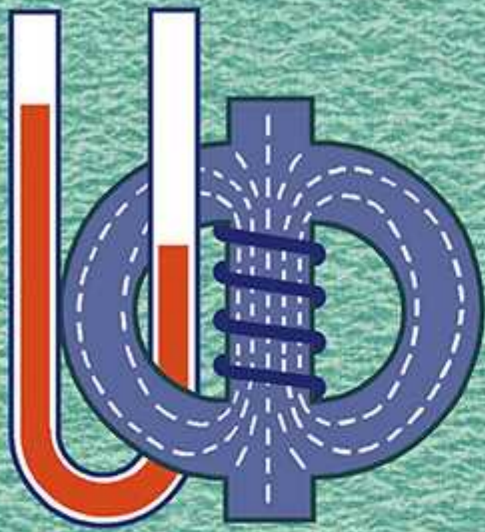


ISSN 2307-5457



УЧЕБНАЯ ФИЗИКА

1
2021



УДК 372.853:537

В. В. Майер, Е. И. Вараксина, Ю. А. Корнев

АБСОЛЮТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ФИЗИЧЕСКОМ ПРАКТИКУМЕ БАКАЛАВРИАТА

Для физических практикумов педагогического вуза и классов средней школы с углубленным изучением физики предлагается лабораторная работа по измерению максимального напряжения, развиваемого пьезогенератором. В процессе выполнения работы обучающиеся знакомятся с абсолютным методом измерения напряжения.

Ключевые слова: измерение напряжения, абсолютный метод, пьезогенератор, физический практикум, педагогический вуз, средняя школа.

Практикум бакалавриата по направлению «Педагогическое образование», профиль «Физика» целесообразно конструировать таким образом, чтобы обучающиеся имели возможность самостоятельной сборки экспериментальных установок с максимальным использованием общедоступных материалов, инструментов и измерительных приборов. Это позволит будущим учителям физики без особых трудностей воспроизводить современные учебные исследования в условиях школы.

В статье описана лабораторная работа по измерению максимального напряжения, развиваемого пьезогенератором. Для сборки экспериментальной установки требуются электронные весы, пьезозажигалка с выводами, пластины разборного конденсатора, защитное кольцо из полипропилена и штатив с принадлежностями.

Измерение напряжения абсолютным методом хорошо известно и используется в лабораторных работах курсов физики как высшей [1], так и средней [2] школы. Изготовление пьезогенератора из бытовой пьезозажигалки и опыты с этим прибором рассмотрены в статьях [4–8]. Технология подготовки студентов к доказательному педагогическому эксперименту изложена в работе [8]. Педагогический эксперимент, проведенный в практикуме Глазовского физико-математического лицея в соответствии с технологией [9], показал возможность и целесообразность выполнения обучающимися представленной ниже лабораторной работы.

ИЗМЕРЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПЬЕЗОГЕНЕРАТОРА

Лабораторная работа физического практикума

Всем известно, что электрическое напряжение измеряется вольтметром. Но как проверить и убедиться, что вольтметр измеряет именно напряжение, причем в вольтах? Иными словами, как был отградуирован первый вольтметр?

1. Абсолютный вольтметр

Электрическим напряжением U называется разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ между точками 1 и 2 электрического поля. В свою очередь разность потенциалов равна отношению работы поля A_{12} при перемещении положительного заряда q из начальной точки в конечную к величине этого заряда:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q}. \quad (1)$$

Напомним, что электростатическое поле потенциально, поэтому работа поля A_{12} не зависит от траектории перемещения заряда из одной точки в другую.

Работу A_{12} проще всего найти в однородном электрическом поле, вектор напряженности \vec{E} которого имеет постоянный модуль $E = \text{const}$ и неизменное направление. На заряд q в таком поле действует постоянная сила $\vec{F} = q\vec{E}$. Однородное электрическое поле существует в плоском конденсаторе, который состоит из двух одинаковых параллельных металлических пластин (обкладок) площадью S , разделенных диэлектриком толщиной d с диэлектрической проницаемостью ϵ . Емкость такого конденсатора определяется простой формулой:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (2)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная. Как выводится эта формула, можно прочитать в учебнике [3].

По определению емкость двух проводников — это отношение заряда q одного из проводников к разности потенциалов U между ними:

$$C = \frac{q}{U}. \quad (3)$$

Обкладки плоского конденсатора имеют одинаковые по модулю и противоположные по знаку заряды $\pm q$. Поэтому одна из обкладок с зарядом q находится в электрическом поле напряженностью

$$E = \frac{U}{2d}, \quad (4)$$

созданном второй обкладкой. Значит, на первую обкладку конденсатора действует сила притяжения ко второй обкладке, равная

$$F = qE = \frac{qU}{2d}. \quad (5)$$

Выражая q и C из формул (3) и (2) и подставляя получившиеся выражения в формулу (5), имеем:

$$F = \frac{CU^2}{2d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S U^2}{2d^2}. \quad (6)$$

Отсюда напряжение между обкладками конденсатора равно:

$$U = d \sqrt{\frac{2F}{\epsilon_0 \epsilon S}}. \quad (7)$$

Таким образом, чтобы найти напряжение между пластинами плоского конденсатора, достаточно измерить площадь S пластин и расстояние d между ними, а затем определить силу притяжения F одной пластины к другой.

Это *абсолютный метод измерения электрического напряжения*, так как для его реализации необходимо измерение только геометрических и механических величин: расстояния, площади и силы.

2. Пьезоэлектрический источник напряжения

Источником электричества, напряжение которого нужно определить в исследовании, будет пьезоэлектрический генератор, с устройством и принципом действия которого сейчас необходимо познакомиться.

На рис. 1 слева показан конденсатор, диэлектриком которого является плоскопараллельная пластина, определенным образом вырезанная из кристалла кварца SiO_2 . Сама пластина на рисунке не показана, а вместо нее схематически обозначена упрощенная структура, которую образуют положительно и отрицательно заряженные ионы кремния и кислорода соответственно.

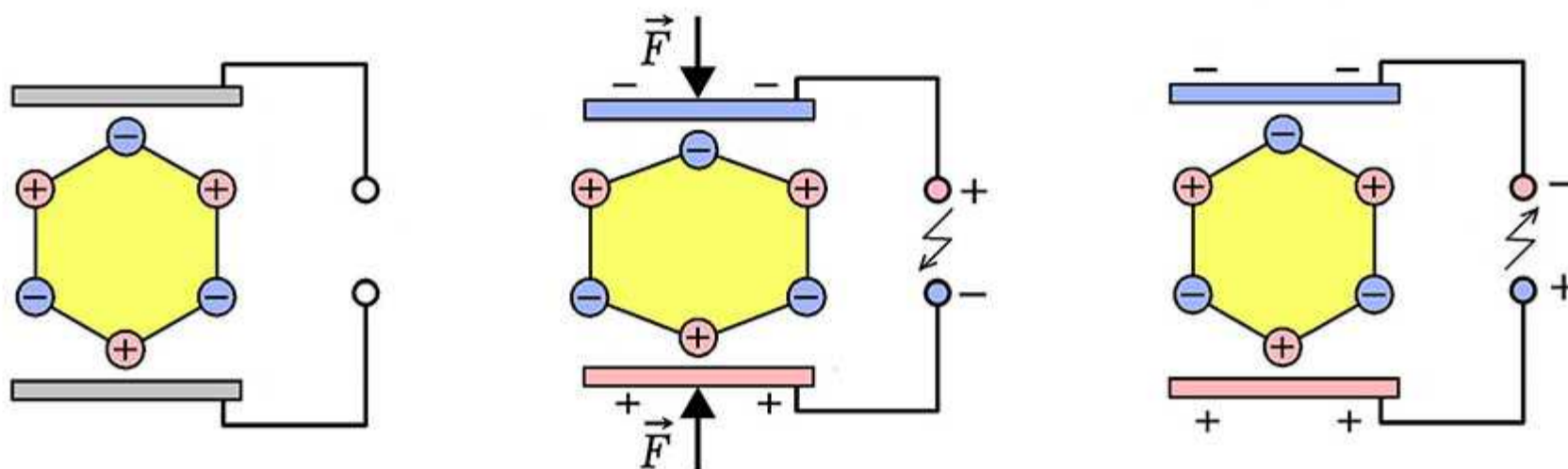


Рис. 1

Когда кристалл сжимается, составляющие его ионы смещаются. К верхней обкладке конденсатора приближаются положительные ионы, а к нижней — отрицательные. Благодаря электростатической индукции между электродами пьезогенератора появляется разность потенциалов: верхний заряжается положительно, а нижний — отрицательно (центральный рисунок). Если электроды сблизить, проскакивает искра. При снятии деформации с кристалла на выходе возникает разность потенциалов противоположного знака, как это показано на правом рисунке.

В качестве источника высокого напряжения в исследовании используется пьезоэлектрический генератор, изготовленный из бытовой пьезозажигалки. Внешне пьезозажигалка состоит из пластмассового корпуса, подвижной клавиши и разрядника. При нажатии на клавишу между электродами разрядника проскакивает серия электрических искр, которая поджигает газ.

Внутри корпуса пьезозажигалки находится рычажный механизм, который при нажатии на клавишу прибора передает давление на два соединенных параллельно цилиндрика из пьезокерамики типа ЦТС-19. Аббревиатура ЦТС обозначает материал, из которого изготовлена пьезокерамика — *цирконат титаната свинца*. Этот искусственный материал при деформации обеспечивает получение гораздо большего напряжения, чем естественный кварц.

Чтобы из пьезозажигалки изготовить пьезогенератор, пришлось с электродами пьезокерамики соединить гибкие многожильные провода в полихлорвиниловой изоляции и припаять к их концам крокодильи. Красный провод обозначает плюс, а желтый — минус напряжения, возникающего при нажатии на клавишу прибора.

3. Экспериментальная установка

На рис. 2 показаны приборы и основные элементы экспериментальной установки: 1 — пьезогенератор, изготовленный из пьезозажигалки; 2 — электронные весы типа *Zelmer 34Z051* с точностью измерения 1 г; 3 — нижняя металлическая пластина с кольцом из

диэлектрика; 4 — верхняя металлическая пластина с диэлектрическим держателем; 5 — втулка и крепежный стержень.

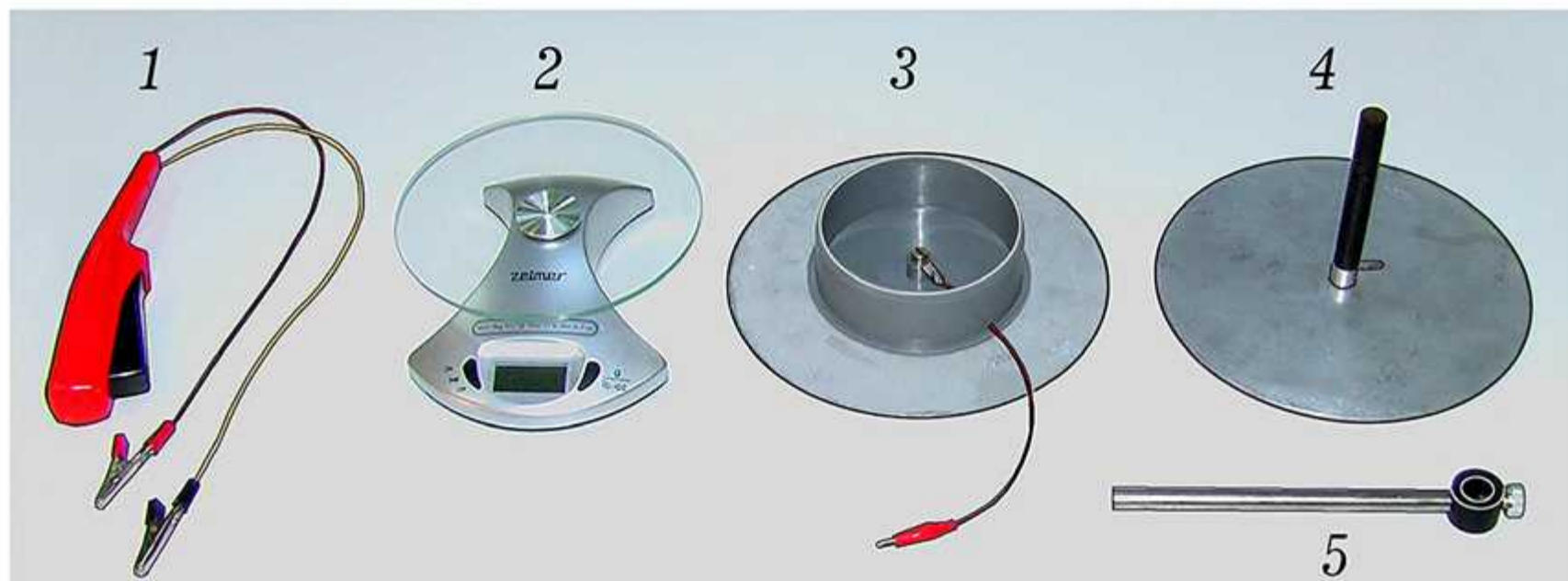


Рис. 2

Подготовленная к работе установка представлена на рис. 3. Для сборки установки весы 2 расположите на ровной горизонтальной поверхности стола. На платформу весов аккуратно диэлектрическим кольцом вниз поместите металлическую пластину 3. Добейтесь, чтобы пластина была расположена симметрично относительно платформы весов. На штативе закрепите обычную или шаровую поворотную муфту и в ней зажмите крепежный стержень с эбонитовой втулкой 5. Вставьте во втулку держатель с верхней металлической пластиной 4 и закрепите его винтом. Отрегулируйте муфту так, чтобы металлическая пластина расположилась горизонтально. Переместите штатив ближе к весам и аккуратно верхнюю пластину опустите на нижнюю. Окончательно отрегулируйте положение верхней пластины так, чтобы она стала параллельна нижней.

Штангенциркулем или линейкой измерьте длину выступающей из втулки части держателя верхней пластины. Поднимите верхнюю пластину над нижней на расстояние, равное 10 мм, и закрепите ее держатель во втулке винтом.

4. Выполнение эксперимента

Собрав экспериментальную установку, как описано в предыдущем пункте, включите весы. Они должны показать нулевой вес, так как вес установленной на платформе весов металлической пластины с диэлектрическим кольцом электроникой весов компенсируется.

Обратите внимание: весы показывают вес, но отградуированы по массе m груза, находящегося на их платформе, причем, в граммах. Чтобы определить силу притяжения F между пластинами, нужно в системе СИ вычислить величину:

$$F = mg, \quad (8)$$

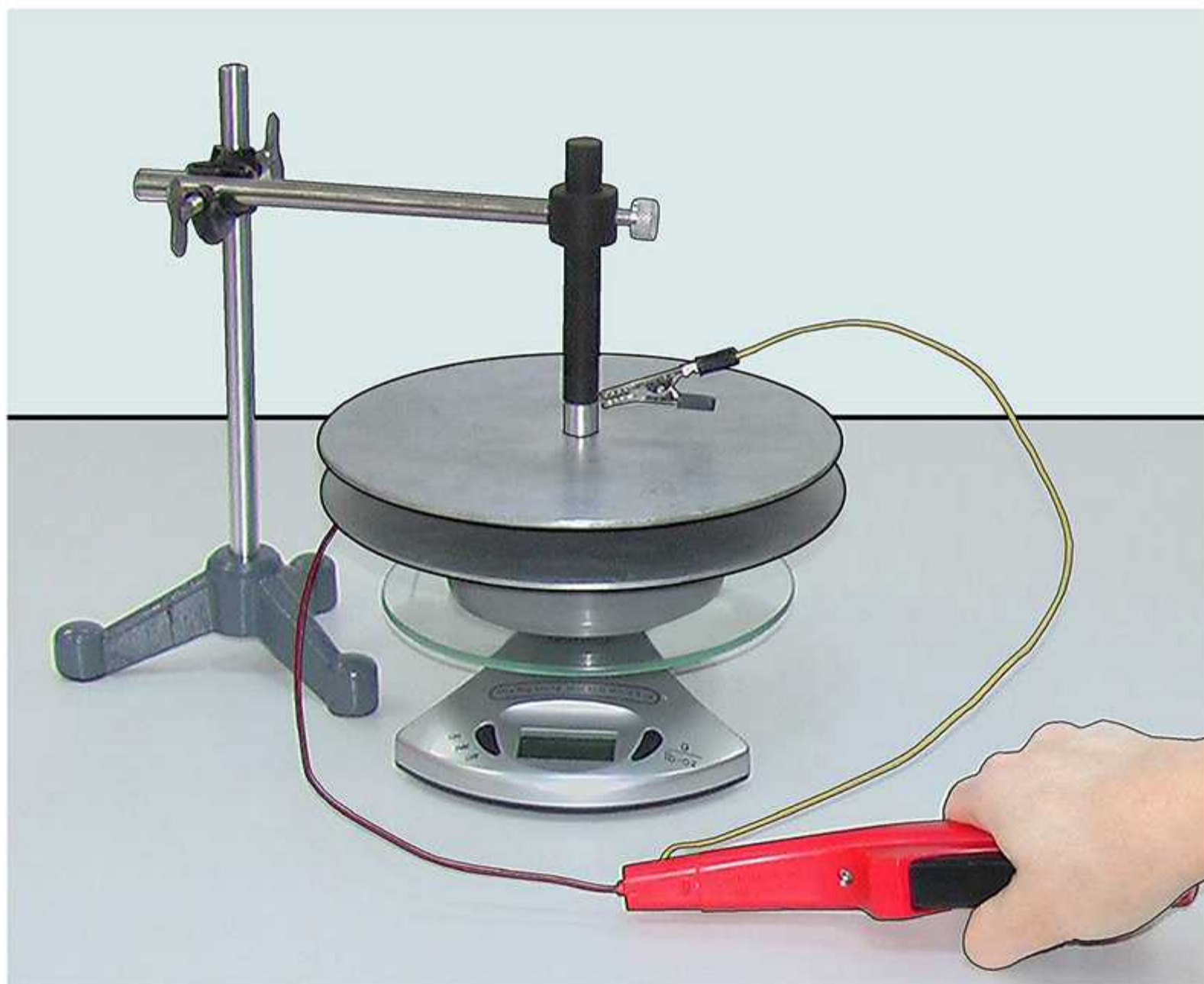


Рис. 3

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения. Кроме того, диэлектриком исследуемого конденсатора является воздух, для которого диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 1$. Обкладки имеют форму дисков радиусом r и площадью $S = \pi r^2$. Поэтому из формулы (7) получаем расчетную формулу:

$$U = \frac{d}{r} \sqrt{\frac{2mg}{\pi\varepsilon_0}}. \quad (9)$$

Пьезогенератор положите на стол так, чтобы провода, идущие от него к пластинам конденсатора, не касались корпуса весов, иначе электроника весов может выйти из строя.

Нажмите на клавишу пьезогенератора и запомните максимальное показание весов (рис. 4). *Аккуратно изолированным проводом с крокодильцами на концах разрядите конденсатор.* Так вы разрядите пьезогенератор и подготовите его к новому опыту. Если каждый раз пьезогенератор не разряжать, то достоверных результатов эксперимента получить не удастся. Восстановите нарушенное соединение пьезогенератора с конденсатором и вновь повторите опыт.



Рис. 4

Добейтесь такого нажатия на клавишу, при котором сила взаимодействия между пластинами конденсатора максимальна. Повторите опыт не менее трех раз, записывая расстояние между пластинами d в метрах и показания весов m в килограммах в табл. 1.

Проделайте 6 серий подобных измерений, каждый раз увеличивая расстояние d при переходе к следующей серии на 0,5 см, и полученные результаты запишите в таблицу. *Не забывайте после каждого опыта разряжать пьезогенератор!*

Таблица 1
Результаты измерений и вычислений

Серия	d , м	$1/d^2$, м ⁻²	m , кг	F , Н	U , В	ΔU , В
1						
Средние значения						
2						
Средние значения						

5. Экспериментальные задания

1. *Напряжение пьезогенератора.* Нарисуйте табл. 1 и заполните ее результатами измерений и вычислений. Запишите полученное значение максимального напряжения пьезогенератора с погрешностью, вычисленной по среднему значению.

2. *Зависимость силы взаимного притяжения пластин конденсатора от расстояния между ними.* По результатам эксперимента постройте график функции $F = F(d)$.

3. *Линеаризация зависимости силы от расстояния.* Постройте график зависимости силы притяжения между пластинами конденсатора от величины, обратной квадрату расстояния между ними: $F = F(1/d^2)$.

4.* *Относительная погрешность косвенного измерения напряжения.* Используя расчетную формулу (9), вычислите относительную и абсолютную погрешности косвенного измерения напряжения.

5. *Измерение силы весами.* Объясните, что именно и каким образом измеряют весы в проделанном вами экспериментальном исследовании.

6. Контрольные вопросы

1. *Напряжение на конденсаторе.* Расстояние между пластинами заряженного конденсатора увеличили в три раза. Как и почему изменилось напряжение на конденсаторе?

2. *Емкость конденсатора.* Дайте определение емкости конденсатора. Как изменится электроемкость конденсатора при увеличении зарядов его пластин в 5 раз?

3. *Зависимость емкости от параметров конденсатора.* Как изменится емкость плоского конденсатора, если расстояние между пластинами и их площадь увеличить в два раза?

4. *Зависимость емкости от напряжения на конденсаторе.* Как изменится емкость конденсатора при увеличении в два раза разности потенциалов $\varphi_2 - \varphi_1$ между его обкладками?

5. *Напряженность электрического поля.* Разность потенциалов между двумя точками, отстоящими друг от друга на $d = 2$ мм и лежащими на нормали к эквипотенциальным поверхностям, равна 30 В. Определите среднюю напряженность электрического поля.

ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Выполнение экспериментальных заданий

1. *Напряжение пьезогенератора.* В одном из экспериментов получены результаты измерений и вычислений, приведенные в табл. 1. Обработка этих результатов для максимального напряжения, развиваемого пьезогенератором, дает значение: $U = (15,3 \pm 0,3)$ кВ, в котором погрешность оценена по среднему.

Таблица 1

Результаты измерений и вычислений

Серия	d , м	$1/d^2$, м ⁻²	m , кг	F , Н	U , В	ΔU , В
1	0,010	10000	0,028	0,274	14100	200
			0,027	0,265	13800	100
			0,027	0,265	13800	100
Средние значения			0,027	0,268	13900	100
2	0,015	4400	0,015	0,147	15400	500
			0,017	0,167	16400	500
			0,016	0,157	15900	0
Средние значения			0,016	0,157	15900	300
3	0,020	2500	0,007	0,069	14100	600
			0,008	0,078	15000	300
			0,008	0,078	15000	300
Средние значения			0,008	0,075	14700	400
4	0,025	1600	0,005	0,049	14800	500
			0,006	0,059	16300	1000
			0,005	0,049	14800	500
Средние значения			0,005	0,052	15300	700
5	0,030	1100	0,004	0,039	15900	0
			0,004	0,039	15900	0
			0,004	0,039	15900	0
Средние значения			0,004	0,039	15900	0
6	0,035	820	0,003	0,029	16100	0
			0,003	0,029	16100	0
			0,003	0,029	16100	0
Средние значения			0,003	0,029	16100	0
Среднее значение					15300	300

2. Зависимость силы взаимного притяжения пластин конденсатора от расстояния между ними. По результатам эксперимента на рис. 5 построен график функции $F = F(d)$, который показывает, что зависимость силы притяжения от расстояния между пластинами конденсатора нелинейна, причем с увеличением расстояния сила уменьшается.

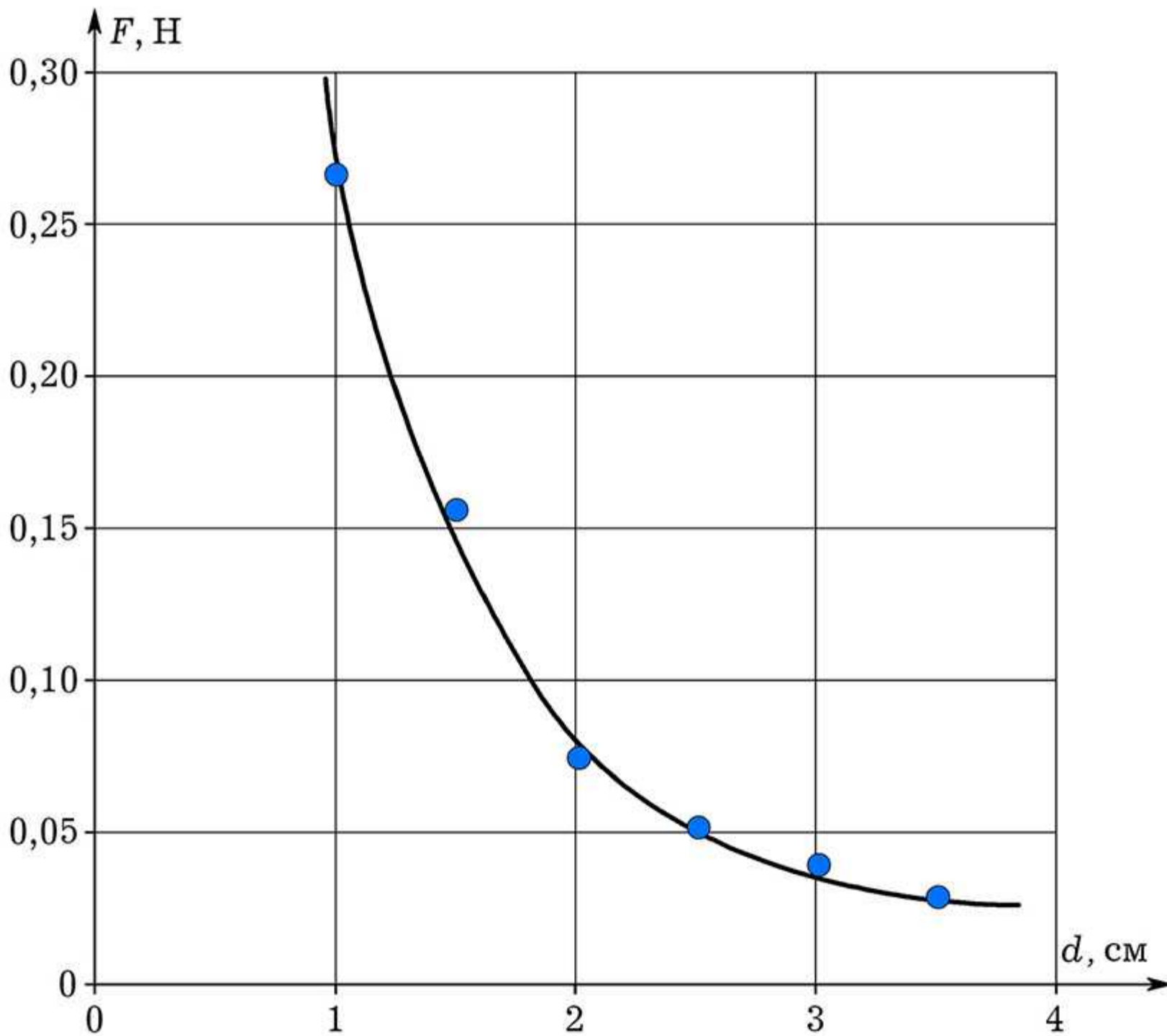


Рис. 5

3. *Линеаризация зависимости силы от расстояния.* На рис. 6 построен график функции: $F = F(1/d^2)$, который показывает, что зависимость силы притяжения от величины, обратной квадрату расстояния между пластинами, близка к линейной. Вывод: сила притяжения между пластинами конденсатора обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

4.* *Относительная погрешность косвенного измерения напряжения.* Для вычисления относительной погрешности косвенного измерения вначале найдите логарифм выражения (9):

$$\ln U = \ln d - \ln r + \frac{1}{2}(\ln 2 + \ln m + \ln g - \ln \pi - \ln \varepsilon_0).$$

Продифференцируйте получившуюся формулу и замените в ней дифференциалы на приращения и минусы на плюсы:

$$\delta = \frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta m}{2m}. \quad (10)$$

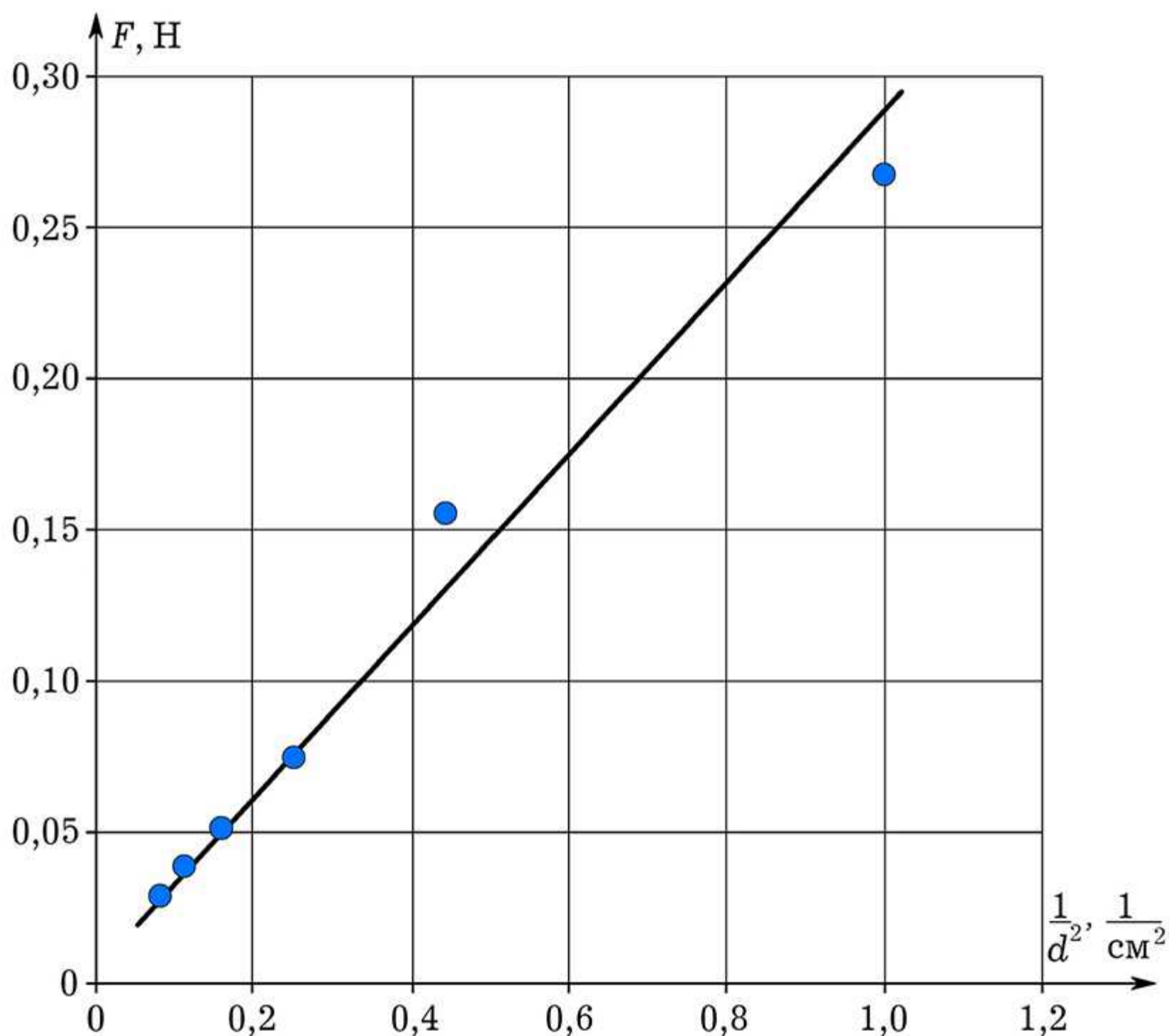


Рис. 6

Расстояние между пластинами конденсатора в опыте изменялось от 10 до 35 мм. Значение напряжения, наиболее близкое к итоговому среднему, получилось в четвертой серии измерений для расстояния между пластинами 25 мм. При этом данные эксперимента: $d = 0,025$ м, $\Delta d = 0,001$ м; $r = 0,100$ м, $\Delta r = 0,001$ м; $m = 0,005$ кг, $\Delta m = 0,001$ кг; $U = 15,3$ кВ. Тогда согласно формуле (10) относительная погрешность измерения напряжения:

$$\delta = \frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta m}{2m} = \frac{0,001}{0,025} + \frac{0,001}{0,100} + \frac{0,001}{2 \cdot 0,005} = 0,15.$$

Таким образом, расчетное значение относительной погрешности $\delta = 15\%$, тогда абсолютная погрешность измерения напряжения $\Delta U = \delta \cdot U = 0,15 \cdot 15,3 = 2,3$ кВ. Окончательный результат измерения напряжения пьезогенератора с погрешностью, вычисленной по формуле: $U = 15 \pm 2$ кВ. Основной вклад в это значение погрешности при малых расстояниях между пластинами конденсатора вносит измерение расстояния d линейкой с миллиметровыми

делениями, а при больших расстояниях — измерение силы взаимодействия электронными весами, отградуированными в единицах массы с точностью 1 г.

Вывод: использованные в эксперименте измерительные приборы не позволяют получить более точный результат, чем $U = 15 \pm 2$ кВ, который близок к тому, который получается по среднему значению $U = 15,3 \pm 0,3$ кВ.

5. *Измерение силы весами.* Если весы включаются после того, как на них поставлена нижняя пластина конденсатора, то вес тела, находящегося на их чашке, обнуляется, и дисплей показывает нуль. При подаче напряжения на конденсатор весы показывают отрицательные значения. Значит, вес нижней пластины конденсатора уменьшается, а это происходит потому, что она притягивается к верхней пластине. Таким образом, в опыте весы показывают величину, равную уменьшению веса нижней пластины, выраженную в единицах массы и соответствующую силе притяжения нижней пластины конденсатора к верхней.

Ответы на контрольные вопросы

1. *Напряжение на конденсаторе.* Электрическое напряжение — это разность потенциалов между двумя точками поля или отношение работы по перемещению точечного заряда из одной точки поля в другую к величине этого заряда. Если расстояние между пластинами конденсатора увеличить в 3 раза, то его емкость $C = \epsilon_0 \epsilon S/d$ уменьшится в 3 раза, а напряжение на конденсаторе возрастет в 3 раза, так как по определению $C = q/U$ и при $q = \text{const}$ напряжение $U = q/C$.

2. *Емкость конденсатора.* Электрическая емкость конденсатора равна отношению заряда q каждой из его пластин к напряжению U между ними $C = q/U$. Емкость конденсатора зависит от отношения заряда к напряжению, поэтому она никак не изменится, поскольку увеличение заряда ведет к пропорциональному увеличению напряжения.

3. *Зависимость емкости от параметров конденсатора.* При изменении площади обкладок и расстояния между ними в одно и то же число раз емкость плоского конденсатора не изменится, так как в формуле для емкости C площадь S и расстояние d находятся в числителе и знаменателе соответственно.

4. *Зависимость емкости от напряжения на конденсаторе.* При увеличении в два раза разности потенциалов $\varphi_2 - \varphi_1$ между обкладками конденсатора его емкость никак не изменится, так как пропорционально напряжению возрастет заряд конденсатора, а емкость $C = q/U$.

5. *Напряженность электрического поля.* В условиях задачи средняя напряженность электрического поля $E = U/d = 15$ кВ/м.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-013-00157. *Acknowledgments:* The reported study was funded by RFBR, project number 20-013-00157.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рублев Ю. В., Куценко А. Н., Кортнев А. В. Практикум по электричеству с элементами программированного обучения. — М.: Высшая школа, 1971. — 312 с.
2. Шефер Н. И. Опыты с пьезозажигалкой // Физика в школе. — 2009. — № 7. — С. 55–60.
3. Мякишев Г. Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, Н. Н. Сотский; под ред. Н. А. Парфентьевой. — М.: Просвещение, 2016. — 416 с.
4. Майер В. В. Пьезоэлектрический источник для опытов по электростатике // Физика в школе. — 1994. — № 6. — С. 43–44.
5. Майер В. В. Электризация давлением в школьном курсе физики // Учебная физика. — 2004. — № 1. — С. 12–21.
6. Майер В. В., Вараксина Е. И. Пьезоэффект и закон сохранения энергии // Учебная физика. — 2017. — № 4. — С. 46–59.
7. Вараксина Е. И., Корнев Ю. А. Пьезогенератор высокого напряжения в проектной деятельности обучающихся // Учебная физика. — 2019. — № 4. — С. 3–11.
8. Вараксина Е. И. Подготовка студентов к проведению доказательного педагогического эксперимента в средней школе // Учебная физика. — 2012. — № 3. — С. 32–49.
9. Майер В. В., Вараксина Е. И., Иванов Ю. В. Современные достижения науки, техники и технологии в физическом практикуме // Учебная физика. — 2020. — № 4. — С. 50–55.