

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ
ПАДАЮЩЕГО ШАРИКА**

*Методические указания к лабораторной работе № 4 по курсу «Физика»
для студентов всех форм обучения всех направлений подготовки*

Екатеринбург
УрФУ
2017

УДК 535.41 (075.08)

Составители: В. Б. Демин, В. П. Левченко

Научный редактор – проф., д-р физ.-мат. наук А. А. Повзнер

Определение коэффициента вязкости жидкости методом падающего шарика : методические указания к лабораторной работе № 4 / сост. В. Б. Демин, В. П. Левченко. – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – 20 с.

Теоретическая часть методических указаний содержит общие сведения о вязкости в газах и жидкостях. Экспериментальная часть включает описание лабораторной установки, конкретных задач, методик измерений и обработки результатов. Также приведена форма отчета.

Подготовлено кафедрой физики

© Уральский федеральный
университет, 2017

1. НЕКОТОРЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Простая теория вязкости, развитая для газов и основанная на предположении, что вязкость обусловлена переносом в газе импульса направленного движения, является несправедливой для жидкостей. Действительно, согласно вышеупомянутой теории, вязкость газов растет пропорционально $T^{1/2}$, в то время как вязкость жидкости уменьшается с ростом температуры. Такое несоответствие связано с различным характером движения молекул газа и жидкости. В случае газа молекулы большую часть времени движутся равномерно и прямолинейно, так что количество движения их остается постоянным, при таких условиях сглаживание различия в макроскопическом движении соседних слоев (или элементов объема) можно трактовать как результат перемешивания молекул с различными макроскопическими скоростями. В случае жидкости количество движения атомов или молекул не остается постоянным даже приблизительно (как в случае газов), но быстро меняется в связи с колебаниями частицы около положения равновесия. Поэтому для объяснения вязкости жидкости необходима другая модель, учитывающая наличие значительных сил притяжения и отталкивания, имеющих место в жидкости.

Потенциальная энергия одного из атомов при перемещении его из исходного положения в новое должна изменяться по кривой, представленной на рис. 1, т. е. кривой, имеющей вид «потенциального барьера», отделяющего друг от друга две эквивалентные потенциальные ямы. Атом или молекула, находящиеся в равновесном положении A (либо B), участвуют в колебательном движении. Переход молекул из одного равновесного состояния (A) в другое (B) можно рассматривать как последовательность двух актов: переход («испарение») молекулы из исходного положения (A) в промежуточное (C), связанное с увеличением свободной энергии всего комплекса (самой молекулы и ее окружения) на величину ΔW – энергию активации, и «конденсация» из

промежуточного положения (*C*) в новое положение равновесия (*B*), с практически мгновенным сбрасыванием избы – точной кинетической энергии, в которую при этом переходит энергия активации.

Следует отметить, что в данной модели предполагается, что движение каждой молекулы происходит таким образом, как если бы остальные молекулы не принимали в этом движении никакого участия. Тепловое движение молекул в жидкости сводится в основном к гармоническим колебаниям частиц около

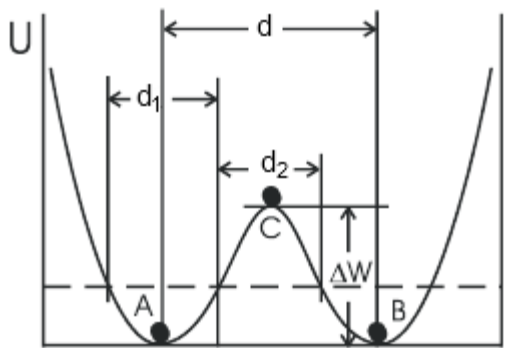


Рис. 1. Потенциальная энергия взаимодействия атомов (молекул) жидкости

положения равновесия, которые имеют временный характер. Поколебавшись около одного и того же положения равновесия в течение некоторого времени (времени «оседлой жизни»), рассматриваемая молекула может перескочить в новое положение равновесия, расположенное по соседству на расстоянии того же порядка величины, что и расстояние между

соседними атомами. Согласно распределению Больцмана, вероятность обнаружить молекулу в одном из состояний – *A* или *B* – связана с вероятностью P_2 обнаружить ее в промежуточном состоянии *C* соотношением:

$$\frac{P_2}{P_1} = e^{-\frac{\Delta W}{kT}}. \quad (1)$$

А так как вероятность какого-либо состояния пропорциональна длительности времени, проводимого молекулой в этом состоянии, то соотношение (1) может быть заменено соотношением соответствующих времен:

$$\frac{t_2}{t_1} \sim e^{-\frac{\Delta W}{kT}}. \quad (2)$$

Здесь t_1 является мерой времени, необходимого для накопления молекулой кинетической энергии, равной или большей dW , t_2 – мера времени, достаточного для возвращения кинетической энергии атома к средней норме, соответствующей заданной температуре тела. Так как средняя кинетическая энергия равна $E = \frac{kT}{2}$ (в нашем одномерном случае), то скорость молекулы при переходе через барьер:

$$v \approx \sqrt{\frac{kT}{m}} \quad (3)$$

Отсюда следует, что время t_2 , необходимое для перехода из одной ямы в другую:

$$t_2 = \frac{d}{\sqrt{\frac{kT}{m}}}. \quad (4)$$

Здесь d – ширина барьера (см. рис. 1).

Средняя продолжительность времени, в течение которого молекула остается связанной с некоторым положением равновесия, выражается формулой:

$$t_1 \sim t_2 \cdot e^{\frac{dW}{kT}} \quad (5)$$

(получается из формулы (2) подстановкой (4)).

Таким образом, среднее время оседлой жизни $\tau \sim e^{\frac{dW}{kT}}$. Само собой разумеется, что фактическое «время жизни» молекул может быть больше или меньше среднего значения.

При повышении температуры энергия колебательного движения молекул возрастает, уменьшается время оседлости и коэффициент вязкости резко уменьшается. Зависимость коэффициента вязкости η от абсолютной температуры T для жидкости выражается экспоненциальным законом:

$$\eta = A \cdot e^{\frac{\Delta W}{kT}}, \quad (6)$$

где A – коэффициент, зависящий от рода жидкости; k – постоянная Больцмана; ΔW – энергия активации, т. е. та энергия, которую необходимо сообщить молекуле, чтобы она могла преодолеть связь с соседними молекулами и переместиться в новое положение равновесия. Из формулы (6) видно, что с ростом температуры жидкости коэффициент вязкости уменьшается. Особенно заметен этот эффект в органических и минеральных маслах, для которых повышение или понижение температуры всего на несколько десятков градусов приводит к изменению вязкости в несколько раз. Вот почему существуют летние и зимние сорта моторных масел, которые должны иметь примерно одинаковые технические характеристики, в первую очередь вязкость, при различных температурах. При расчете тысячекilометровых нефтепроводов коэффициент вязкости нефти является главной характеристикой, определяющей энергозатраты на ее перекачку, т.е. работу насосов и моторов по преодолению сил внутреннего трения при движении жидкости. В Антарктиде при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (213 Кельвинах) дизельное топливо можно вообще рубить топором, как дрова. Кстати, обычное оконное стекло – это тоже жидкость, только с очень большим коэффициентом вязкости, при нагревании на несколько сотен градусов оно становится легко текучей жидкостью.

Подобных примеров можно привести довольно много. Вот почему коэффициент вязкости жидкости (и газов, и твердых тел, например металлов при их пластической деформации) является ее важнейшей характеристикой.

ΔW – энергия активации, не является постоянной величиной, а уменьшается с повышением температуры вследствие теплового расширения жидкости при постоянном давлении. Наличие растворителя (другой жидкости) также изменяет высоту барьера ΔW (энергию активации) и тем самым изменяет вязкость исходной жидкости.

Существует несколько способов измерения вязкости жидкости. В промышленности широко применяются приборы, называемые вискозиметрами, в которых вязкость определяется по объему вытекающей жидкости из стандартного отверстия за определенное время (метод Пуазейля). Можно измерять вязкость ротационным методом – методом коаксиальных цилиндров и некоторыми другими способами. Однако в лабораторных условиях вязкость жидкости принято определять методом падающего шарика – методом Стокса, относительно простым и довольно точным, хотя и применимым только для прозрачных жидкостей.

2. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

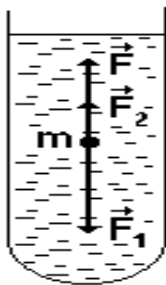


Рис. 2. Схема метода Стокса

Метод Стокса основан на измерении скорости шарика, падающего в исследуемой жидкости (рис. 2).

Шарик изготовлен из материала, хорошо смачиваемого жидкостью, поэтому к его поверхности «прилипает» концентрический слой жидкости, неподвижный относительно шарика. Между

этим слоем, движущимся со скоростью шарика, и остальной жидкостью возникает сила внутреннего трения, направленная против скорости шарика, т. е. вверх.

Как показал Стокс, сила, действующая на шарик малого размера, прямо пропорциональна скорости его падения v , радиусу шарика r и коэффициенту вязкости η :

$$F = 6\pi r \eta v \quad (7)$$

Кроме того, на движущийся шарик действуют еще две силы: сила тяжести

$F_1 = mg = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho_1 g$, где $\frac{1}{6} \pi d^3$ – объем шарика (d – его диаметр), и выталкивающая

сила Архимеда, $F_2 = \frac{1}{6}\pi d^3 \rho_2 g$, направленная вверх. В последних выражениях ρ_1 и ρ_2 – плотности материала шарика и жидкости соответственно.

В начале падения скорость шарика, а вместе с ней и сила внутреннего трения, которая пропорциональна скорости, быстро возрастают. Затем наступает состояние, когда равнодействующая всех сил, действующих на шарик, станет равной нулю, и шарик спустя некоторое время будет падать равномерно с постоянной скоростью v . Переходя к скалярным величинам, получаем $F_1 = F_2 + F$ или

$$\frac{1}{6}\pi d^3 \rho_1 g = \frac{1}{6}\pi d^3 \rho_2 g + 6\pi\eta r v \quad (8)$$

Тогда

$$\eta = \frac{d^2(\rho_1 - \rho_2)g}{18v}, \quad (9)$$

где d – диаметр шарика;

ρ_1 – плотность материала, из которого изготовлен шарик;

ρ_2 – плотность жидкости;

v – скорость установившегося (равномерного) движения шариков в жидкости;

g – ускорение свободного падения.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Для определения скорости падения шарика в лаборатории применяется установка, схематически изображенная на рис. 3.

Она состоит из стойки 1, на которой укреплен высокий стеклянный цилиндрический сосуд 2, наполненный доверху испытуемой жидкостью, в данном случае техническим глицерином. На цилиндр нанесены метки через

каждые 10 см. Стойка снабжена четырьмя винтами, с помощью которых стеклянный цилиндр с жидкостью устанавливается вертикально.

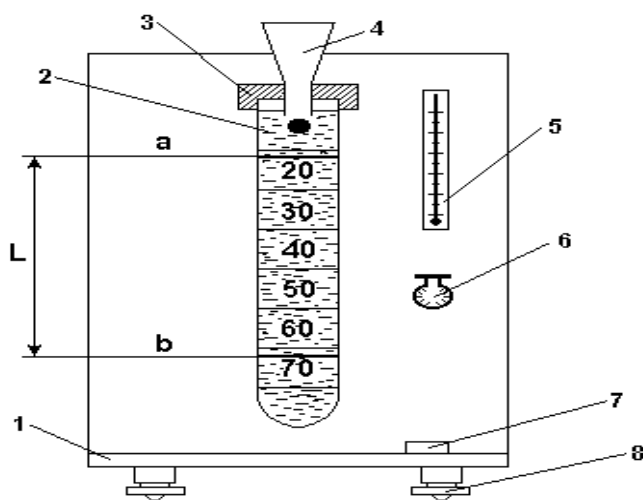


Рис. 3. Эскиз установки для определения вязкости глицерина

Последнее необходимо для того, чтобы падающий шарик двигался приблизительно вдоль оси цилиндра. Зная расстояние L между метками и время, в течение которого шарик проходит это расстояние при его *равномерном* движении, найдем скорость его падения:

$$v = \frac{L}{\tau}. \quad (10)$$

Скорость падения шарика может быть определена графически. Для этого измеряют интервалы времени прохождения шариком расстояний между нулевой (стартовой) меткой A , находящейся на цилиндре 2, и меткой B (финишной). Шарик, имея нулевую начальную скорость, будет двигаться с некоторым ускорением, по мере увеличения скорости шарика будет возрастать сила трения, которая пропорциональна скорости, и спустя десятые доли секунды движение шарика станет равномерным. Время перехода к равномерному движению зависит от размера шарика и вязкости жидкости.

Подставляя значение скорости в уравнение (5), окончательно получим формулу для определения коэффициента динамической вязкости:

$$\eta = \frac{d^2(\rho_1 - \rho_2)g}{18\nu}. \quad (11)$$

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

4.1. Измерение диаметров шариков. Диаметр d_i шариков (5–7 штук) измеряют микрометром, шарики следует брать примерно одинакового размера, например из шариковых подшипников. Результаты измерений заносят в таблицу и производят стандартную статистическую обработку результатов измерений.

Таблица 1

Измерение диаметров шариков

d_i , мм	$(d_i - \langle d \rangle)$, мм	$(d_i - \langle d \rangle)^2$, мм ²

Средний диаметр шариков $\langle d \rangle = \dots$ мм.

$$\sum (d_i - \langle d \rangle)^2 = \dots \text{ мм}^2.$$

Среднеквадратичное отклонение: $S_{\langle d \rangle} = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \langle d \rangle)^2}{n(n-1)}} = \dots$ мм,

где n – число измерений (число шариков).

Случайная абсолютная погрешность измерения:

$$\varepsilon_d = t_{P,n} S_{<d>} = \dots \text{ мм},$$

где t – коэффициент Стьюдента (берется из таблицы).

Предел неисключенной систематической погрешности:

$$\theta_d = \theta_{\text{осн}} = \dots \text{ мм}.$$

Абсолютная погрешность измерения:

$$\Delta_d = \sqrt{\varepsilon_d^2 + \theta_d^2} = \dots \text{ мм}.$$

4.2. Измерение массы шариков. Массу шариков определяют с помощью аналитических или электронных весов. Результаты наблюдений заносят в таблицу и, аналогично вышеприведенной методике, рассчитывают средние величины и погрешности.

4.3. Измерение времени падения шариков. Шарик бросают в жидкость и засекают секундомером время движения шарика между двумя рисками. При наблюдении за движением шарика (в момент пуска и остановки секундомера) глаз нужно расположить на такой высоте, чтобы метки, нанесенные на стойку, и продолжение их изображения, видимое через цилиндр с жидкостью, давали прямую, а не изогнутую линию.

Поскольку довольно быстро устанавливается постоянная скорость падения шариков, то с достаточной степенью точности можно с помощью секундомера измерять время падения между двумя не слишком близко расположенными метками. Результаты измерения времени следует также заносить в таблицу наблюдений и рассчитывать средние величины и погрешности.

4.4. Расчет плотности материала шариков. Зная средние диаметр и массу шариков, рассчитывают плотность материала шарика ρ_1 по формуле:

$$\rho_1 = \frac{6m}{\pi d^3},$$

где m – средняя масса шариков; d – средний диаметр шариков.

По вышеприведенным данным производят расчет границы абсолютной погрешности результата определения плотности материала шариков:

$$\Delta_{\rho 1} = \rho_1 \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta_m}{m}\right)^2 + \left(3\frac{\Delta_d}{d}\right)^2} = \dots \text{ кг/м}^3.$$

4.5. Измерение плотности глицерина. Плотность ρ_2 жидкости определяют с помощью ареометра, который погружен в небольшой цилиндрический сосуд, наполненный той же жидкостью, что и сосуд Стокса. При этом нужно следить, чтобы ареометр находился в центре сосуда, а не вблизи его стенок.

4.6. Температуру глицерина определяют термометром.

4.7. Расчет вязкости жидкости:

$$\eta = \frac{d^2(\rho_1 - \rho_2)g}{18\nu} = \dots \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

4.8. Погрешность измерений. Расчет границы относительной погрешности результата измерения коэффициента вязкости жидкости определяется по следующей формуле:

$$\gamma = \frac{\Delta_\eta}{\langle \eta \rangle} = \sqrt{\left(2\frac{\Delta_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\rho 1}}{\rho_1 - \rho_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\rho 2}}{\rho_1 - \rho_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_\tau}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_L}{L}\right)^2} = \dots$$

Расчет границы абсолютной погрешности результата измерения коэффициента вязкости

$$\Delta_\eta = \gamma \langle \eta \rangle = \pm \dots \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

4.9. Окончательный результат измерения коэффициента вязкости жидкости при температуре $t = \dots$ °С:

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta_\eta = (\dots \pm \dots) \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad P = 0,95.$$

4.10. Сделать выводы по работе (сравнить полученный результат с табличным значением, проанализировать ошибки измерений, указать пути

повышения точности измерений и т. п.). Оформить отчет и сдать его преподавателю для проверки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется вязкостью?
2. В чем различие механизма вязкости в жидкости и газе?
3. Каков физический смысл коэффициента вязкости?
4. В каких единицах измеряется коэффициент вязкости?
5. Как изменяется с температурой коэффициент вязкости?
6. В чем суть метода Стокса?
7. Как выводится расчетная формула для вычисления коэффициента вязкости по методу Стокса?
8. Как определить скорость падения шарика?
9. Какие силы действуют на шарик при его движении в жидкости?
10. Как определяется плотность жидкости и материала шарика?

ПРИЛОЖЕНИЕ

УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра физики

О Т Ч Е Т

по лабораторной работе №4

**«Определение коэффициента вязкости технического глицерина
методом падающего шарика»**

Студент(ка) _____

Группа _____

Преподаватель _____

Дата _____

1. Основная расчетная формула:

$$\eta = \frac{\langle d \rangle^2 (\rho_1 - \rho_2) g}{18\nu},$$

где $\rho_1 = \frac{6\langle m \rangle}{\pi\langle d \rangle^3}$ — _____ ;

ρ_2 — _____ ;

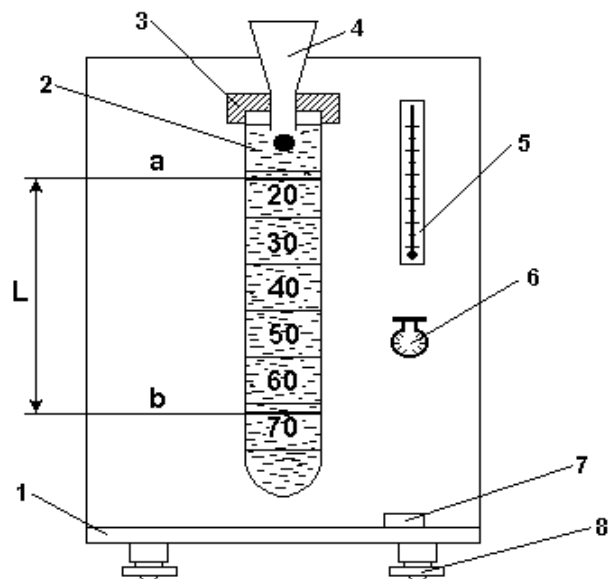
$\langle d \rangle$ — _____ ;

g — _____ ;

$\langle m \rangle$ — _____ ;

ν — _____

2. Эскиз установки.



3. Средства измерений и их характеристики.

Таблица 1

Наименование средства измерения и его номер	Предел измерений или номинальное значение шкалы	Цена деления шкалы	Предел основной погрешности
Цифровые весы			
Микрометр Шкалы: линейная круговая			
Секундомер			
Металлическая линейка			
Ареометр			
Термометр			

Установка № ... для определения коэффициента вязкости.

4. Результаты измерений

4.1. Измерение диаметров шариков

Таблица 2

d_i , мм	$(d_i - \langle d \rangle)$, мм	$(d_i - \langle d \rangle)^2$, мм ²

$$\langle d \rangle = \dots \text{ мм,}$$

$$\sum (d_i - \langle d \rangle)^2 = \dots \text{ мм}^2.$$

$$\text{Среднеквадратичное отклонение: } S_{\langle d \rangle} = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \langle d \rangle)^2}{n(n-1)}} = \dots \text{ мм;}$$

$$\varepsilon_d = t_{P,n} \cdot S_{\langle d \rangle} = \dots \text{ мм;}$$

$$\theta_d = \theta_{\text{очн}} = \dots \text{ мм;}$$

$$\Delta_d = \sqrt{\varepsilon_d^2 + \theta_d^2} = \dots \text{ мм.} \quad P = 0,95.$$

4.2. Измерение массы шариков

Таблица 3

m_i, Γ	$(m_i - \langle m \rangle), \Gamma$	$(m_i - \langle m \rangle)^2, \Gamma^2$

$$\langle m \rangle = \dots \quad \Gamma; \quad \sum (m_i - \langle m \rangle)^2 = \dots \quad \Gamma^2;$$

$$S_{\langle m \rangle} = \sqrt{\frac{\sum (m_i - \langle m \rangle)^2}{n(n-1)}} = \dots \quad \Gamma;$$

$$\varepsilon_m = t_{p,n} S_{\langle m \rangle} = \dots \quad \Gamma;$$

$$\theta_m = \theta_{\text{очн}} = \dots \quad \Gamma;$$

$$\Delta m = \sqrt{\varepsilon_m^2 + \theta_m^2} = \dots \quad \Gamma. \quad P = 0,95.$$

4.3. Измерение времени падения шариков¹.

Таблица 4

$\tau_i, \text{с}$	$(\tau_i - \langle \tau \rangle), \text{с}$	$(\tau_i - \langle \tau \rangle)^2, \text{с}^2$

$$\langle \tau \rangle = \dots \quad \text{с}; \quad \sum (\tau_i - \langle \tau \rangle)^2 = \dots \quad \text{с}^2;$$

$$S_{\langle \tau \rangle} = \sqrt{\frac{\sum (\tau_i - \langle \tau \rangle)^2}{n(n-1)}} = \dots \quad \text{с};$$

$$\varepsilon_\tau = t_{p,n} S_{\langle \tau \rangle} = \dots \quad \text{с};$$

¹по усмотрению преподавателя, τ_i – время движения шарика между какими-либо двумя определенными метками при его равномерном движении

$$\theta_{\tau} = \theta_{\text{очн}} = \dots \quad \text{с};$$

$$\Delta_{\tau} = \sqrt{\theta_{\tau}^2 + \varepsilon_{\tau}^2} = \dots \quad \text{с.} \quad P = 0,95.$$

4.4. Измерение расстояния между метками:

$$L = \dots \quad \text{мм}, \quad \Delta_L = \theta_L = 1,1\sqrt{\theta_{\text{очн}}^2 + \theta_{\text{отс}}^2} = \dots \quad \text{мм}, \quad P = 0,95.$$

4.5. Определение скорости установившегося движения шарика:

$$v = L / \langle \tau \rangle = \dots \quad \text{м/с.}$$

4.6. Измерение плотности жидкости:

$$\rho_2 = \dots \quad \text{г/см}^3 = \dots \quad \text{кг/м}^3$$

$$\Delta_{\rho_2} = \theta_{\rho_2} = 1,1\sqrt{\theta_{\text{очн}}^2 + \theta_{\text{отс}}^2} = \dots \quad \text{г/см}^3, \quad P = 0,95.$$

4.7. Измерение температуры жидкости:

$$t = \dots \quad \text{°C.}$$

$$\Delta_t = \theta_t = 1,1\sqrt{\theta_{\text{очн}}^2 + \theta_{\text{отс}}^2} = \dots \quad \text{°C.}$$

5. Расчет искомой величины:

5.1. Расчет плотности материала шариков:

$$\rho_1 = \frac{6\langle m \rangle}{\pi\langle d \rangle^3} = \dots \quad \text{кг/м}^3.$$

5.2. Расчет вязкости жидкости:

$$\eta = \frac{\langle d \rangle^2 (\rho_1 - \rho_2) g}{18\nu} = \dots \quad \text{Па}\cdot\text{с.}$$

6. Расчет границ погрешностей:

6.1. Расчет границы абсолютной погрешности результата определения плотности материала шариков:

$$\Delta_{\rho_1} = \rho_1 \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta_m}{m}\right)^2 + \left(3\frac{\Delta_d}{d}\right)^2} = \dots \quad \text{кг/м}^3.$$

6.2. Расчет границы относительной погрешности результата определения коэффициента вязкости жидкости

$$\gamma = \frac{\Delta_\eta}{\langle \eta \rangle} = \sqrt{\left(2 \frac{\Delta_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\rho 1}}{\rho_1 - \rho_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\rho 2}}{\rho_1 - \rho_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_\tau}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_L}{L}\right)^2} = \dots$$

$$\gamma = \sqrt{\dots} = \dots$$

6.3. Расчет границы абсолютной погрешности результата измерения коэффициента вязкости:

$$\Delta_\eta = \gamma \langle \eta \rangle = \pm \dots \text{ Па}\cdot\text{с.}$$

7. Окончательный результат измерения коэффициента вязкости жидкости при температуре $t = \dots$ °С:

$$\eta = (\langle \eta \rangle \pm \Delta_\eta) = (\dots \pm \dots) \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad P = 0,95.$$

8. Выводы.