{i}$, $v = 1,6 \text{ м/с}$, $a = 0,8 \text{ м/с}^2$.

Задача 2. $\Delta h = 0,654 \text{ м}$. Задача 3. $A = 1,72 \text{ кДж}$, $\langle P \rangle = 702 \text{ Вт}$, $P_{\text{max}} = 1,41 \text{ кВт}$.

Задача 4. $a = 1,6 \text{ м/с}^2$.

Критерии оценивания одной задачи контрольной работы	Балл
Приведено полное правильное решение, включающее следующие элементы: 1) верно записано краткое условие задачи; 2) записаны уравнения и формулы, применение которых необходимо и достаточно для решения задачи выбранным способом; 3) выполнены необходимые математические преобразования и расчёты, приводящие к правильному числовому ответу, и представлен ответ. При этом допускается решение «по частям» (с промежуточными вычислениями)	3
Правильно записаны необходимые формулы, проведены вычисления, и получен ответ (верный или неверный), но допущена ошибка в записи краткого условия или переводе единиц в СИ ИЛИ Представлено правильное решение только в общем виде, без каких-либо числовых расчётов ИЛИ Записаны уравнения и формулы, применение которых необходимо и достаточно для решения задачи выбранным способом, но в математических преобразованиях или вычислениях допущена ошибка	2
Записаны и использованы не все исходные формулы, необходимые для решения задачи ИЛИ Записаны все исходные формулы, но в ОДНОЙ из них допущена ошибка	1
Все случаи решения, которые не соответствуют вышеуказанным критериям выставления оценок в 1, 2, 3 балла	0
Контрольная работа считается выполненной, если обучающийся набрал от 6 до 12 баллов	

Тест (ИОПК 1.1, ИОПК 1.2) состоит из 24 вопросов по 0,5 балла за каждый правильный ответ

Пример вопросов теста:

1. Чему равна мгновенная скорость материальной точки? Выберите **один** вариант из числа предложенных ответов.

А. Производной радиус-вектора, определяющего положение материальной точки, по времени

Б. Производной от перемещения материальной точки по времени

В. Производной от пути по времени

Г. Мгновенная скорость – это путь, пройденный материальной точкой в единицу времени

2. Чему равно мгновенное ускорение материальной точки? Выберите **два** варианта из числа предложенных ответов.

А. Производной от скорости по времени

Б. Второй производной радиус-вектора, определяющего положение материальной точки, по времени

В. Производной от приращения скорости по времени

Г. Второй производной от пути по времени

3. Какими величинами определяется механическое состояние материальной точки: радиус-вектором $\vec{r}(t)$, скоростью $\vec{v}(t)$, ускорением $\vec{a}(t)$? Выберите **один** вариант из числа предложенных ответов.

А. $\vec{r}(t)$, $\vec{a}(t)$

- Б. $\vec{r}(t), \vec{v}(t), \vec{a}(t)$
 В. $\vec{r}(t), \vec{v}(t)$
 Г. $\vec{v}(t), \vec{a}(t)$

4. Скорость точки, движущейся прямолинейно, растет по линейному закону $v = v_0 + kx$. Как при этом изменяется ускорение? Выберите **один** вариант из числа предложенных ответов.

- А. Убывает
 Б. Остается неизменным
 В. Растет с увеличением x по линейному закону
 Г. Растет с увеличением x пропорционально \sqrt{x}

Ключи: 1 А, 2 АБ, 3 В, 4 В.

Критерии оценивания: тест считается пройденным, если обучающийся набрал от 6 до 12 баллов.

Лабораторная работа (ИОПК 3.1, ИОПК 3.2, ИОПК 3.3) состоит из одного отчета.

Пример отчета по итогам выполнения лабораторной работы по теме «Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса» представлен в Приложении 1.

Критерии оценивания одной лабораторной работы	Балл
Проведен полный анализ по теме лабораторной работы, включающий следующие элементы: 1) в соответствии с методом измерений проведены замеры и вычисления искомых физических величин; 2) выполнена необходимая обработка результатов измерений; 3) корректно обоснованы полученные с учетом погрешностей результаты измерений	3
Проведен неполный анализ по теме лабораторной работы, не включающий хотя бы один из элементов: 1) в соответствии с методом измерений проведены замеры и вычисления искомых физических величин; 2) выполнена необходимая обработка результатов измерений; 3) корректно обоснованы полученные с учетом погрешностей результаты измерений	2
Проведен неполный анализ по теме лабораторной работы, не включающий два из элементов: 1) в соответствии с методом измерений проведены замеры и вычисления искомых физических величин; 2) выполнена необходимая обработка результатов измерений; 3) корректно обоснованы полученные с учетом погрешностей результаты измерений ИЛИ получен некорректный результат измерений	1
Все случаи решения, которые не соответствуют вышеуказанным критериям выставления оценок в 1, 2, 3 балла	0
Лабораторная работа считается выполненной, если обучающийся набрал от 2 до 3 баллов	

3. Оценочные материалы итогового контроля (промежуточной аттестации) и критерии оценивания

Итоговый контроль знаний (промежуточная аттестация) соответствует компетентностной структуре дисциплины (ИОПК 1.3). Для итогового контроля (промежуточной аттестации) применяется балльно-рейтинговая система (сумма баллов за текущий контроль знаний и промежуточную аттестацию составляет 100 баллов). Итоговый контроль знаний (промежуточная аттестация) включает результаты текущего контроля.

Итоговый контроль знаний (промежуточная аттестация) состоит из трех частей	Количество баллов (min-max)
Первая часть включает выполнение в течение семестра 2-х контрольных работ или 2-х тестов (по темам «Механика» и «Электродинамика»). Возможен комбинированный вариант, например, контрольная работа по теме «Механика» и тест по теме «Электродинамика»	12-24
Вторая часть включает выполнение в течение семестра 12-ти лабораторных работ (шесть лабораторных работ по теме «Механика» и шесть лабораторных работ по теме «Электродинамика»)	24-36
Третья часть включает письменный ответ на два вопроса экзаменационного билета (один вопрос по теме «Механика» и один вопрос по теме «Электродинамика»)	28-40

Пример экзаменационного билета:

Вопрос №1. Сформулируйте закон сохранения импульса. Что такое упругий и неупругий удар.

Вопрос №2. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда и закон Кулона. Дайте определение физических величин: напряженность и потенциал электрического поля. Каким соотношением связаны между собой напряженность и потенциал электрического поля?

Критерии оценивания первой и второй частей промежуточной аттестации представлены в разделе 2.

Критерии оценивания третьей части промежуточной аттестации	Балл
Дан развернутый ответ на один вопрос билета, состоящий из: 1) верно записанных уравнений и формул; 2) верно приведенных графиков зависимостей физических величин; 3) точно сформулированных физических законов	18-20
Дан ответ на один вопрос билета, включающий ОДНУ ошибку: 1) в записанных уравнениях и формулах ИЛИ 2) в приведенных графиках зависимостей физических величин	16-17
Дан ответ на один вопрос билета, включающий ДВЕ	14-15

ошибки: 1) в записанных уравнениях и формулах ИЛИ 2) в приведенных графиках зависимостей физических величин ИЛИ 3) в формулировках физических законов	
--	--

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Оценка	Условия	Количество баллов (min-max)
«Отлично»	Обучающийся выполнил все лабораторные и контрольные работы и правильно ответил на два вопроса экзаменационного билета	100-88
«Хорошо»	Обучающийся выполнил все лабораторные и контрольные работы и ответил на два вопроса экзаменационного билета, допустив одну ошибку	87-75
«Удовлетворительно»	Обучающийся выполнил все лабораторные и контрольные работы и ответил на два вопроса экзаменационного билета, но допустил две ошибки	74-62
«Неудовлетворительно»	Обучающийся выполнил все лабораторные и контрольные работы, но не ответил ни на один вопрос экзаменационного билета	36-60

4. Оценочные материалы для проверки остаточных знаний (сформированности компетенций)

Физические задачи (ИОПК 1.1, ИОПК 1.2).

Задача 1. Вдоль прямой в точках F, D и C (рис. 1) помещены заряды $q_1 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$, $q_2 = -1 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ и $q_3 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$. Расстояние АВ равно 5 см, расстояние ВС равно 2 см. Найдите силы, действующие на каждый заряд.

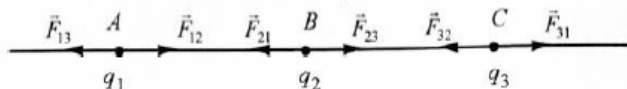


Рис. 1. К задаче 1.

Задача 2. Электростатическое поле создается плоскостью, равномерно заряженной с поверхностной плотностью $\sigma = 4 \text{ нКл/м}^2$. Определите разность потенциалов между двумя точками поля, лежащими на расстоянии $r_1 = 10 \text{ см}$ и $r_2 = 30 \text{ см}$ от плоскости.

Ответы: *Задача 1.* $F_1 = 0,013Н$, $F_2 = 0,22Н$, $F_3 = 0,45Н$. *Задача 2.* $\varphi_1 - \varphi_2 = 45,2В$.

Тест (ИОПК 1.1, ИОПК 1.2).

1. Какое из нижеприведенных утверждений справедливо?

- А. Масса – это количество вещества, содержащееся в теле
- Б. При прекращении действия на тело силы - тело мгновенно останавливается
- В. В классической механике масса тела меняется при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой
- Г. Масса является мерой инертности тела

2. Выделите неверное утверждение.

- А. Сила – количественная мера взаимодействия по крайней мере двух тел, вызывающая движение тела или изменение его формы, или и то и другое вместе
- Б. Сила является причиной ускорения
- В. Сила в классической механике изменяется при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой
- Г. При одновременном действии нескольких сил тело получает такое ускорение, какое бы оно получило под действием результирующей силы $\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i$

3. Зависимость потенциальной энергии тела от его положения изображается параболой, удовлетворяющей уравнению $E_n = \alpha x^2$. По какому закону изменяется сила, действующая на тело?

- А. $F_x = 2\alpha x$
- Б. $F_x = -2\alpha x$
- В. $F_x = \alpha x$
- Г. $F_x = -\alpha x$

4. Меняются ли кинетическая и потенциальная энергия системы материальных точек при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую?

- А. Кинетическая энергия меняется, потенциальная – нет
- Б. Потенциальная энергия меняется, кинетическая – нет
- В. Меняются как кинетическая, так и потенциальная энергии
- Г. Не меняется ни кинетическая ни потенциальная энергии

5. На рисунке 2 показана зависимость потенциальной энергии E_n взаимодействия двух частиц от расстояния r между ними. Каким расстояниям между частицами соответствует состояние устойчивого равновесия?

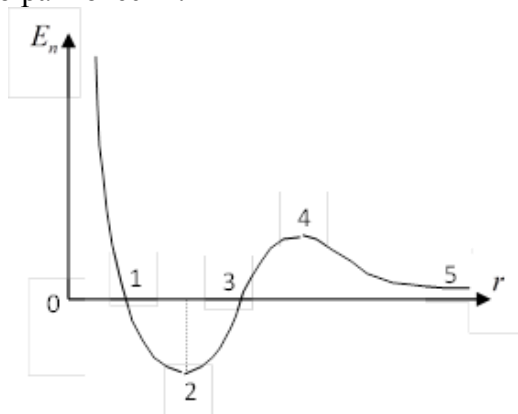


Рис. 2. К вопросу 5.

- А. 1
- Б. 2
- В. 4
- Г. 5

6. Груз на дне цилиндрической пробирки с площадью сечения S при погружении пробирки в жидкость удерживает ее в вертикальном положении. После погружения пробирки на некоторую глубину она начинает колебаться относительно положения равновесия. Пробирка, масса которой вместе с грузом равна m , в жидкости с плотностью ρ находится в равновесии, когда расстояние ее дна относительно уровня жидкости L . Определите период колебаний пробирки, пренебрегая вязкостью жидкости (рис. 3).

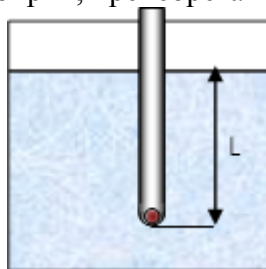


Рис. 3. К вопросу 6.

А. $T = \frac{2\pi}{L} \sqrt{\frac{m}{\rho g}}$

Б. $2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$

В. $T = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{m}{\rho g}}$

Г. $T = \pi \sqrt{\frac{L}{g}}$

Ключи: 1Г, 2В, 3Б, 4А, 5Б, 6Б.

Теоретические вопросы (ИОПК 1.3).

1. Что такое радиус-вектор, скорость и ускорение?

Ответ должен содержать определение радиус-вектора, скорости и ускорения, а также формулы для их нахождения.

2. Что называется силой тока? Что называется электродвижущей силой генератора?

Ответ должен содержать определение силы тока, ЭДС и формулы для их нахождения.

Информация о разработчиках

Кистенев Юрий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и экспериментальной физики физического факультета ТГУ.

Стоянова Мария Яковлевна – старший преподаватель кафедры общей и экспериментальной физики физического факультета ТГУ.

Приложение 1.
Пример отчета по итогам выполнения лабораторной работы

Министерство образования и науки Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Механико-математический факультет

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО
МЕТОДУ СТОКСА

Автор работы
студент группы № _____

Томск – 2023

Цель работы: изучить метод Стокса, определить коэффициент вязкости жидкости.

Приборы и принадлежности: стеклянный цилиндрический сосуд с исследуемой жидкостью, микроскоп МИР-1, линейка, секундомер, шарики и пинцет.

1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Прежде чем говорить о свойствах жидкости, остановимся на агрегатных состояниях веществ. На настоящий момент известно 4 агрегатных состояния вещества: твердое тело, жидкость, газ, плазма. Рассмотрим первые три состояния.

Твёрдые тела могут находиться в кристаллическом и аморфном состоянии.

Кристаллы характеризуются пространственной периодичностью в расположении равновесных положений атомов, которая носит название кристаллической решётки. Атомы вещества закреплены строго в узлах кристаллической решетки и могут совершать колебания относительно положения равновесия. В аморфных телах атомы колеблются вокруг хаотически расположенных точек. Аморфное тело можно рассматривать как жидкость с очень большой вязкостью.

Газ характеризуется очень слабыми связями между молекулами, а также их большой подвижностью. Частицы газа почти свободно и хаотически движутся в промежутках между столкновениями. В газах обычно расстояние между молекулами и атомами значительно больше размеров молекул, а силы притяжения очень малы. Подобно жидкостям, газы обладают текучестью и сопротивляются деформации. Газы не имеют фиксированного объёма, а стремятся заполнить весь доступный объём (например, сосуда).

Жидкость занимает промежуточное состояние между твёрдым телом и газом: газ не сохраняет ни объём, ни форму, а твёрдое тело сохраняет и то, и другое. Молекулы жидкости располагаются близко друг к другу, в слоях, движущихся друг относительно друг с скоростью u .

Механизм возникновения внутреннего трения справедлив для газов и жидкостей, и принципиально отличается от трения в твердых телах. Поэтому для жидкостей и газов вводится понятие внутреннее трение или вязкость. Явление внутреннего трения возникает в тех случаях, когда на хаотическое тепловое движение молекул жидкости или газа накладывается упорядоченное движение, другими словами, внутреннее трение – это своего рода сопротивление жидкости движению отдельных ее частей.

Строго говоря, механизм образования внутреннего трения в жидкостях и газах тоже различен. Вязкость, или внутреннее трение в газах, обуславливается переносом импульса молекул поперек направления движения слоев газа, имеющих различные скорости. На рис. 1 показаны векторы скоростей u слоев, перпендикулярные оси X . Произвольно выбранный слой движется медленнее, чем слой, расположенный справа, и быстрее, чем слой, расположенный слева. Разбиение на слои сделано условно, Δx – расстояние между слоями, скорости которых отличаются на Δu .

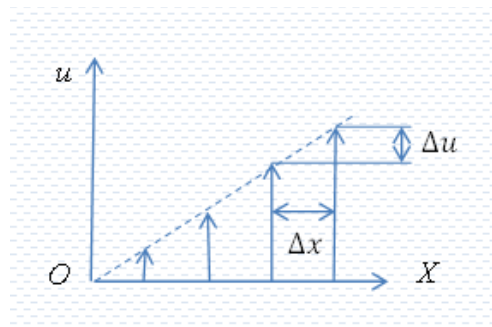


Рисунок 1. Механизм возникновения вязкости.

В результате теплового движения молекулы перелетают из одного слоя газа в другой, перенося при этом свой импульс mv упорядоченного движения из одного слоя в другой. В результате обмена молекулами между слоями, движущимися с различными скоростями, импульс упорядоченного движения быстрее движущегося слоя уменьшается, а медленнее движущегося – увеличивается. Это означает, что быстрее движущийся слой тормозится, а медленнее движущийся ускоряется. В этом и состоит механизм возникновения силы внутреннего трения между слоями газа, движущимися с различными скоростями. Сила трения, отнесенная к площади трущихся поверхностей, равна потоку импульса упорядоченного движения в перпендикулярном скорости направлении. Следовательно, уравнение процессов переноса примет вид:

$$I_{mv} = -\frac{1}{3}n_0\langle v\rangle\langle l\rangle m \frac{\partial u}{\partial x} = -\eta \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (1)$$

где n_0 – концентрация молекул газа, $\langle v\rangle$ – средняя скорость движения молекул, $\langle l\rangle$ – длина среднего свободного пробега, m – масса молекул, $\frac{\partial u}{\partial x}$ – градиент скорости упорядоченного движения, η – динамическая вязкость. Знак «-» в уравнении (1) учитывает, что сила трения, действующая на более быстро движущиеся слои, направлена против скорости.

Причем,

$$\eta = \frac{n_0\langle v\rangle\langle l\rangle m}{3} = \rho \frac{\langle v\rangle\langle l\rangle}{3}, \quad (2)$$

где $\rho = n_0 m$ – плотность газа.

Впервые выражение (2) для динамической вязкости было получено Дж. Максвеллом в 1860 г.

Т.к. $\langle v\rangle \sim \sqrt{T}$, то можно заключить, что динамическая вязкость не зависит от давления и растет в основном пропорционально корню квадратному из температуры, если отвлечься от небольшого роста, связанного с уменьшением поперечного сечения при росте температуры.

Независимость динамической вязкости, т.е. силы трения от давления и, следовательно, от плотности газа, на первый взгляд представляется непонятной. Дело в следующем: длина свободного пробега изменяется обратно пропорционально давлению, а концентрация молекул – прямо пропорционально. Переносимый каждой молекулой импульс упорядоченного движения прямо пропорционален длине свободного пробега, т.е. обратно пропорционален давлению. Поскольку концентрация молекул, переносящих импульс, прямо пропорциональна давлению, получается, что суммарный переносимый молекулами импульс, отнесенный к промежутку времени и объему, не зависит от давления. Это утверждение хорошо подтверждается экспериментально.

Единицей измерения динамической вязкости является Паскаль-секунда:

$$1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 1 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2 = 1 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}).$$

Наряду с динамической вязкостью используется также кинематическая вязкость, определяемая как динамическая вязкость, отнесенная к плотности газа:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Единицей измерения кинематической вязкости является $1 \text{ м}^2/\text{с}$.

Возникновение вязкости в газах обусловлено переносом импульса направленного движения молекул газа из слоя в слой при их тепловом движении. Иной механизм внутреннего трения в жидкости. Он определяется, главным образом, силами молекулярного взаимодействия. Так как молекулы жидкости расположены на близком расстоянии друг от друга, то силы притяжения между ними значительны, они и обуславливают большую вязкость жидкости.

Используя модель скачков молекул, советский физик Я.И.Френкель показал, что вязкость изменяется по экспоненциальному закону:

$$\eta = A \exp\left(\frac{W}{kT}\right), \quad (3)$$

где A – константа, определяемая свойствами жидкости, W - потенциальная энергия молекул.

Формула (3) является приближенной, но она достаточно хорошо описывает вязкость жидкости, например, воды в интервале температур от 5 до 100 °С, глицерина – от 0 до 200 °С.

Из формулы (3) видно, что 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.

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 будет уменьшаться, но они будут двигаться параллельно. Такое слоистое движение жидкости называется ламинарным. При больших скоростях движения жидкости ламинарное движение жидкости становится неустойчивым и сменяется турбулентным, при котором частицы жидкости движутся по сложным траекториям со скоростями, изменяющимися беспорядочным образом. В результате происходит перемешивание жидкости и образуются вихри.

Характер движения жидкости определяется безразмерной величиной Re , называемой числом Рейнольдса. Это число зависит от формы тела и свойств жидкости. При движении шарика радиусом R со скоростью u в жидкости плотностью $\rho_{ж}$ число Рейнольдса можно определить по следующей формуле:

$$Re = \rho_{ж} R \frac{u}{\eta} \quad (4)$$

При малых Re (<10), когда шарик радиусом 1-2 мм движется со скоростью 5-10 см/с в вязкой жидкости, например в глицерине, движение жидкости будет ламинарным. В случае больших чисел Рейнольдса при движении слоев жидкости большую роль играет явление инерции, а не вязкости. В данном случае, слои жидкости перемешиваются, образуются вихри, движение жидкости становится турбулентным.

В случае малых чисел Рейнольдса на тело будет действовать сила сопротивления, пропорциональная скорости

$$\vec{F}_c = -r\vec{u} \quad (5)$$

где r – коэффициент сопротивления. Для тела сферической формы: $r = 6\pi\eta R$.

Сила сопротивления шарика радиусом R примет вид:

$$\vec{F}_c = -6\pi\eta R\vec{u}. \quad (6)$$

Формула (6) называется законом Стокса. Следует отметить, что данная формула справедлива только для ламинарных течений жидкости.

2. ОПИСАНИЕ РАБОЧЕЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

Одним из существующих методов определения коэффициента динамической вязкости является метод Стокса. Суть метода заключается в следующем. Если в сосуд с жидкостью бросить шарик большей плотности, чем плотность жидкости ($\rho > \rho_{ж}$), то шарик будет падать (рис. 2). На движущийся в жидкости шарик действует сила внутреннего трения (сила сопротивления) \vec{F}_c , тормозящая его движение и направленная вверх. Если считать, что стенки сосуда находятся на значительном расстоянии от движущегося шарика, то величину силы внутреннего трения можно определить по закону Стокса (6).

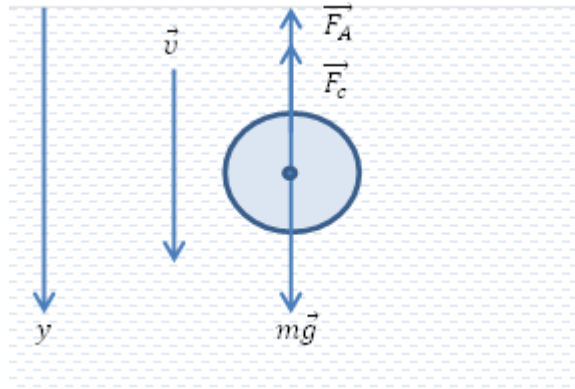


Рисунок 2. Механизм падения шарика в вязкой жидкости.

Кроме того, на падающий шарик действует сила тяжести $m\vec{g}$, направленная вниз и выталкивающая сила \vec{F}_A , направленная вверх. Запишем уравнение движения шарика в проекциях на ось ОУ:

$$m \frac{\partial v}{\partial t} = mg - F_A - F_c \quad (7)$$

Решение уравнения (7) описывает характер движения шарика на всех участках падения. В начале движения скорость шарика v мала и силой F_c можно пренебречь, т.е. на начальном этапе шарик движется с ускорением

$$a = \frac{mg - F_A}{m}$$

По мере увеличения скорости возрастает сила сопротивления и ускорение уменьшается. При большом времени движения сила сопротивления уравновешивается равнодействующей сил $m\vec{g}$ и \vec{F}_A , и шарик будет двигаться равномерно с установившейся скоростью. Уравнение движения (7) в этом случае примет вид:

$$mg - F_A - F_c = 0 \quad (9)$$

или

$$\frac{4}{3}\pi g R^3 (\rho - \rho_{ж}) - 6\pi R v \eta = 0,$$

где сила тяжести $mg = \rho V g = \frac{4}{3}\pi \rho R^3 g$, сила Архимеда $F_A = m_{ж} g = \frac{4}{3}\pi \rho_{ж} R^3 g$. Отсюда находим

$$\eta = \frac{2(\rho - \rho_{ж})R^2 g}{9v} \quad (10)$$

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Установка представляет собой широкий стеклянный цилиндрический сосуд 1, наполненный исследуемой жидкостью (рис. 3). На сосуд надеты два резиновых кольца 2, расположенных друг от друга на расстоянии l .

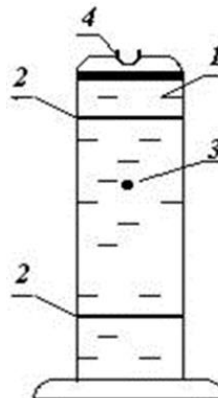


Рисунок 3. Схема установки.

Плотность исследуемой жидкости (глицерина) $\rho_{\text{ж}} = 1,26 \cdot 10^3$ кг/м³, плотность материала шарика (железо) $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³.

2. Определить средние арифметические значения величин $\langle D \rangle$, $\langle t \rangle$ и $\langle l \rangle$ по следующей формуле и внести в таблицу 2:

$$\langle X \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{10} X_i}{10},$$

где X_i – значение физической величины в i -том опыте.

3. Рассчитать коэффициент вязкости $\langle \eta \rangle$ по формуле (13) и внести полученные данные в таблицу 2.

$$\langle \eta \rangle = \frac{1}{18} \frac{(\rho - \rho_{\text{ж}}) \langle D \rangle^2 g \langle t \rangle}{\langle l \rangle} \quad (13)$$

4. Рассчитать относительную погрешность измерений по формуле:

$$\Delta \eta = \langle \eta \rangle \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial D}\right)^2 \Delta D^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial l}\right)^2 \Delta l^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial t}\right)^2 \Delta t^2},$$

где $\frac{\partial \eta}{\partial D}$, $\frac{\partial \eta}{\partial l}$, $\frac{\partial \eta}{\partial t}$ – частные производные от η по D , l , t , взятые при условии постоянства всех остальных величин.

$$\frac{\partial \eta}{\partial D} = \frac{1}{9} \frac{(\rho - \rho_{\text{ж}}) \langle D \rangle g \langle t \rangle}{\langle l \rangle},$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{18} \frac{(\rho - \rho_{\text{ж}}) \langle D \rangle^2 g}{\langle l \rangle},$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial l} = -\frac{1}{18} \frac{(\rho - \rho_{\text{ж}}) \langle D \rangle^2 g \langle t \rangle}{\langle l \rangle^2}.$$

ΔD , Δl , Δt – абсолютные погрешности прямых измерений диаметра шарика D , расстояния l и времени t , рассчитанные по формуле Стьюдента:

$$\Delta X = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \langle X \rangle)^2}{n(n-1)}}$$

$t_{\alpha, n}$ – коэффициент Стьюдента, табличное значение.

5. Сравнить полученный результат с табличным значением коэффициента динамической вязкости глицерина при соответствующей температуре (таблица 3). Температуру воздуха (а соответственно и глицерина) посмотрите на термометре, находящемся в лаборатории.

6. Составить **вывод** к лабораторной работе, в котором отразить полученный результат в формате

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta \eta \text{ [единица измерения]}.$$

7. Сравнить полученный результат с таблицей 3.

Таблица 3. Коэффициенты динамической вязкости глицерина при различных температурах.

$t, ^\circ\text{C}$	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$	1,74	1,62	1,48	1,35	1,23	1,124	1,024	0,934	0,85	0,78