

М В Ч С С О Р С Ф С Р

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
государственный университет им. Н.И.Лобачевского

РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ФИЗИКИ

12/49

ОБНАРУЖЕНИЕ ДИСКРЕТНОСТИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ
МЕТОДОМ МИЛЛИКЕНА

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ГОРЬКИЙ 1977 г.

В В Е Д Е Н И Е

1. Историческая справка.

Представление о дискретности электрических зарядов является логическим следствием атомной структуры вещества и законов электролиза, открытых Фарадеем еще в 1833 году. Но четкая формулировка этого следствия была сделана впервые только в 1874 году английским физиком Стонеем и затем независимо от него известным немецким ученым Гельмгольцем в лекции памяти Фарадея в 1881 году [1, § 94].

Стоней впервые предложил наименование электрон для наименьшей порции или атома электричества, т.е. для того, что называется теперь элементарным электрическим зарядом $\pm e$. Открытие носителя заряда $-e$, как элементарной частицы, относят к 1897 году и связывают прежде всего с работами Др. Дж. Томсона по изучению свойств катодных лучей [1, § 89; 2, стр. 51].

Первые попытки измерения e , предпринятые в 1896-1908 г.г. Таунсендом, Др. Дж. Томсоном и Бильсоном [2, 3], основывались на определении масс, скорости опускания и полного заряда облачка ие большого числа водяных капель сконденсированных на ионах воздуха. Эти сложные измерения давали лишь оценку среднего заряда иона с погрешностью от 30 до 100%. Положение изменилось лишь после того, как Милликен (1868-1953) [4, стр. 105] разработал в 1906-1909 г.г. новый оригинальный метод [3] измерения зарядов уединенных масляных капель движущихся в электрическом поле. Этот метод позволил Милликену получить в 1909 г. впервые значение e близкое к современному ($e = 4,80274 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЕ) и уменьшить ошибку измерения на три порядка, до 0,2%. Позднее были найдены еще более точные методы определения e , но метод Милликена навсегда сохранит большое принципиальное значение, так как он даёт возможность обнаружить дискретность электрических зарядов независимо от каких либо модельных представлений о строении вещества.

Впуск содержит описание модернизированной лабораторной работы [6] физического практикума ГГУ. В новой постановке работа доступна студентам первых курсов физических факультетов и предназначена прежде всего для первого курса радиофизического факультета ГГУ. Автор модернизации и нового текста описания П. Б. Иванов.

Редактор выпуска Ю. М. Сорокин

Метод Милликена состоит в попеременном измерении скоростей равномерного падения v_g и подъема v_e многократно переаряжаемой масляной капли в гравитационном ($\vec{g} = const$) и однородном электрическом ($|\vec{E}| = const$) поле в вязкой газовой среде с постоянным давлением P . Полная электрический заряд капли q вычисляется по однократно измеренным значениям v_g и v_e . Элементарный заряд e находят как наибольший общий делитель всех случайных значений зарядов q_k и изменениям заряда Δq_k , полученных при многократных переарядках капли.

3. Цель работы.

1) Познакомиться с методом Милликена, 2) получить экспериментальное доказательство дискретности электрических зарядов, 3) определить величину элементарного заряда e , 4) познакомиться с приемами применения теории случайных ошибок для выбора оптимальных условий эксперимента.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Связь заряда капли со скоростями её падения и подъема. Второй закон Ньютона для падения и подъема шаровидной капли радиуса a в воздухе записывается, без учета силы Архимеда, в

$$m \frac{dv}{dt} = mg - 6\pi\eta av_g, \quad (1.1)$$

$$m \frac{dv_e}{dt} = mg + 6\pi\eta av_e - |qE|, \quad (1.2)$$

где $-6\pi\eta av$ - Стоксава сила вязкого трения, η^* - эффективная вязкость воздуха:

$$\eta^* = \frac{\eta}{1 + \frac{a}{pa}} \quad (1.3)$$

и $\eta = 0,17 \cdot 10^{-4}$ ск.рг.ст. x см.

Введение η^* вместо макроскопического коэффициента вязкости η введено тем, что общная формула Стокса [5, стр. 496]: $F_p = 6\pi\eta av$ даёт завышенные значения сил трения для очень маленьких капель, когда отношение λ - длины свободного пробега молекул воздуха - к радиусу a уже нельзя полагать равным нулю. Разлагая скорость v в ряд по степеням $\frac{a}{\lambda}$ (при $0 < \frac{a}{\lambda} \ll 1$), можно показать необходимость введения эффективной вязкости (1.3) вместо η [6, стр. 8-10 и 7, стр. 16-18] *.

Так как установление постоянной скорости малых масляных капель в воздухе происходит практически мгновенно, то из (1.1) и (1.2) при $v_g = const$ и $v_e = const$, получаем:

$$q = \frac{mg}{E} (v_g + v_e) \quad (1.4)$$

Капля из вакуумного масла (с плотностью $\rho = 1,002 \frac{г}{см^3}$) в ходе эксперимента практически не испаряется и её масса, а следовательно и скорость падения v_g от наблюдения к наблюдению не меняется. Поэтому, если в промежутке между последовательными измерениями скоростей подъема v_{e_i} и $v_{e_{i+1}}$, изменить заряд капли на величину $\Delta q_i = q_i - q_{i+1} = \pm \Delta q_i$, то это изменение будет равно:

$$\Delta q_i = \frac{mg}{E} (v_{e_i} - v_{e_{i+1}}) \quad (1.5)$$

Соотношения (1.4) и (1.5) лежат в основе метода Милликена.

2. Обнаружение дискретности электрических зарядов.

Вследствие существования элементарного заряда e возможные значения q и Δq могут быть лишь членами последовательности:

$$q, \Delta q = 0, \pm e, \pm 2e, \dots \pm ne, \dots \quad (2.1)$$

* Это уточнение закона Стокса и определение числового значения константы "6" было сделано Милликоном в результате прецизионных измерений, в 1909-1913 г.г.

9.
 Из сравнения (1.4) и (1.5) с (2.1) видно, что суммы $(V_g + V_E)_i$ и разности $V_E - V_g$ могут принимать лишь дискретные значения пропорциональные целым числам. Таким образом, пропорциональность фактически измеренных значений сумм $(V_g + V_E)_i$ и разностей $V_E - V_g$ целым числам является экспериментальным доказательством дискретности электрических зарядов.

На практике для определения скоростей V_g и V_E измеряют время на падения и подъема капли t_g и t_E на одну и ту же фиксированную высоту наблюдения h . Обозначив

$$(t_g + t_E)_i = \Sigma_i \quad \text{и} \quad t_E - t_g = \Delta_i$$

получим:

$$(V_g + V_E)_i = h \Sigma_i \quad \text{и} \quad V_E - V_g = h \Delta_i$$

Использование сумм и разностей обратных времен упрощает обработку измерений и придает основным формулам (1.4) и (1.5) более компактный вид:

$$q_i = \frac{mg h}{E V_g} \Sigma_i \quad (2.2) \quad \text{и} \quad \Delta q_i = \frac{mg h}{E V_g} \Delta_i \quad (2.3)$$

Из сопоставления формул (2.2) и (2.3) с (2.1) ясно, что минимальные значения Σ_i и Δ_i одинаковы и регистрируются в тех случаях, в которых на капле есть только один элементарный заряд $+e$ или $-e$, или в тех парах последовательных измерений t_{E_i} и t_{g_i} при которых $\Delta q_i = \pm e$ или $\Delta \Gamma = \pm 1$. Следовательно, элементный электрический заряд можно вычислить по формуле

$$e = \frac{mg h}{E \cdot V_g} \cdot \sum_{min} \frac{mg h}{E \cdot V_g} \cdot \Delta \Gamma_i \quad (2.4)$$

в которой \sum_{min} и $\Delta \Gamma_{min}$ - средние значения Σ_i и Δ_i . Выявить дискретность q и найти \sum_{min} и $\Delta \Gamma_{min}$ проще всего графическим способом. При этом найденные из опыта значения Σ_i и Δ_i откладываются в виде точек на общей числовой оси и значение или $\Delta \Gamma_{min}$ находят, как средний минимальный интервал между

7.

оседними "центрами" сгущения экспериментальных точек или как расстояние первого "центра" сгущения от начала отсчета на числовой оси.

3. Рабочие формулы для вычисления q , Δq и e .

Общий постоянный множитель $F = \frac{mg h}{E V_g}$ в формулах (2.2) - (2.4) необходимо вращать через непосредственно измеренные и известные постоянные величины.

Так как напряжение U между пластинами конденсатора отсчитывается по шкале вольтметра в вольтах, а заряд q и другие используемые здесь величины удобно вращать в единицах системы СГСЕ, то напряженность поля E следует исключить из F с помощью соотношения $E = \frac{U}{300H}$, где H расстояние между пластинами. Из условия

$$\text{вня равномерного падения капли:} \quad mg = e \pi r^2 \alpha V_g \quad (3.1)$$

$$\text{находим} \quad \frac{mg}{V_g} = e \pi r^2 \alpha \quad \text{Следовательно} \quad F = \frac{300H \cdot e \pi r^2 \alpha h}{V_g} \quad (3.2)$$

$$\text{Подставив в (3.1)} \quad V_g = h t_g \quad \text{и} \quad m = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (3.3)$$

$$\text{получим} \quad \alpha = (9 \rho^2 h)^{\frac{1}{2}} \cdot (2 \rho g t_g)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

С учетом (3.3) и (1.3) фактор F преобразуется к виду: $F = \frac{300 B \alpha}{U \sqrt{t_g}}$, где $B = 9 \pi \sqrt{2} H (\rho h)^{\frac{1}{2}} (\rho g)^{-\frac{1}{2}} = const$

$$\text{и} \quad \alpha = (1 + \frac{b}{\rho a})^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

Таким образом, формул (2.2)-(2.4) можно записать в виде:

$$q_i = \frac{300 B \alpha}{U \sqrt{t_g}} \Sigma_i \quad (3.6), \quad \Delta q_i = \frac{300 B \alpha}{U \sqrt{t_g}} \Delta_i \quad (3.7)$$

$$e = \frac{300 B \alpha}{U \sqrt{t_g}} \cdot \sum_{min} \quad (3.8)$$

Условие (3.1) с учетом соотношений (3.2) и (1.3) приводит к квадратному уравнению относительно радиуса a :

$$a^2 (1 + \frac{b}{\rho a}) = \frac{9 \rho h}{2 \rho g t_g}$$

$$a = \sqrt{\frac{g^2}{2g^2g} + \frac{g^2}{4p^2}} - \frac{g}{2p} \quad (3.9)$$

При нахождении безразмерного поправочного множителя a , содержащего малую величину $\frac{g}{p}$ можно вчислять радиус капли по приближенной формуле

$$a = \sqrt{\frac{2g^2k}{2g^2g}} \quad (3.10)$$

При этом ошибка будет тем меньше, чем крупнее капля, или чем ближе величина отношения $\frac{g}{p} = \frac{r}{p}$ к нулю.

4. Условие обнаружения дискретности.

Истинные значения заряда капли могут быть лишь членами последовательности (2.1). Каждое фактически измеренное значение заряда q содержит некоторую случайную ошибку $\Delta q^{сл}$. Чтобы дискретность не потеряла в случайных ошибках, средняя (по модулю) случайная погрешность $|\Delta q^{сл}|$ должна быть меньше половины интервала между соседними "центрами" сгущения значений q , на числовой оси q

$$(4.1)$$

$$(4.2)$$

$$(4.3)$$

Так как $q = ne$, где $n = 1, 2, 3$ и т.д., то другими словами, средняя случайная относительная погрешность измерения q должна быть тем меньше, чем большее число n элементарных зарядов на капле мы хотим определить безошибочно.

Неравенство (4.3) можно переписать также в виде условия ограничения "допустимое" (для обнаружения дискретности) число n в зависимости от среднего уровня относительных случайных ошибок:

$$n < \frac{1}{2 \frac{\Delta q^{сл}}{q}} \quad (4.4)$$

Таким образом, при выполнении работы следует наблюдать слабо заряженные капли, в той числе и такие, на которых есть лишь один элементарный заряд. Удерживать такие капли в поле наблюдения можно путем подбора достаточно высокого напряжения U между пластинами конденсатора.

5. Выбор оптимальных условий эксперимента.

Для уменьшения роли случайных ошибок необходимо прежде всего выбрать оптимальное время падения t_g^{opt} или, в соответствии с (3.10), оптимальный радиус капельки.

При измерении t_g и t_e наблюдатель производит пуск и остановку секундомера в моменты исчезновения изображения капли (в микроскопе) за одной из двух горизонтальных нитей, фиксирующих наименьшую высоту наблюдения h . При этом, каждый раз допускается случайная ошибка $\Delta t^{сл}$, выходящая в себя ошибку отсчета по шкале секундомера, личную ошибку наблюдателя и броуновскую ошибку, обусловленную действием беспорядочного теплового движения молекул воздуха на движение капли. Можно объединить ошибку отсчета с личной ошибкой и представить общую случайную ошибку $\Delta t^{сл}$ в виде суммы двух случайных ошибок разной природы - личной и броуновской:

$$\Delta t^{сл} = \Delta t^{л} + \Delta t^{б} \quad (5.1)$$

Средний квадрат общей случайной ошибки равен

$$(\Delta t^{сл})^2 = 2 \Delta t^{л} \Delta t^{б} + (\Delta t^{б})^2,$$

но так как личная и броуновская ошибки совершенно независимы и каждая из них одинаково часто принимает как положительная так и отрицательные значения, то среднее значение их произведений равно нулю: $\overline{\Delta t^{л} \Delta t^{б}} = \Delta t^{л} \cdot \overline{\Delta t^{б}} = 0$

Поэтому средний квадрат общей случайной ошибки равен сумме средних квадратов личной и броуновской ошибок:

$$\overline{(\Delta t^{сл})^2} = \overline{(\Delta t^{л})^2} + \overline{(\Delta t^{б})^2} \quad (5.2)$$

Соотношение (5.2) является частным примером очень важной общей теоремы, согласно которой при измерении сумм нескольких независимых физических величин складываются не сами погрешности, а их средние квадраты или дисперсии результатов независимых измерений.

Личная ошибка $\Delta t'$ зависит от индивидуальных особенностей наблюдателя. Для начала лучше её можно принять равной $(0,2 + 0,4) \text{ с}$. У опытного, тренированного экспериментатора она может не превосходить $0,1 \text{ с}$. Очень важно то, что абсолютная личная ошибка не зависит от длительности измеряемого интервала t и следовательно личная относительная погрешность $\delta t'_g$ тем меньше, чем меньше радиус капли. Броуновская абсолютная погрешность $\Delta t'_{br}$, напротив, возрастает с ростом t_g и становится особенно значительной у маленьких капелек с радиусом порядка микрона и меньше. Заметим, что при наблюдении в микроскоп очень маленьких капелек несущественные для нас горизонтальные броуновские смещения капли резко бросаются в глаза, а определяющие броуновскую ошибку вертикальные беспорядочные смещения неважны на фоне поступательного движения капли.

Броуновская ошибка $\Delta t'_{br}$ просто связана с полным вертикальным броуновским смещением $\Delta h'_{br}$, напомнимся за время наблюдения

$$\Delta t'_{br} = \frac{\Delta h'_{br}}{v}, \quad \text{откуда} \quad (\Delta h'_{br})^2 = \frac{(\Delta h'_{br})^2}{v^2} \quad (5.3)$$

Средний квадрат броуновского смещения капли $(\Delta h'_{br})^2$ можно вычислить по известной формуле Эйнштейна [8, стр. 213].

$$(\Delta h'_{br})^2 = \frac{kT}{3\pi\eta a} t, \quad (5.4)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-16} \frac{\text{эрг}}{\text{град К}}$ - постоянная Больцмана и T - абсолютная температура. Подставив в (5.4) $\frac{1}{a} = \sqrt{\frac{200}{9} \cdot t_g}$ (3.10) и заменив в (5.3) скорость v отношением h к t_g , найдем:

$$(\Delta t'_{br})^2 = \frac{\sqrt{200} \cdot kT}{9\pi\eta^{3/2} h^2} t_g \quad (5.5)$$

Разделив теперь левую и правую часть (5.2) на t_g^2 и используя

$$\frac{(\Delta t'_{br})^2}{t_g^2} = \frac{(\Delta t'_{br})^2}{t_g^2} + \frac{\sqrt{200} \cdot kT}{9\pi\eta^{3/2} h^2} \cdot t_g \quad (5.6)$$

Соотношение (5.6) выражает средний квадрат случайной относительной ошибки $(\delta t'_g)^2$, как функцию t_g . Оптимальное время падения $t_{g \text{ опт}}$ находят из условия минимума этой функции.

В нашей экспериментальной установке

$$(\text{при } h = 0,2 \text{ см, } \eta = 1,83 \cdot 10^{-4} \frac{\text{г}}{\text{см}\cdot\text{с}}, \rho = 1,002 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}; g = 981,2 \frac{\text{см}}{\text{с}^2},$$

$$\Delta t' = (0,2 - 0,3) \text{ с и при комнатных температурах)}$$

оптимальное время падения капли включено в пределах

$$56 \text{ с} \leq t_{g \text{ опт}} \leq 25 \text{ с} \quad (5.7)$$

Другим важным параметром, оптимизация которого необходима для успешного выполнения работы является напряжение U на конденсаторе. Оно должно быть достаточно большим, чтобы обеспечить падением слабо заряженных капелек ($n = 1$) с оптимальным временем падения $t_{g \text{ опт}}$.

В то же время оно должно быть не слишком высоким, чтобы при $n = 3,4,5 \dots$ время подъема $t_{\text{Э}}$ оставалось значительно больше средней случайной ошибки $|\Delta t'_{\text{Э}}|$. И, наконец, желательно, чтобы полное время серии измерений было не слишком велико. Удовлетворить этим, отчасти противоречивым требованиям, можно, выбрав $U_{\text{опт}}$.

так, чтобы было: $\frac{t_{\text{Э}}}{t_{\text{Э опт}}} = 2$ при $n = 1$ (5.8)

Для вычисления $U_{\text{опт}}$ можно использовать зависимость отношения

$$t_{\text{Э}} \text{ к } t_g \text{ от } U, \quad n \text{ и } t_g: \quad \frac{t_{\text{Э}}}{t_g} = \left(\frac{e \cdot t_g \cdot U}{3005 \sqrt{2} (n-1)} \right)^{-1} \quad (5.9)$$

формулу (5.9) легко получить, исключив азард q из соотношений (3.6) и (4.2). Как видно из (5.9) условие (5.8) удовлетворяется

$$\text{при } U_{\text{опт}} = \frac{4505 \sqrt{2}}{e \left(\frac{t_{\text{Э опт}}}{t_g} \right)^2} \quad (5.10)$$

Здесь δb систематическая ошибка, обусловленная неточным знанием постоянных величин, входящих в формулу (3.4),

$$\delta \alpha = \frac{\partial b}{2(b+pa)} \left(\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta b}{b} \right) \quad (6.3)$$

и последнее слагаемое

$$(\delta q_i)^{cl} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{t_g + 3t_E}{2(t_g + t_E)} \cdot \frac{\Delta t_g}{t_g} + \frac{t_g}{t_g + t_E} \cdot \frac{\Delta t_E}{t_E} \quad (6.4)$$

есть случайная ошибка, связанная с основными измерениями времени падения и подъема капли и напряжения U . При оптимальных условиях, когда $t_E = t_g^{opt}$ и $\Delta t_g = \Delta t_E = \Delta t_0$, формула (6.4) сильно упрощается и принимает вид:

$$(\delta q_i)^{cl} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{3}{2} \cdot \frac{\Delta t_0}{t_0} \quad (6.5)$$

Применяя формулу (6.1) к функции (3.8), можно получить выражение для предельной относительной погрешности элементарного вклада:

$$\frac{\Delta e}{e} = \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \frac{\Delta U}{U} + 0,5 \frac{\Delta t_g}{t_g} + \frac{\Delta \sum_{k=1}^{m_i} \tau_k}{\sum_{k=1}^{m_i} \tau_k} \quad (6.6)$$

Среднее значение $\sum_{k=1}^{m_i} \tau_k$ вычисляется по формуле

$$\overline{\sum_{k=1}^{m_i} \tau_k} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{k=1}^{m_i} \tau_k \quad (6.7)$$

где N число элементарных зарядов на капле (N_k определяют из данных опыта, как целое число близящее к частному от деления $\sum_{k=1}^{m_i} \tau_k$ на $\sum_{k=1}^{m_i} \tau_k$). За абсолютные погрешности Δt_g и $\Delta \sum_{k=1}^{m_i} \tau_k$ в первом приближении, можно принять наибольшие значения модулей разностей:

$$\Delta t_g = |t_{g_i} - \overline{t_g}|^{max}$$
$$\Delta \sum_{k=1}^{m_i} \tau_k = \left| \sum_{k=1}^{m_i} \tau_k - \overline{\sum_{k=1}^{m_i} \tau_k} \right|^{max}$$

6. Оценка погрешностей. 12.

Простейшим способом оценки точности результата измерений является вычисление его предельной или максимальной относительной погрешности.

Нахождение заряда капли и элементарного заряда методом Милликена - типичный пример косвенных измерений [9, стр. 59-63] когда определяемая величина q или e связана известной функциональной зависимостью (3.6) или (3.8) с рядом других непосредственно измеряемых величин (h, U, p, t_g, t_E) и с рядом заданных констант (ν, ρ, φ, H, b). В этом случае предельная относительная погрешность результата измерений вычисляется как погрешность функции нескольких переменных $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ по формуле

$$\delta y = \frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \right| \quad (6.1)$$

Значения производных в формуле (6.1) берутся при непосредственно измеренных или заданных средних значениях аргументов x_i . Абсолютные погрешности Δx_i оцениваются путём анализа условий и средств измерения аргументов x_i .

Хотя оценка погрешности по формуле (6.1) и даёт завышенный результат, но зато она достаточно проста и, кроме того, позволяет выявить, какие из величин x_i вносят в погрешность δy определяемый вклад, а какие члены суммы (6.1) можно при вычислении δy отбросить из-за их относительной малости. Оценка возможных значений всех слагаемых суммы (6.1) может, в частности, помочь правильно поставить и провести эксперимент и своевременно повисить (или понять) точность отдельных непосредственных измерений x_i там где это необходимо (или целесообразно).

Применяя формулу (6.1) к функциональной зависимости (3.6), можно представить относительную погрешность δq_i в виде суммы трех слагаемых:

$$\delta q_i = \delta b + \delta \alpha + \delta \left(\frac{t_g + t_E}{U \tau_k} \right) \quad (6.2)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В состав экспериментальной установки входят:

- 1) подставка, 2) конденсатор, 3) уровень, 4) выпрямитель, 5) вольтметр, 6) коммутатор напряжения, 7) осветитель, 8) поплавковый трансформатор, 9) ЛАТР, 10) вертикальный экран, 11) булавка, 12) миллиметровая линейка, 13) микроскоп, 14) измерительная сетка, 15) пульверизатор, 16) разветвительная колодка, 17) настольная лампа, 18) барометр, 19) комнатный термометр, 20) секундомер.

1. Конденсатор и ионизатор воздуха.

Конденсатор состоит из двух массивных металлических пластин, разделенных тремя изоляционными прокладками толщиной $H = (0,600 \pm 0,001)$ см. Пластины конденсатора соединены с ногами коммутатора напряжения и заключены в герметизированный цилиндрический кожух со съёмной проерачной крышкой, на которой установлен пульверизатор. В центре верхней пластинки имеется отверстие диаметром около 0,5 мм для впуска капели из пульверизатора. После впуска капель оно перекрывается выдвижением штока с заслонкой. Ручка штока расположена на стенке кожуха справа от наблюдателя.

Пружина удерживает ионизатор — точечный источник α — частиц в узком вертикальном канале в теле нижней пластинки; при этом α — частицы полностью поглощаются в металле. При нажатии рычага на пружину источник выдвигается вверх, в зазор между пластинами и α — частицы ионизируют в небольшой телесный угол в направлении к центру конденсатора, вызывая местную ионизацию воздуха, необходимую для пересадки капели.

Защитный кожух закреплен на круглом диске с тремя опорными винтами для горизонтальной установки пластин конденсатора по уровню, всегда лежащему на верхней пластине. Горизонтальная установка очень важна, так как даже при небольшом наклоне пластин капля при её многократных падениях и подъёмах кацды раз немного

сдвигается в сторону от центра. Накапливаясь, эти смещения могут привести к ухудшению видимости капли в микроскоп и даже к полному отсутствию её изображения.

В вертикальной стенке кожуха имеются три стеклянных окошечка (рис. 1) Узкий световой пучок от осветителя входит через окно 1, фокусируется в центре конденсатора и выходит через диаметрально противоположное окно 2. Наблюдение капелек ведётся в микроскоп, установленный перед боковым окном 3. При правильной установке осветителя прямой свет не попадает в наблюдательное окно 3, и капельки хорошо видны в микроскоп, как яркие точки на темном фоне. Не-за д. фракции света на каплях они выглядят окрашенными. При систематических наблюдениях можно установить связь между окраской и размерами капели, что может облегчить выбор капли нужного размера.

2. Осветитель

Чтобы избежать нагрева пластин конденсатора в осветителе используется малоомощная лампа накаливания (3 вт, 4 в). Нить накала имеет форму "прямолинейной" спирали. Закрепленный в корпусе осветителя короткофокусный цилиндрический конденсор ($F = 27$ мм) создаёт увеличенное изображение спирали в центре конденсатора.

Для установки осветителя свет от него направляют на вертикальный настольный экран. Поворотом и продольной подвижкой лампы в корпусе осветителя добиваются того, чтобы резкое изображение спирали на экране было вертикальным, а его размер по высоте был не меньше расстояния H между пластинами. Измерив расстояние от осветителя до экрана и наружный диаметр защитного кожуха, устанавливают осветитель по линейке так, чтобы изображение спирали оказалось в центре конденсатора, а сама спираль — на центральной оси окон 1 и 2. Для проверки опускают в центр конденсатора булавку и рассматривают её глазом через окно 3 (удалив для этого микроскоп) через окно 2. При расположении глаза на центральной оси окна 3

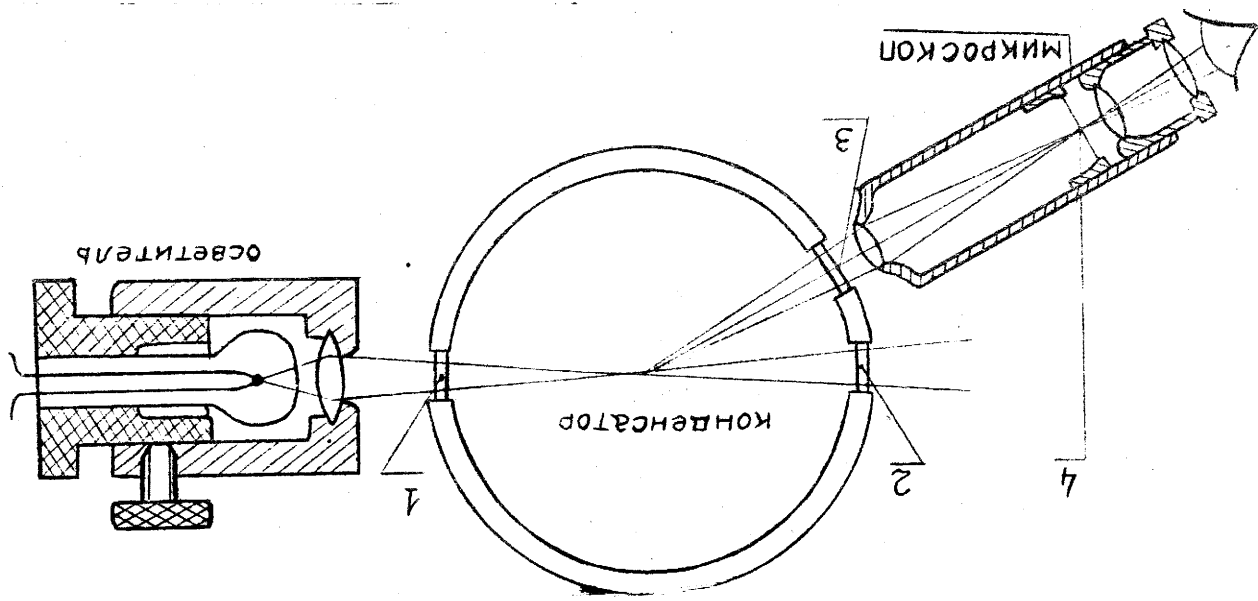
10. и правильной установке осветителя булавка должна быть ярко и симметрично освещена. Для наблюдения через окно 2 следует понизить напряжение на лампе, чтобы ее свет не слепил глаз, а темная булавка была хорошо видна на фоне умеренно яркого изображения спирали. При правильной установке осветителя боковые перемещения глаза относительно окна 2 не сопровождаются параллактическим смещением изображения спирали относительно булавки.

3. Микроскоп.

Длиннофокусный объектив микроскопа ($F = 50$ мм) создает обратное изображение булавки (находящейся в центре конденсатора) в плоскости двух горизонтальных ограничительных штрихов, установленных в тубусе микроскопа на расстоянии около $2F$ от объектива. Наблюдатель, смотрящий в окуляр настроенного микроскопа, видит прямое изображение горизонтальных штрихов и обратное изображение булавки и пластин конденсатора.

Настройка микроскопа начинается с установки окуляра по глазу наблюдателя (при этом микроскоп должен быть направлен на ярко освещенный предмет). Используя диоптрийную наводку или продольную подвижку окуляра в тубусе микроскопа, добиваются четкой видимости горизонтальных штрихов. Затем, поперечным и продольным перемещением микроскопа перед окном 3 получают резкое изображение булавки в середине поля зрения на фоне изображения штрихов:

По высоте микроскоп должен быть установлен так, чтобы истинный интервал наблюдения h (в центре конденсатора) был удален от нижней пластинки несколько больше, чем от верхней. При этом видимый сверху поля зрения интервал $\Delta h'$ между верхним горизонтальным штрихом и изображением нижней пластинки должен быть несколько больше соответствующего интервала внизу поля зрения. Такая установка необходима, чтобы несколько увеличить запас времени для зарядки пластины, случайно разрядившихся при падении в поле силы тяжести.



4. Измерительная сетка и определение величины h .

Сетка нанесена на центральном участке круглого стекла, на площади 25 мм^2 , и образована толстыми (через $1,0 \text{ мм}$), средними (через $0,5 \text{ мм}$) и тонкими (через $0,1 \text{ мм}$) взаимно перпендикулярными штрихами. Толщина тонких штрихов составляет около $0,1$ интервала между ними, т.е. примерно $0,01 \text{ мм}$.

Для измерения h получают в микроскопе четкое изображение хорошо освещенной сетки и отсчитывают число ее делений между верхними (или нижними) границами ограничительных штрихов.

5. Электропитание конденсатора и осветителя.

Источником высокого напряжения служит стабилизированный полупроводниковый выпрямитель с наибольшим входным напряжением ЭДС на лицевой панели прибора расположен тумблер включения и две ручки для скачкообразной (через 300 В) и плавной установки высокого напряжения. Настабильность высокого напряжения не превышает $\pm 0,03\%$ при изменениях напряжения сети на $\pm 10\%$.

Схема питания конденсатора (рис.2) имеет следующие особенности:

1. Трехпозиционный двухполосный коммутатор напряжения снабжен специальной контактной перемычкой. При среднем нейтральном положении коммутатора перемычка замыкает пластины конденсатора, что необходимо для быстрого устранения поля при перезарядке капель.
2. Для повышения электробезопасности и дополнительной защиты выпрямителя от коротких замыканий высокое напряжение подведено к пластинам конденсатора через два резистора с сопротивлением порядка 5 МОм .

Лампа осветителя питается от понижающего трансформатора, сетевая обмотка которого присоединена к выходу лабораторного автотрансформатора (ЛАТР), что позволяет плавно изменять накал от нуля до максимальной яркости.

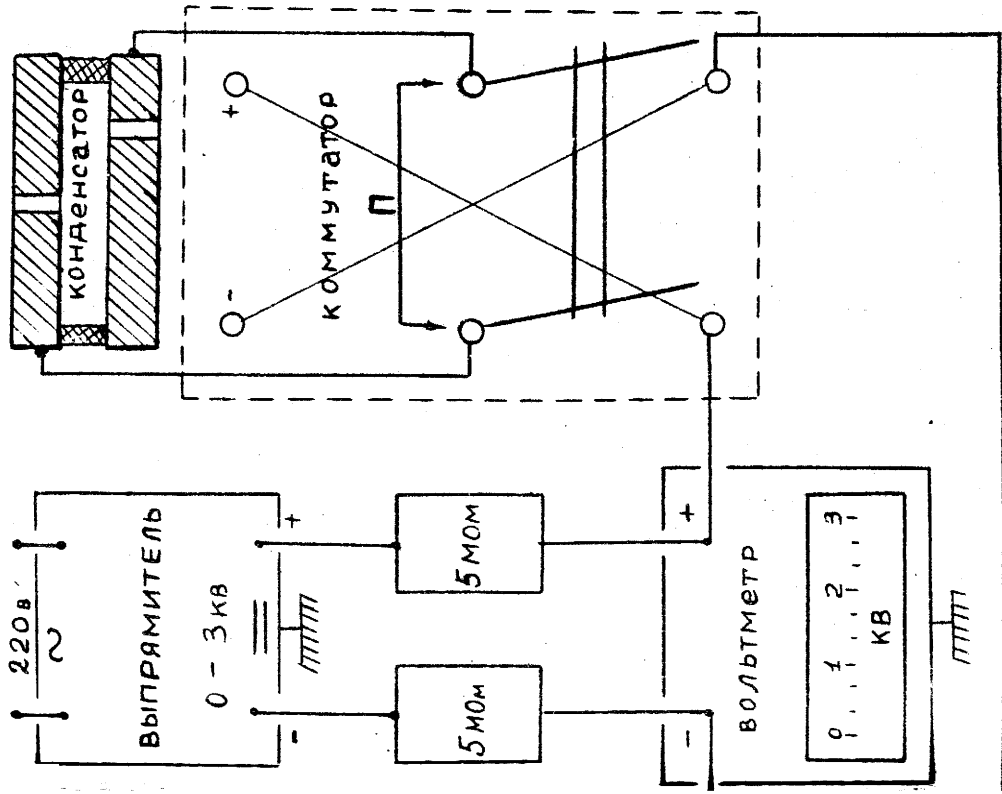


Рис. 2. Схема электропитания конденсатора. В среднем положении коммутатор замыкает пластины конденсатора контактной перемычкой П.

6. Получение капелек и порядок работ с пульверизатором.

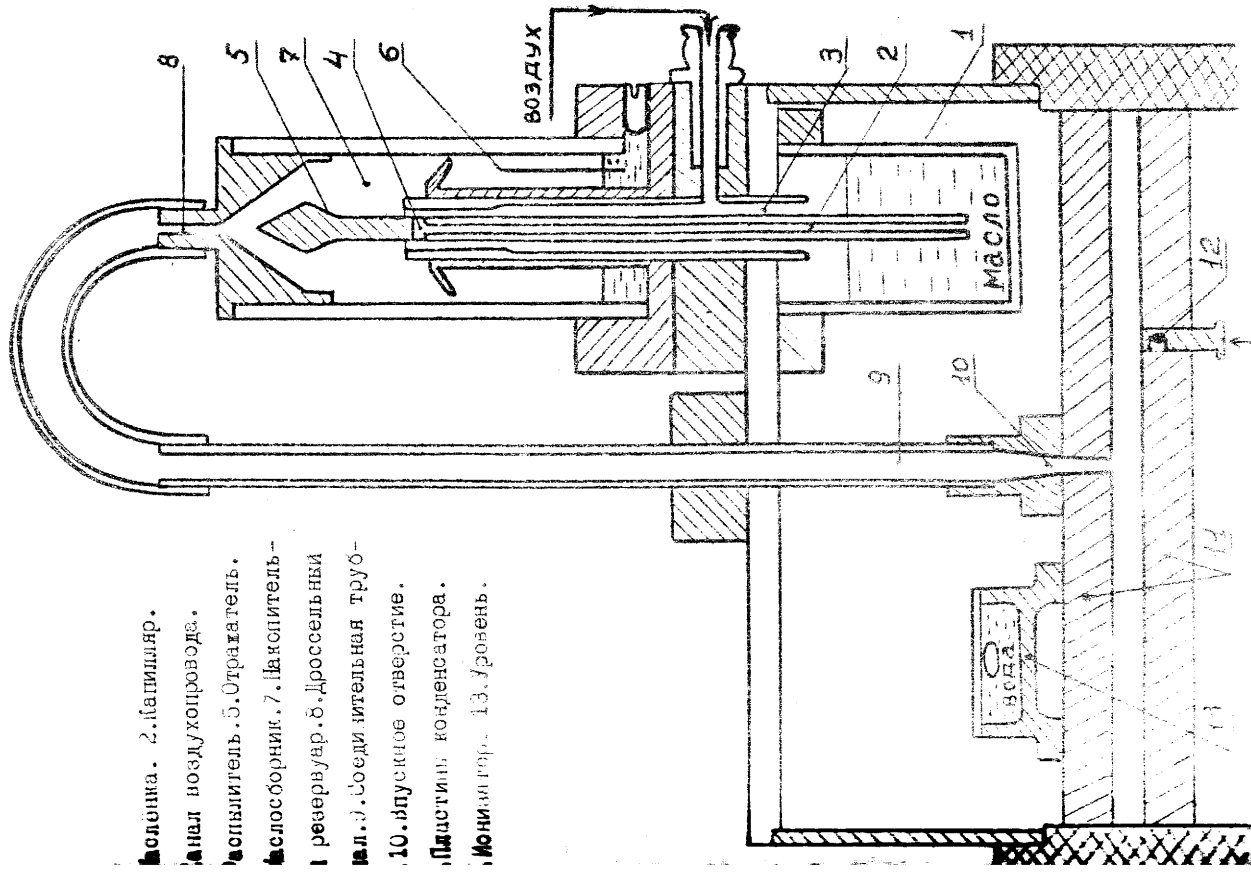
Для получения капелек используется специальное вакуумное масло с плотностью $\rho = (1,002 \pm 0,001) \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$. При распылении масла в пульверизаторе капельки получаются взвешенными, причем положительный и отрицательный аныки первоначального горяда капли равновероятны. Входная трубка пульверизатора расположена над центральный отверстием в верхней пластине конденсатора. Схема устройства пульверизатора приведена на рис. 3.

При получении капелек следует соблюдать следующий порядок работ с пульверизатором:

1. Перекрыть выпускное отверстие конденсатора, вдвинув шток с заслонкой.
2. Несколькими энергичными нажатиями на грушу распылить маленькую порцию масла и наполнить в соединительной трубке (рис. 3) некоторое количество капелек.
3. Вдвинув заслонку, открыть доступ каплям в конденсатор.
4. Легкими импульсными нажимами на грушу проталкивать воздух из соединительной трубки в конденсатор до появления в поле зрения подходящей капли.
5. Перед началом измерений $t_{\text{г}}$ и $t_{\text{э}}$ перекрыть выпускное отверстие вдвинув заслонку.
7. Переарядка капель.

При пролете λ - частиц в воздухе образуются положительные и отрицательные одноарядные ионы. Переарядка капли происходит при захвате ею одного или нескольких ионов воздуха. Если включить ионизатор при наличии электрического поля, то из-за ухода ионов на пластинк конденсатора вероятность переарядки капли будет мала.

Для переарядки капли надо включить λ - источник сразу же вслед за очередным снятием поля, когда капля находится вблизи от



1. Колонка.
2. Игла.
3. Резервуар.
4. Дроссельная трубка.
5. Соединительная трубка.
6. Впускное отверстие.
7. Пластина конденсатора.
8. Ионизатор.
9. Уровень.
10. Резервуар.
11. Ионизатор.
12. Уровень.
13. Масляный резервуар.

ЗАДАНИЕ

Верхней пластинки (внизу поля эрениа) и только что перешла от подвешенной к падению. При этом возможна длительность включения ионизатора будет наибольшей. Необходимо для длительности ионизации подобрать оптимальный путь так, чтобы капля перезарядилась, по возможности, после каждого включения источника.

Если капли разрядятся и начала падать в электрическом поле, её надо успеть зарядить пока она не достигла нижней пластинки (вверху поля эрениа). Для этого надо быстро разрядить конденсатор и включить ионизатор. Когда же капля приблизится к нижней пластинке надо успеть убрать ионизатор, быстро включить поле и быть готовым коммутировать его, если скорость капли возрастет на изменении своего направления.

8. Порядок измерения времен t_1 и t_2 .

При измерениях t_1 и t_2 наблюдатель должен держать глаз от постороннего света и не переводить его на яркое освещение предмета. Это необходимо для сохранения адаптации глаза к низкому уровню освещенности в поле эрениа микроскопа. Левая рука наблюдателя постоянно находится на коммутаторе напряжения, а правая попеременно управляет пульверизатором, заслонкой, ионизатором и секундомером. Поэтому отсчеты по секундомеру и запись их в протокол производится второй участник работы.

Секундомер должен находиться на столе, в специальном упорном гнезде так, чтобы наблюдатель мог нажимать на его пусковую головку, не беря прибор в руку и не отрывая глаза от микроскопа, а ведущий валом хорошо видел стрелку и шкалу секундомера.

Наиболее подходящим из механических секундомеров является прибор типа СД-1М с ценой отсчетного деления 0,1 с.

Задание I., подготовительное к сдаче допуска.

Писать в рабочую тетрадь необходимые расчетные формулы и значения входных в них констант с их абсолютными погрешностями. Напомнить с экспериментальной установкой. Обратить внимание на расположение и назначение всех её частей. Объяснить устройство и работу пульверизатора.

Учить в микроскопе обработку измерительной сетки и определять высоту наблюдения h .

Писать в системе СИ значение постоянной B .
 Учить $\alpha = 1$ и учесть неравенство (5,7), найти пределы оптимального напряжения по формуле (5.10)

Задание II., наблюдения и измерения.

Учить насстраивать установку, находить подходящие капельки управлять их движением.

Определять направление поля E и знак заряда поднимавшейся в поле капли при каждом из двух крайних положений коммутатора. Учить перезарядить каплю ионизатором воздуха.

Учить вести две серии измерений t_1 и t_2 с двумя разными каплями. Результаты занести в протокол по форме № 1. Каждый из двух студентов, работавших на установке выполняет одну серию измерений самостоятельно. В одной серии измерения должны быть заархивировано не менее десяти перезарядок ($K \geq 10$) одной и той же капли.

Учить графикам, хранящимся у лаборанта, определять фруновские грешности $\sqrt{\Delta t \cdot \Delta \tau}$ для наблюдавшихся вами капель.

Задание III., обработка результатов и оценка ошибок измерения ставить сводную таблицу по форме № 2.

Учить выводить все найденные значения Σt_1 и Δt_1 на числовой оси (на линейной полоске миллиметровки) с тремя десятичными знаками.
 Записать Σt_1

ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Почему микроскопические капли масла имеют шаровидную форму?
2. Оцените ошибку определения ϵ , внаванную пренебрежением силой Архимеда в формулах (1.1) и (1.2).
3. Оцените время t_{ϵ} и путь Δh_{ϵ} установления предельной скорости у капли с оптимальным временем падения.
4. Определите радиус капли по точной формуле (3.9) и относительную погрешность δa при вычислении a по приближенной формуле (3.10.)
5. Введите формулы (6.3) и (6.4).
6. Найдите относительную погрешность определения константы B по формуле (56') $\left[\theta, \text{стр. 62} \right]$:

$$\delta B = \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial \chi_i} \cdot \Delta \chi_i \right)^2} \quad (56')$$
7. и сравните результат с оценкой δB по формуле (6.1)
7. Получите формулу для напряжения U_n , при котором капля с зарядом qe и известным временем падения t_p неподвижна в электрическом поле.
8. Конденсатор Милликена можно использовать, как сверхчувствительные микровесы. Укажите два способа определения веса заряженных капелек. Оцените вес капли, которую вы наблюдали.
9. Водяная капелька с одним элементарным зарядом неподвижна в использованном вами конденсаторе Милликена при $U = 30$ в. Для этой капельки определите: 1) время падения t_p на высоту $h = 2$ мм (при $U=0$), 2) радиус и вес капли, 3) число N_k молекул воды в объеме капли, 4) поправку Δ (при $p = 75$ см. рт.ст.) и фоновую ошибку $\sqrt{(\Delta t)^2}$.
10. При каком напряжении U_k капля из задачи 9 будет подниматься на высоту $h = 2$ мм за время $t_F = 16$ с?

- В. Определить радиус капель и значения поправочного множителя Δ .
- В. Вычислить элементарный заряд e и сравнить найденное значение с табличным.
- Оценить предельную относительную погрешность элементарного заряда e и отдельный вклад в нее каждого сомножителя в формуле (3.8)
- Оценить относительную погрешность $(\delta p)_e$ по формуле (6.5) и найти "допустимое" число элементарных зарядов из неравенства (4.4)

ПРОТОКОЛ СЕРИИ ИЗМЕРЕНИИ (ФОРМА № 1)

Дата....., Температура....., Атм. давление.....

1	2	3	4	5	6
номер измерения i	t_{p_i} ϵ	t_{E_i} ϵ	номер заряда капли K	$t_{E,K}$ ϵ	знак заряда капли
1.			1		
2.			1		
3.			0 1 ϵ		
4.			2		
5.			2		

Наблюдения вел....., Протокол составил....., Проверил.....

СВОДНАЯ ТАБЛИЦА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДИСКРЕТНОСТИ (ФОРМА № 2)

Приложение к протоколу измерения от с:
 Капля №....., $t_p = \dots\dots\dots$ с, $t_{E_i} = \dots\dots\dots$ с:

1	2	3	4	5	6	7	8	9
номер заряда K	$t_{E,K}$ ϵ	$t_{E,K}$ ϵ^{-1}	$\sum_{K=1}^K t_{E,K}$ ϵ^{-1}	$\sum_{K=1}^K t_{E,K}$ ϵ^{-1}	число зарядов N_k	Δ_K ϵ^{-1}	$\frac{\Delta_K}{\Delta_K^{ном}}$	Δ_K
1.								
2.								
3.								
4.								

Таблицу составил

/подпись/

11. Получите формулу для вычисления оптимального времени падения

$$t_{opt}^2 = \sqrt{\frac{42 \pi^2 k^3}{k^2 \rho g}} \cdot \frac{h^5 \cdot [(4t^2)^2]^2}{T^2}$$

12. Докажите, что $t_E^{opt} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot t_g^{opt}$.

13. Почему для очень маленьких капель падающих в воздухе сила трения меньше предсказываемой обычной формулой Стокса

[5, стр. 496] ?

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики, том I, "Наука" М. 1977.
2. Андерсон Д. Открытие электрона. Атомладат М. 1968.
3. Милликен Р. Электроны (+ и -), протоны, фотоны, нейтроны и космические лучи ГОНТИ НКП СССР М.-Д. 1989.
4. Митчел Уилсон. Американские ученые и изобретатели "Знание" М. 1964.
5. Сивухин Д.В. Обшии курс физики, том I, "Наука" М.1974.
6. Брусин И.Я. Определение заряда электрона (описание лабораторной работк) Горький, 1961.
7. Шпольский Э.В. Атомная физика, том I ГИФМЛ М. 1963.
8. Сивухин Д.в. Обшии курс физики, том II, "Наука" М. 1975.
9. Звездель А.Н. Ошибки измерений физических величин "Наука" Ленинград, 1974.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	стр. 1
1. Историческая справка	1
2. Сушность метода	2
3. Цель работы	2
<u>Теоретическая часть</u>	
1. Связь заряда капли со скоростями её падения и подъема	2
2. Обнаружение дискретности электрических зарядов	3
3. Рабочие формулы для вычисления q , Aq и e	5
4. условия обнаружения дискретности	6
5. Выбор оптимальных условий эксперимента	7
6. Оценка погрешностей	10
12	12
<u>Экспериментальная установка</u>	
1. Конденсатор и ионизатор воздуха	12
2. Осветитель	13
3. Микроскоп	14
4. Измерительная сетка и определение величины	16
5. Электропитание конденсатора и осветителя	16
6. Получение капелек и порядок работы с пульверизатором	18
7. Переверядка капель	18
8. Порядок измерения t_g и t_E	20
21	21
<u>Задание</u>	
Форма протокола измерений и свободной таблицы	22
вопросн и задачи	23
литература	24