

Лабораторная работа Э-101

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра Физики (ФН-4)

Чуев А.С., Шишанин А.О.

Введение

Электрическое взаимодействие является одним из основных видов фундаментальных взаимодействий, осуществляемых в классической физике посредством электрического поля. Электрическое поле – фундаментальное физическое поле, взаимодействующее с физическими телами, обладающими электрическими зарядами. Электрические поля создаются электрическими зарядами и их системами. Электрический заряд - это физическая величина, характеризующая свойство материальных частиц или тел вступать в электромагнитные силовые взаимодействия.

Понятие электрического заряда и электрического поля, порождаемого зарядами, в электростатике и электродинамике являются первичными, основными понятиями.

Если не все, то большинство физических явлений есть проявления электрических взаимодействий. Проявления электромагнетизма в самых разнообразных физических процессах – механических, тепловых, оптических, атомных и др. – определяют основополагающее место этого раздела в курсе общей физики технического университета. Благодаря электрическим силам существуют атомы и молекулы веществ. Явление трения – есть проявление электрических сил. Магнетизм это релятивистский эффект электрического взаимодействия. Даже силу инерции относят к проявлениям электромагнетизма. Таким образом, глубокое изучение физики электричества закладывает надежный фундамент для дальнейшего освоения большинства технических дисциплин

Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является приобретение студентами практических навыков проведения экспериментов с использованием современных электроизмерительных приборов. По результатам выполнения лабораторной работы студенты смогут на практике оценить выполнение основных законов электростатики на примере воздушного конденсатора с изменяемым зазором между пластинами. Студенты изучат принцип работы и конструктивное устройство измерителя

напряженности электрического поля, исследуют влияние на этот полевой параметр различных факторов. В процессе выполнения работы приобретается или закрепляется практический навык обработки результатов эксперимента с использованием вероятностных параметров.

Краткая характеристика объекта изучения

Электрические поля создаются электрическими зарядами. Имеется два вида электрических зарядов, условно называемых положительными и отрицательными.

Заряд всех элементарных частиц (если он не равен нулю) одинаков по абсолютной величине и его называют элементарным зарядом $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$. Заряд может передаваться от одного тела к другому только порциями, содержащими целое число элементарных зарядов, т.е. электрический заряд тела - дискретная величина:

$$q = \pm ne \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

Физические величины, которые могут принимать только дискретный ряд значений, называются квантованными.

Элементарный заряд e является квантом (наименьшей порцией) электрического заряда.

Одним из фундаментальных законов природы является закон сохранения электрического заряда. В изолированной системе алгебраическая сумма зарядов всех тел остается постоянной

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const} \quad (2)$$

Закон сохранения электрического заряда утверждает, что электрические заряды не создаются и не исчезают, а только передаются от одного тела к другому или передаются внутри данного тела.

Электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Принято считать, что каждое заряженное тело создает в окружающем пространстве электрическое поле. Это поле оказывает силовое действие на другие заряженные тела. Посредством электрического поля тела с одноименными зарядами отталкиваются, а с разноименными - притягиваются. Электростатическое поле не изменяется во времени и создается только электрическими зарядами (или электрическими диполями).

Электростатическое поле отдельного заряда можно обнаружить, если в пространство, окружающее заряд внести другой заряд. Обычно для исследования свойств поля пользуются положительным зарядом, который называют пробным и

обозначают q_{np} . При этом считают, что пробный заряд не искажает изучаемого поля, т.е. пренебрегают его собственным полем. На пробный заряд, помещенный в какую либо точку поля, создаваемого другим зарядом q_0 действует сила

$$F = \frac{q_0 q_{np}}{4 \pi \varepsilon_0 r^2} \quad (3)$$

Если в одну и ту же точку поля вносить разные заряды q_1, q_2, \dots , то на них будут действовать разные силы F_1, F_2, \dots , однако отношение $F_1/q_1 = F_2/q_2, \dots$ для этой точки поля всегда будет постоянным. Поэтому этим отношением можно количественно характеризовать электрическое поле в различных точках. Отношение

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{np}} \quad (4)$$

называют *напряженностью электрического поля*. Таким образом, *напряженность электрического поля* есть силовая характеристика электрического поля. Для определенной точки поля она равна отношению силы, действующей на пробный заряд, к величине этого пробного заряда.

Эту же физическую величину можно определить и со стороны электрического заряда, создающего поле (принятое допущение, точечного). В этом случае *напряженность электрического поля* определится выражением:

$$\vec{E} = \frac{q_0}{4 \pi \varepsilon_0 r^2} \vec{e}_r, \quad (5)$$

где: q_0 - заряд, создающий электрическое поле; r - расстояние от заряда q_0 до точки, в которой определяется напряженность; ε_0 - электрическая постоянная; \vec{e}_r - единичный вектор по направлению радиус-вектора, соединяющего заряд q_0 и точку поля, в которой определяется напряженность. Единица измерения напряженности - *вольт на метр* (В/м). Размерность *напряженности* – $\text{LMT}^{-3}\text{I}^{-1}$.

Напряженность - величина векторная. За направление вектора напряженности \vec{E} принимают направление силы, с которой поле действует на пробный заряд, помещенный в данную точку поля.

Напряженность - силовая характеристика поля; она численно равна силе, действующей на единичный положительный заряд.

Электрическое поле графически удобно представлять силовыми линиями.

Силовыми линиями или линиями напряженности поля называют линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с вектором напряженности в данной точке поля (рис.1).

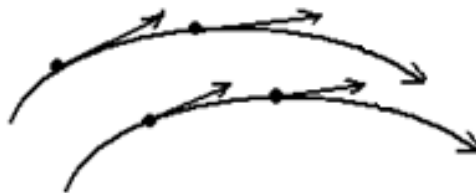


Рис. 1. Силовые линии поля

Линии напряженности электростатического поля никогда не могут быть замкнуты сами на себя. Они имеют обязательно начало и конец, либо уходят в бесконечность.

Условились считать, что линии напряженности электрического поля направлены от положительного заряда к отрицательному, т.е. они выходят из положительного заряда, а входят в отрицательный. Линии напряженности никогда не пересекаются. Пересечение линий означало бы отсутствие определенного направления вектора напряженности электрического поля в точке пересечения. Густотой линий напряженности характеризуют величину напряженности поля. В местах, где напряженность поля меньше, линии расположены реже.

Электростатическое поле, во всех точках которого напряженность поля одинакова по модулю и направлению ($\vec{E} = const$), называют однородными. Примером такого поля может быть электрическое поле плоского конденсатора вдали от краев его обкладок.

Если с помощью пробного заряда исследуется электрическое поле, создаваемое несколькими заряженными телами, то результирующая сила оказывается равной геометрической сумме сил, действующих на пробный заряд со стороны каждого заряженного тела в отдельности. Следовательно, напряженность электрического поля, создаваемого системой зарядов в данной точке пространства, равна векторной сумме напряженностей электрических полей, создаваемых в той же точке зарядами в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots \quad (6)$$

Из принципа суперпозиции следует, что при наложении полей они не оказывают никакого влияния друг на друга. Благодаря принципу суперпозиции для нахождения напряженности поля системы заряженных частиц в любой точке достаточно знать выражение (5) для напряженности поля точечного заряда.

При перемещении пробного заряда $q_{пр}$ в электрическом поле электрические силы совершают работу.

Работа сил электростатического поля при перемещении заряда из одной точки в другую не зависит от формы траектории, а определяется только положением начальной и конечной точек и величиной заряда.

Следствием независимости работы от формы траектории является следующее утверждение: работа сил электростатического поля при перемещении заряда по любой замкнутой траектории равна нулю. Силовые поля, обладающие этим свойством, называют потенциальными или консервативными.

Свойство потенциальности электростатического поля позволяет ввести понятие потенциальной энергии заряда в электрическом поле. Для этого в пространстве выбираются некоторая точка (0), и потенциальная энергия заряда q_0 , помещенного в эту точку, принимается равной нулю.

Потенциальная энергия заряда, помещенного в любую точку (1) пространства, относительно фиксированной точки (0) равна работе A_{10} , которую совершит электростатическое поле при перемещении заряда q_1 из точки (1) в точку (0):

$$W_{p1} = A_{10} \quad (7)$$

Работа, совершаемая электростатическим полем при перемещении точечного заряда q_1 из точки (1) в точку (2), равна разности значений потенциальной энергии в этих точках и не зависит от пути перемещения заряда и от выбора точки (0).

$$A_{12} = W_{p1} - W_{p2} \quad (8)$$

Физическую величину, равную отношению потенциальной энергии электрического заряда в электростатическом поле к величине этого заряда, называют *потенциалом* φ электрического поля:

$$\varphi = \frac{W_p}{q} \quad (9)$$

Единица потенциала электрического поля - *вольт* (В). $1В = \frac{Дж}{1Кл}$. Потенциал

φ является энергетической характеристикой электростатического поля. Это скалярная величина. Потенциал может принимать положительные или отрицательные значения. Размерность *электрического потенциала* – $L^2MT^{-3}I^{-1}$.

Взаимосвязь напряженности и электрического потенциала следующая:

$$\vec{E} = -grad\varphi. \quad (10)$$

Работа A_{12} по перемещению электрического заряда q из начальной точки (1) в конечную точку (2), равна произведению величины заряда на разность потенциалов начальной и конечной точек:

$$A_{12} = W_{p1} - W_{p2} = q\varphi_1 - q\varphi_2 = q(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (11)$$

Потенциал поля в данной точке пространства равен работе, которую совершают электрические силы при удалении единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность:

$$\varphi_{\infty} = \frac{A_{\infty}}{q} \quad (12)$$

Потенциал электрического поля, по аналогии с напряженностью, может быть определен и со стороны точечного заряда, создающего электрическое поле в точке, удаленной на заданное расстояние от этого заряда. В этом случае потенциал определяется следующим образом:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (13)$$

Эта формула справедлива при условии, что при $r \rightarrow \infty$ потенциал стремится к нулю.

Графически электрическое поле можно изображать не только с помощью линий напряженности, но и с помощью эквипотенциальных поверхностей.

Поверхность, во всех точках которой потенциал электростатического поля имеет одинаковые значения, называется эквипотенциальной поверхностью или поверхностью равного потенциала. Эквипотенциальные поверхности точечного заряда представляют собой концентрические сферы.

Силовые линии электростатического поля всегда перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

Электрическое поле диполя. Поле внутри диэлектрика.

Электрические поля, создаваемые или ослабляемые диполями, имеют свои особенности. Электрическое дипольное поле очень похоже на дипольное магнитное поле. На рис.2 приведены изображения дипольных полей и математические выражения, определяющие модули силовых векторов.

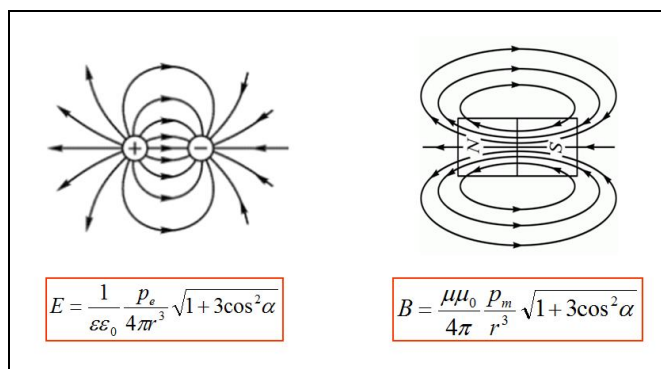


Рис.2. Электрическое и магнитное дипольные поля

Для электрического диполя радиальная и угловая составляющие электрического поля определяются выражениями.

$$E_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p \cos \alpha}{r^3}; \quad E_\theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p \sin \alpha}{r^3}. \quad (14)$$

В этих выражениях p - модуль *электрического дипольного момента*, физической величины, характеризующей каждый отдельный диполь. *Электрический дипольный момент* - это вектор $\vec{p} = q\vec{l}$, равный произведению зарядов диполя на расстояние между ними. Положительным направлением *электрического дипольного момента* условились считать направление от отрицательного заряда к положительному. Все диэлектрики в электрическом поле поляризуются, то есть приобретают *электрические дипольные моменты* (рис. 3) или определенным образом ориентируют свои имеющиеся элементарные дипольные моменты (рис. 4).

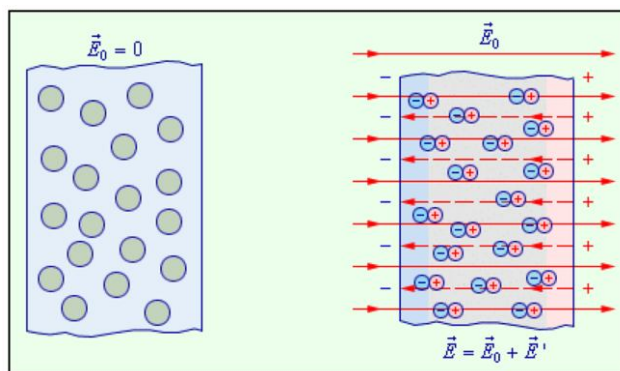


Рис.3 Поляризация неполярного диэлектрика

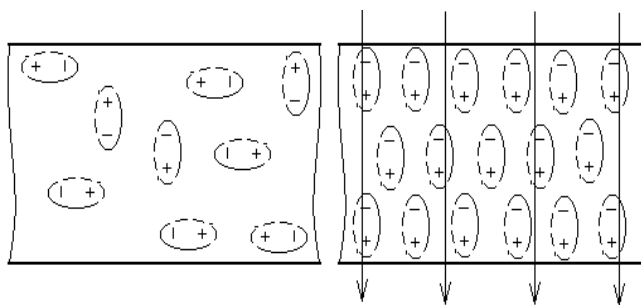


Рис.4. Поляризация полярного диэлектрика

Тем самым диэлектрики подразделяются на полярные и неполярные. Молекулы неполярных диэлектриков приобретают *электрические дипольные моменты* лишь под влиянием внешнего электрического поля (рис.3). Полярные диэлектрики имеют полярное строение молекул и в отсутствии внешнего электрического поля (рис. 4).

Поляризованные диэлектрики, в свою очередь, оказывают влияние на внешнее электрическое поле, местами усиливая или ослабляя его. Характер этого влияния сильно зависит от формы диэлектрика. Внутри диэлектрика внешнее поле в основном только ослабляется.

Ослабление внешнего электрического поля или собственное поле внутри поляризованного диэлектрика принято описывать вектором *поляризованности* \vec{P} . *Поляризованность* представляет собой объемную плотность суммарного *электрического дипольного момента*, образуемого всеми элементарными диполями данного диэлектрика.

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{P}_i}{V} \quad (15)$$

Теорема Гаусса для вектора \vec{P} в интегральной форме:

$$\oint \vec{P} d\vec{S} = -q', \quad (16)$$

где: q' - алгебраическая сумма связанных зарядов внутри замкнутой поверхности S.

Теорема Гаусса для вектора \vec{P} в дифференциальной форме:

$$\text{div} \vec{P} = -\rho', \quad (17)$$

где: ρ' - объемная плотность связанных зарядов.

Граничные условия для вектора \vec{P} :

$$P_n = \sigma', \quad (18)$$

где: σ' - поверхностная плотность связанных зарядов, P_n - нормальная составляющая вектора \vec{P} .

Кроме напряженности поля \vec{E} и поляризованности \vec{P} для описания электрического поля применяют вектор *электрической индукции* \vec{D} , называемой также *электрическим смещением* (название дал Максвелл). Единица измерения *электрической индукции* Кл/м², размерность – L⁻²TI.

Соотношения между собой трех электрических векторных величин следующие:

$$\vec{P} = \chi_e \vec{E} \quad (19)$$

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E} \quad (20)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}. \quad (21)$$

В этих формулах:

ϵ - *относительная диэлектрическая проницаемость* диэлектрика;

ϵ_0 - *электрическая постоянная*, измеряется в Ф/м, размерность - L⁻³T⁴M⁻¹I².

$\chi_e = (\epsilon - 1)$ - *диэлектрическая восприимчивость* диэлектрика.

Следует особо отметить, что в формулах (19)-(21) E – это напряженность электрического поля *внутри* диэлектрика, то есть остаток внешнего поля $E_0 = D/\epsilon_0$ после ослабления последнего за счет поляризации диэлектрика.

Поле вектора \vec{D} не зависит от параметров диэлектрика (рис.5).

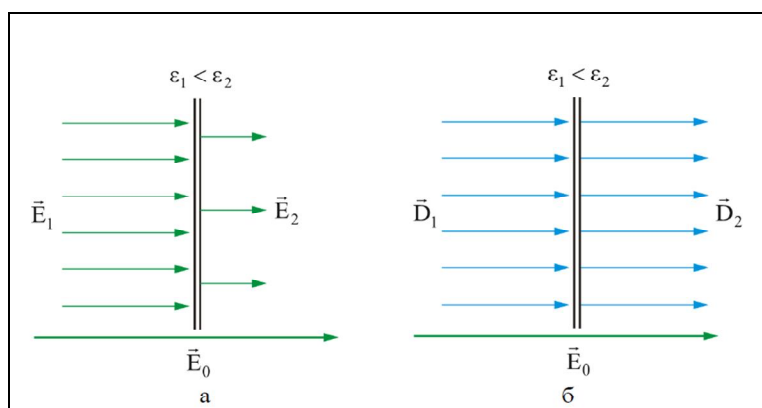


Рис.5. Различие полей электрических векторов \vec{E} и \vec{D}

Характер сложного влияния формы диэлектрика на внешнее и внутренне электрическое поле можно понять из представленных ниже рисунков рис. 6 и рис. 7.

Наиболее верный путь определения результирующего электрического поля, как внутри, так и вне диэлектрика, – применение принципа суперпозиции.

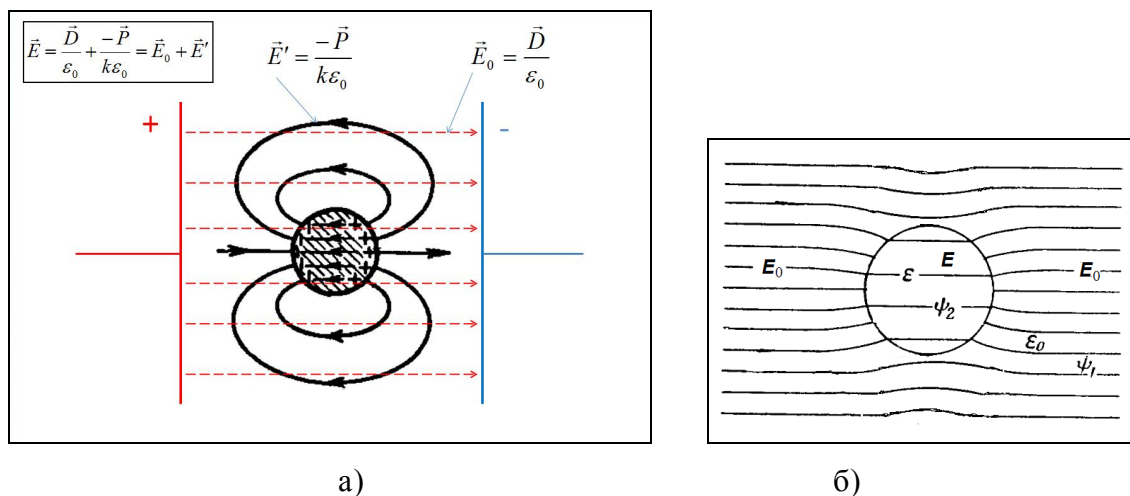


Рис.6. Составляющие а) и результат суперпозиции б) двух полей

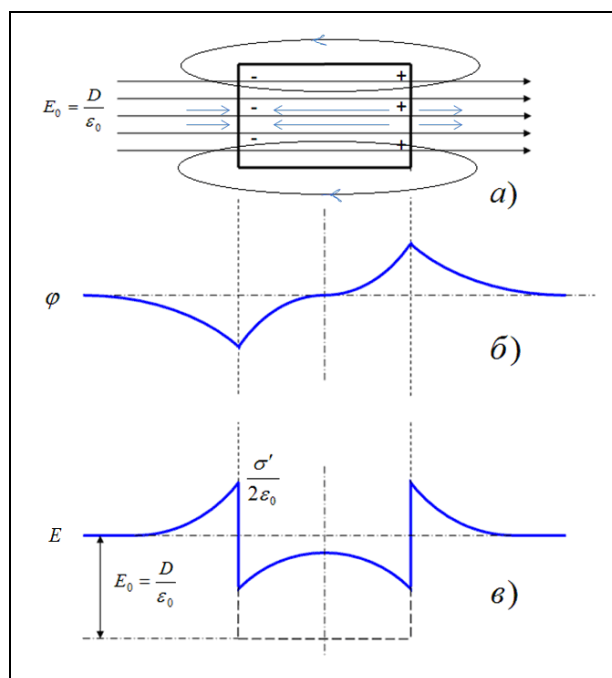


Рис.7. Характер изменения потенциала и напряженности поля для цилиндрического диэлектрика, ориентированного по оси во внешнем поле

Схема и описание лабораторной установки

Натурное изображение лабораторной установки, функциональная схема, узлы стыковки и регулировки измерителя электрического поля (ИЭП), а также принцип его работы приведены на рис.8 – рис.11.

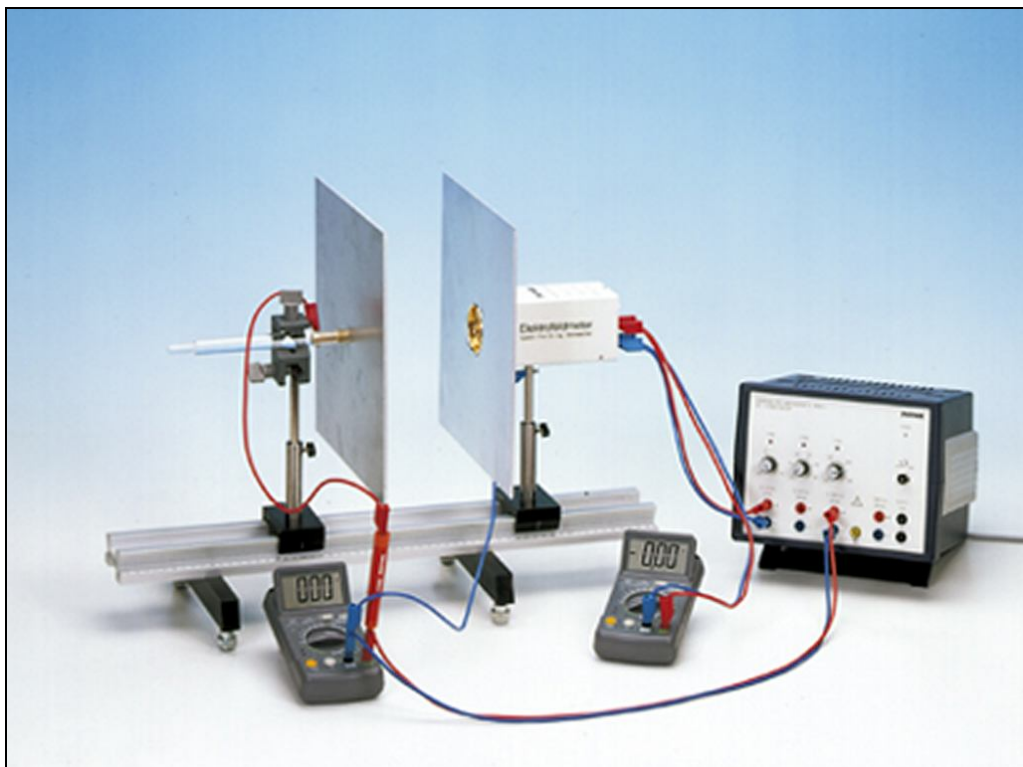


Рис. 8. Лабораторная установка

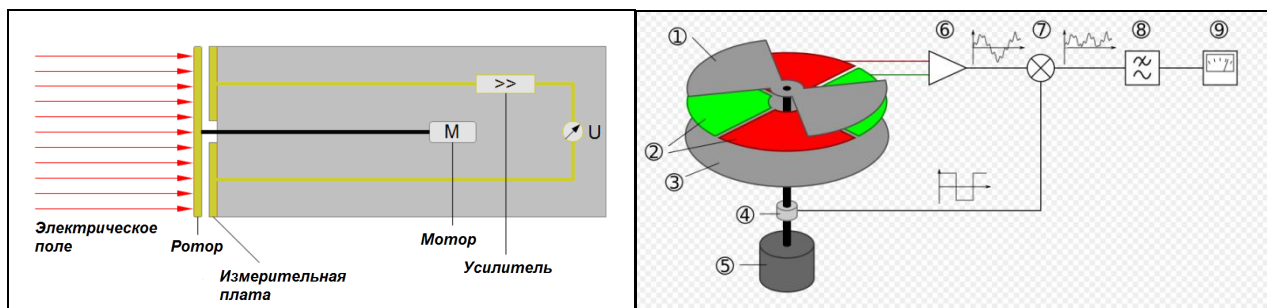


Рис. 9. Функциональная схема измерителя электрического поля (ИЭП)

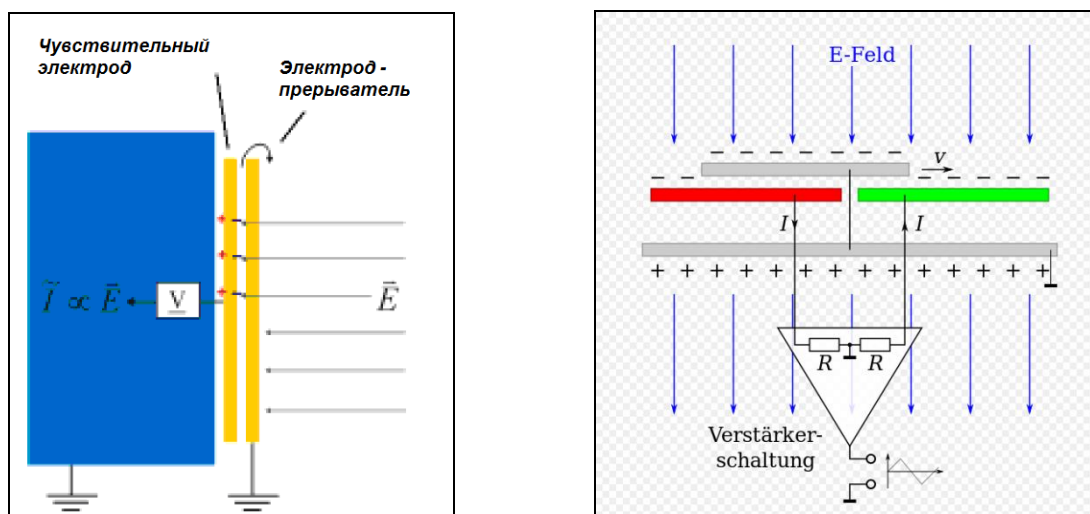


Рис. 10. Принцип работы измерителя электрического поля (ИЭП)

На свободную (от ИЭП) пластину конденсатора через большое электрическое сопротивление (10 МОм) от источника питания подается высокое напряжение до 200 В. Сопротивление 10 МОм необходимо для обеспечения безопасности проведения работ. Высокое напряжение измеряется цифровым вольтметром с диапазоном показаний до 1000 В.

К другой пластине конденсатора, соединяемой с «землей», крепится ИЭП, на который подается электрическое питание напряжением 12 В. Принцип работы ИЭП основан на измерении разности электрического потенциала двух рядом расположенных электродов. Силовые линии поля подходят под прямым углом к измерительной головке ИЭП. Перед измерительными электродами ИЭП расположен электрически заземленный прерыватель поля, выполненный в виде вращающейся крыльчатки, периодически закрывающей окна-щели в корпусе измерительной головки ИЭП. На измерительных электродах поочередно индуцируется заряд, периодически изменяющийся от нуля до максимального значения с частотой, определяемой вращением крыльчатки. Переменный сигнал для создания лучшей помехозащищенности, усиливается и затем преобразуется в постоянный. Тем самым на выходе усилителя образуется постоянное напряжение, которое пропорционально напряженности измеряемого поля. Выходной сигнал не должен превышать 8-10 вольт иначе линейная связь входного и выходного сигналов не обеспечивается.

Ручки регулировки ИЭП показаны на рис.11. Установка нуля производится с помощью регулятора 2. Переключение измеряемых диапазонов производится кнопкой 6. Выходной сигнал снимается с клеммы 3.

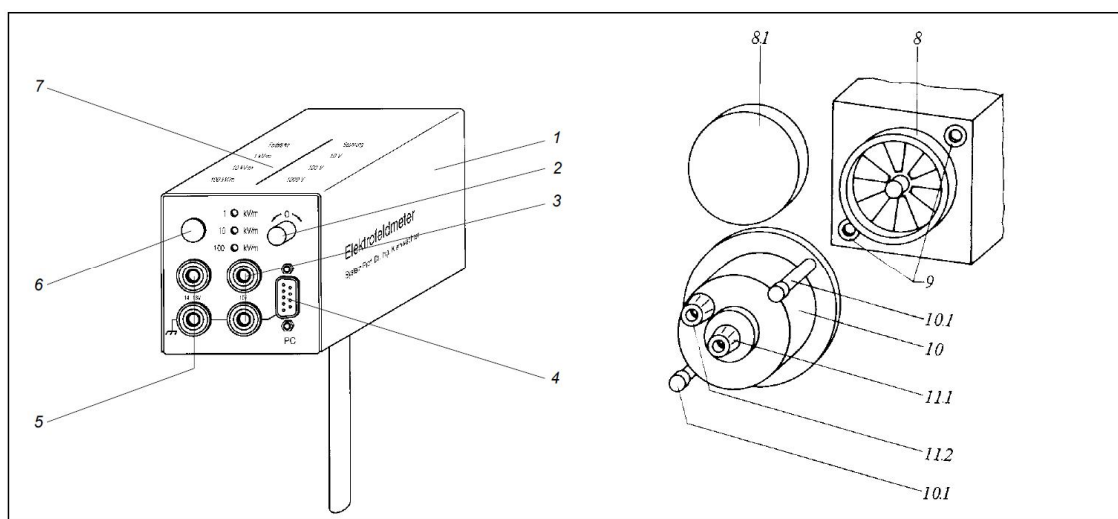


Рис.11. Стыковочные узлы, разъемы и ручки регулировки ИЭП.

1- корпус; 2 - установка нуля; 3 - выход; 4 – разъем подключения компьютера;
5 – питание; 6 – кнопка переключения диапазонов измерения

Задачи и порядок выполнения лабораторной работы

При выполнении работы необходимо строго соблюдать требования по технике безопасности и охране труда, установленные на рабочем месте студента в лаборатории. Блок-схема установки приведена на рис.13. **При работе установки используется высокое напряжение в сотни вольт, поэтому требуется особая осторожность при выполнении работы!**

Эквивалентная электрическая схема конденсатора, используемая в расчетном задании к данной работе (Приложение 2), приведена на рис. 12.

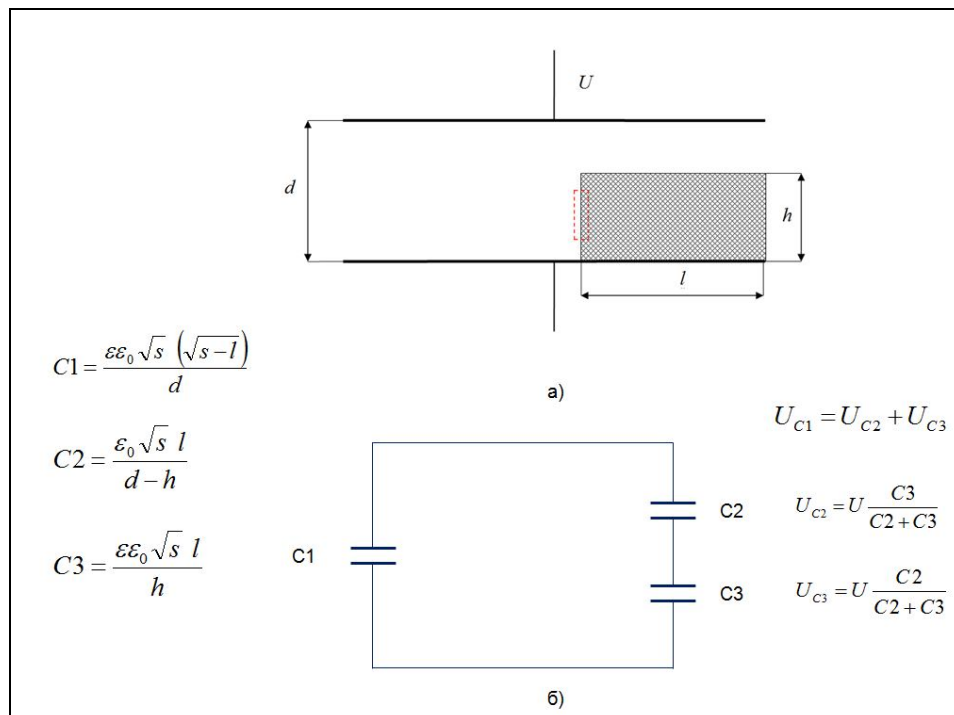


Рис.12. Конденсатор с частичным заполнением диэлектриком

Подготовка лабораторной установки к работе. Проверить соединения лабораторной установки на соответствие рис.13 и получить разрешение на подключение приборов к сети электропитания. Включить источник питания ИП при нулевых показаниях ручек регулировок на его лицевой стороне.

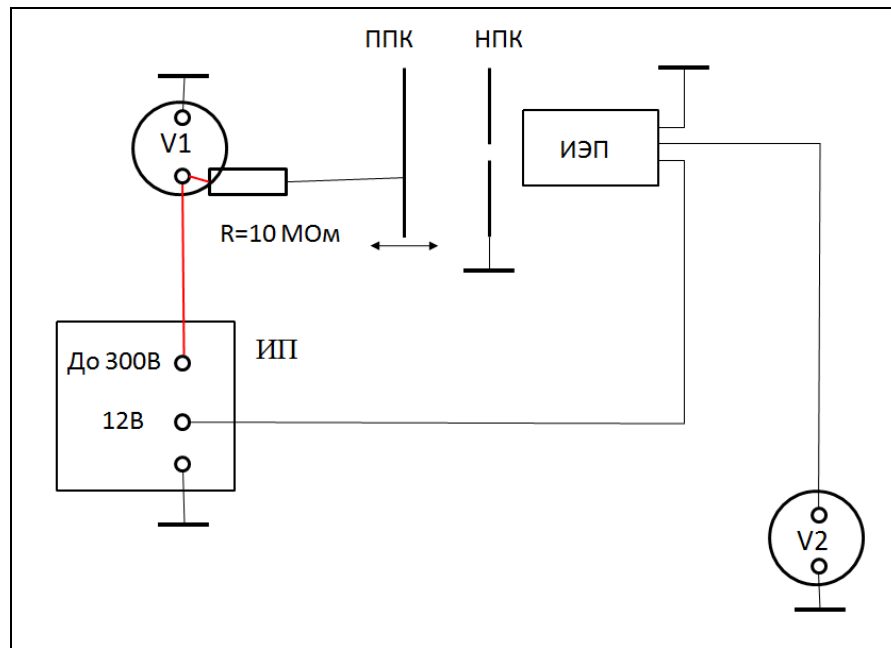


Рис. 13. Блок-схема установки: ИП – источник питания; НПК – неподвижная пластина конденсатора; ППК – подвижная пластина конденсатора; ИЭП – измеритель электрического поля; R – защитный резистор 10 МОм; $V1$, $V2$ – вольтметры.

Установить диапазон измерения вольтметра $V1$, подключенного к высоковольтной пластине конденсатора, 1000 В; диапазон измерения вольтметра $V2$, подключенного к выходу ИЭП, 20 В. Вольтметры должны быть настроены на измерение постоянного напряжения.

Установить ручку регулировки напряжения источника питания ИП для ИЭП в крайнее правое положение (12 В). Высокое напряжение на конденсатор не подавать. Произвести установку нуля выходного сигнала ИЭП (ручка 2 рис.11). При установке нуля индикатор чувствительности ИЭП должен показывать 1 кВ/м.

Задание 1. Установив требуемый уровень высокого напряжения на незаземленной пластине конденсатора, снять зависимость выходного сигнала ИЭП от рабочего зазора между пластинами. Рабочий зазор L изменять в диапазоне (25 – 300) мм с шагом ~ 25 мм. **Измерения рекомендуется начинать с больших зазоров, перемещая ППК к НПК.** Провести измерения при трех значениях напряжения (100, 150 и 200 В). При измерениях число значащих цифр должно быть не менее трех. При превышении выходного сигнала ИЭП более 8-10 В производить переключение режима работы ИЭП (кнопка 6 рис.11). На режиме 10 кВ/м множитель для показаний вольтметра 10, на режиме 100 кВ/м – 100. Результаты измерений оформить по типу таблицы 1. По этим данным построить графики зависимости $E(L)$. Одновременно

для сравнения привести графики теоретических зависимостей $E = U/L$. Дать оценку возможных причин расхождения теоретических и экспериментальных данных.

Таблица 1. Показания вольтметра V2 в вольтах при замерах напряженности электрического поля конденсатора. 10 В соответствуют напряженности 1 кВ/м.

[illegible]

Свободные ячейки использовать для теоретических и расчетных данных E (кВ/м).

Задание 2. Установив определенное значение рабочего зазора между пластинами конденсатора (начиная ~ с 50 мм), изменением уровня высокого напряжения на незаземленной пластине конденсатора от (0 до 300 В), снять зависимость от этого напряжения выходного сигнала ИЭП. Измерения провести для трех значений рабочего зазора между пластинами конденсатора (~50, 75 и 100 мм). При измерениях число значащих цифр должно быть не менее трех. Результаты измерений оформить по типу таблицы 2. По этим данным построить графики зависимости $E(U)$. Одновременно для сравнения привести графики теоретических зависимостей.

Таблица 2. Показания вольтметра V2 в вольтах при замерах напряженности электрического поля конденсатора. 10 В соответствуют напряженности 1 кВ/м.

[illegible]

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

ПРИМЕЧАНИЕ: При выполнении заданий 1 и 2 обращать внимание на соблюдение параллельности расположения пластин конденсатора относительно друг друга.

Задание 3. Для трех значений рабочего зазора между пластинами конденсатора (согласно табл.2), с учетом геометрических размеров пластин, определить емкость конденсатора и расчетное значение электрического заряда на нем. По теоретическим данным и данным табл. 2 для $L = 75$ мм построить экспериментальный и теоретический графики зависимости заряда от напряжения. Оценить линейность экспериментальной зависимости по методике приложения 1.

Задание 4. По исходным данным, выдаваемым преподавателем каждому студенту персонально, рассчитать напряженность электрического поля в конденсаторах эквивалентной схемы по рис.1 приложения 2. Дать оценку циркуляции вектора E в различных местах внутри конденсатора.

Задание 5. Определить качественное влияние на показания ИЭП диэлектрической пластины, вводимой между пластинами конденсатора.

Требования к обработке результатов эксперимента

Результаты выполнения заданий 1-3 изображать в виде таблиц и графиков. Графики выполнять на миллиметровой бумаге. При обработке результатов эксперимента производить оценку полученных зависимостей на линейность (см. Приложение 1) и их отличие от теоретических зависимостей.

Форма отчета по лабораторной работе

Форма отчета по лабораторной работе должна соответствовать общепринятым на кафедре «Физика» требованиям. Предварительный отчет, подготавливаемый студентом до выполнения лабораторной работы, должен включать: наименование и номер лабораторной работы, краткое изложение цели работы, основные теоретические сведения по теме лабораторной работы, письменный ответ на пять контрольных вопросов методички, схему лабораторной установки с обозначениями и расшифровкой позиций, заготовки таблиц для размещения данных. Окончательный отчет должен включать раздел по обработке экспериментальных данных с выполнением необходимых расчетов и заключение или выводы по работе. Выводы должны отражать достижение поставленных целей.

Способы и средства контроля знаний студента

Для допуска к лабораторной работе студент предъявляет преподавателю предварительно оформленный отчет и демонстрирует знание теории по теме лабораторной работы и методике ее выполнения. В качестве средства контроля знаний студентов по данной работе используются следующие контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Знать единицы измерения и уметь определять размерности (в системе СИ) физических величин по данной теме (потенциал, напряженность, индукция электрического поля, электрическая проницаемость и др.). Знать основные взаимосвязи электромагнитных величин.
2. Как определяется работа, совершаемая полем при перемещении зарядов? Эквипотенциальные линии и поверхности поля. Почему вектор \mathbf{E} в каждой точке эквипотенциальной поверхности расположен по нормали к ней?
3. Характеристики потенциального поля. Какие виды полей Вы еще знаете?
4. Электрический диполь и его поведение в поле. Крутящий момент сил и энергия диполя в электрическом поле.
5. Теорема Гаусса для электрического поля. Дифференциальная форма уравнения. Теорема о циркуляции вектора \mathbf{E} .
6. Уравнение Пуассона и уравнение Лапласа для электрического поля.
7. Поведение векторов \mathbf{E} и \mathbf{D} на границе раздела двух диэлектрических сред. Граничные условия для вектора \mathbf{P} .
8. Индуцированные заряды и их свойства. Проводники и диэлектрики во внешнем поле. Поляризованность диэлектрика (вектор \mathbf{P}), диэлектрическая восприимчивость. Взаимосвязь векторов \mathbf{D} , \mathbf{E} и \mathbf{P} .
9. Связь поверхностной плотности индуцированных зарядов с вектором \mathbf{P} . Теорема Гаусса для поля вектора \mathbf{P} , дифференциальная форма записи этой теоремы.
10. Принцип работы измерителя электрического поля (ИЭП).

Оценка выполнения лабораторной работы

В соответствии с балльной рейтинговой системой, действующей на кафедре «Физика», каждая лабораторная работа оценивается в **3 рейтинговых балла**. Итоговая оценка учитывает уровень подготовки студента к работе, качество ее выполнения, а также качество и своевременность ее защиты.

За допуск к лабораторной работе и ее выполнение – 1 балл. При отсутствии заготовленной формы отчёта или незнании ответов на контрольные вопросы – студент к выполнению лабораторных работ не допускается.

За безошибочное выполнение, качественное оформление и понимание существа лабораторной работы – 1 балл. Если отчет имеет ошибки, неправильно (включая, небрежно) оформлен или студент не понимает существа выполненной работы и не способен объяснить полученные результаты, ставится – **0 баллов**. Студенту, выполнившему лабораторную работу, предоставляется возможность повторного ее выполнения и исправления отчёта.

За защиту лабораторной работы, проводимой в форме устных вопросов и ответов по теме или тестирования (в течение 10 минут, 3 вопроса, мин. оценка – **0 баллов**, макс. оценка – **1 балл** (при этом студенту предоставляется возможность пройти процедуру защиты повторно). Защита лабораторной работы спустя два месяца с момента ее выполнения не принимается.

Лабораторная работа считается выполненной, если студент её защитил и получил в сумме **не менее 2-х баллов**.

Студенты, допущенные к защите, но не набравшие установленного минимума баллов, могут быть допущены к повторной защите в сроки, установленные кафедрой.

Литература основная

1. Мартинсон Л.К, Морозов А.Н., Смирнов Е.В. Электромагнитное поле: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 422 с.
2. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. Изд. 9-е испр.– М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2014. – 319 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: В 5 кн.: Кн. 2: Электричество и магнетизм: Учеб. Пособие для втузов. – М.: «Издат. АСТ». 2006. – 336 с.

Литература дополнительная

1. Ландау Л.Д. и Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том 8. Электродинамика сплошных сред. – М.: ФИЗМАТЛИТ. 1988. 652 с.
2. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм: Учеб. пособие. Москва, Высш. Школа, 1983. 463 с.
3. Калашников С.Г. Электричество. Учебное пособие. 5-е изд. Москва, Наука, Главная редакция Ф-МЛ, 1985. (Общий курс физики), 576 с.

Приложение 1

Статистическая обработка экспериментальных данных

Как правило, эксперимент проводится для того, чтобы подтвердить или отвергнуть какую-либо теоретическую зависимость между опытными величинами. Если характер функциональной зависимости подтверждается опытом, возникает необходимость подобрать такие коэффициенты в уравнении этой связи, которые в наилучшей степени соответствуют опытным данным. Эти задачи решаются стандартными методами корреляционного и регрессионного анализа [*]. Здесь же кратко рассмотрим процедуру обработки данных и приведем основные термины и формулы.

Пусть между двумя опытными величинами x и y теоретически ожидается линейная зависимость вида:

$$y = A_0 + A_1 x,$$

называемая уравнением линейной регрессии. Коэффициенты A_0 и A_1 называют коэффициентами регрессии. Для проверки линейной связи между x и y по опытным данным вычисляют коэффициент корреляции

$$r = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) / \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

и связанный с ним параметр

$$T = |r| \sqrt{(n-2)/(1-r^2)}.$$

Здесь n - число экспериментальных точек. x_i и y_i - результаты i -го измерения (координаты i -й экспериментальной точки на графике), \bar{x} и \bar{y} - средние значения координат, определяемые формулами

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n; \quad \bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n$$

Значения r лежат в пределах $-1 < r < 1$. Большим значениям $|r|$ соответствует более строгая линейность, при $|r| = 1$ зависимость абсолютно линейна, при $r = 0$ линейная связь отсутствует. При $r > 0$ y увеличивается с ростом x , при $r < 0$ - уменьшается.

С помощью параметра T определяют вероятность соблюдения линейной зависимости. Если $T > t_{P,\nu}$ - коэффициента Стьюдента для доверительной вероятности P и числа степеней свободы $\nu = n - 2$, то зависимость имеет место с вероятностью большей или равной P .

Число экспериментальных точек n должно быть не меньше 3, иначе вопрос о линейности теряет смысл. Регрессионная зависимость признается существующей, если $P \approx 1$ (обычно, если $P > 0,9...0,999$).

Для проведения наилучшей прямой через экспериментальные точки вычисляют коэффициенты регрессии

$$A_1 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) / \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 ; \quad A_0 = \bar{y} - A_1 \bar{x}.$$

Эта прямая соответствует уравнению линейной регрессии. Она проходит через точку с координатами \bar{x}, \bar{y} и характеризуется тем, что сумма квадратов отклонений экспериментальных точек от этой прямой минимальна.

* Ерквич С.П. Применение регрессионного и корреляционного анализа для исследования зависимостей в физическом практикуме. – М.: Изд-во МГТУ, 1994. – 13 с.

Приложение 2.

Задача на расчет конденсатора.

Первый тип задач. Плоский конденсатор с квадратными пластинами частично заполнен диэлектриком, как это изображено на рисунке.

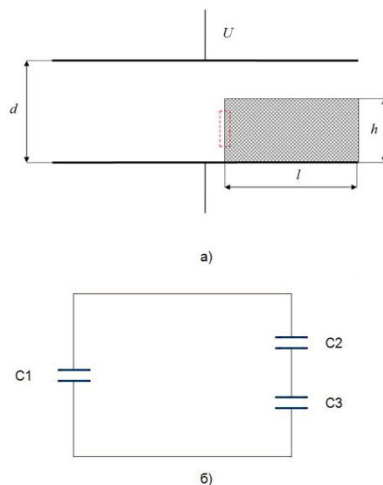


Рис.1. Конденсатор с диэлектриком и эквивалентная схема.

Определите напряженность электрического поля и электрическое смещение внутри разных частей конденсатора, если площадь пластин S , диэлектрическая проницаемость диэлектрика ϵ , по одной стороне конденсатора диэлектрик заполняет всю сторону, остальные условия представлены в различных вариантах согласно таблице 1.

Таблица 1.

№	Условия до заполнения конденсатора диэлектриком	Соотношение размеров		Примечание
1	Сообщен заряд Q и отключен от источника питания	$l = 0,5\sqrt{S}$	$h = 0,5d$	$C_{\Sigma} = \frac{\varepsilon_0 S}{d} \left[\frac{1+3\varepsilon}{2(1+\varepsilon)} \right]$
2	Поддерживается напряжение $U = \text{const}$	$l = 0,5\sqrt{S}$	$h = 0,5d$	
3	Сообщен заряд Q и отключен от источника питания	$l = \sqrt{S}$	$h = 0,5d$	$C_{\Sigma} = \frac{\varepsilon_0 S}{d} \left[\frac{2\varepsilon}{(1+\varepsilon)} \right]$
4	Поддерживается напряжение $U = \text{const}$	$l = \sqrt{S}$	$h = 0,5d$	
5	Сообщен заряд Q и отключен от источника питания	$l = 0,5\sqrt{S}$	$h = d$	$C_{\Sigma} = \frac{\varepsilon_0 S}{d} \left[\frac{(1+\varepsilon)}{2} \right]$
6	Поддерживается напряжение $U = \text{const}$	$l = 0,5\sqrt{S}$	$h = d$	
7	Сообщен заряд Q и отключен от источника питания	$l = 0,75\sqrt{S}$	$h = 0,5d$	$C_{\Sigma} = \frac{\varepsilon_0 S}{d} \left[\frac{1}{4} + \frac{3\varepsilon}{2(1+\varepsilon)} \right]$
8	Поддерживается напряжение $U = \text{const}$	$l = 0,75\sqrt{S}$	$h = 0,5d$	
9	Сообщен заряд Q и отключен от источника питания	$l = 0,5\sqrt{S}$	$h = 0,25d$	$C_{\Sigma} = \frac{\varepsilon_0 S}{d} \left[\frac{1}{2} + \frac{2\varepsilon}{(3+\varepsilon)} \right]$
10	Поддерживается напряжение $U = \text{const}$	$l = 0,5\sqrt{S}$	$h = 0,25d$	

Окончательные ответы не должны содержать символов l и h .

Второй тип задач

1. Первоначально пространство между обкладками плоского конденсатора заполнено воздухом, и напряженность электрического поля в зазоре равняется E_0 . Затем весь зазор заполнили однородным диэлектриком с проницаемостью ε . Каковы будут напряженность и электрическое смещение внутри конденсатора, если: а) напряжение между обкладками не менялось; б) заряды на обкладках оставались неизменными. Ответы: а) E_0 , $\varepsilon_0 \varepsilon E_0$; б) E_0 / ε , $\varepsilon_0 E_0$.

2. Первоначально пространство между обкладками плоского конденсатора заполнено воздухом, и напряженность электрического поля в зазоре равняется E_0 . Затем левую половину зазора заполнили однородным диэлектриком с проницаемостью ε . Найти модули векторов напряженности и смещения в обеих частях зазора, если: а)

напряжение между обкладками не менялось; б) заряды на обкладках оставались неизменными.

Ответы: а) $E_1 = E_2 = E_0$; $D_1 = \varepsilon\varepsilon_0 E_0$ (диэлектрик); $D_2 = \varepsilon_0 E_0$ (воздух);

$$\text{б) } E_1 = E_2 = E_0 \frac{2}{1+\varepsilon}; \quad D_1 = \varepsilon_0 E_0 \frac{2\varepsilon}{1+\varepsilon} \text{ (диэлектрик); } D_2 = \varepsilon_0 E_0 \frac{2}{1+\varepsilon} \text{ (воздух).}$$

3. Первоначально пространство между обкладками плоского конденсатора заполнено воздухом, и напряженность электрического поля в зазоре равняется E_0 . Затем нижнюю половину зазора заполнили однородным диэлектриком с проницаемостью ε .

Найти модули векторов напряженности и смещения в обеих частях зазора, если: а) напряжение между обкладками не менялось; б) заряды на обкладках оставались неизменными.

Ответы: а) $E_1 = E_0 \frac{2}{1+\varepsilon}$ (диэл.), $D_1 = D_2 = \varepsilon_0 E_0 \frac{2\varepsilon}{1+\varepsilon}$ (диэл.);

$$E_2 = E_0 \frac{2\varepsilon}{1+\varepsilon} \text{ (воздух); } \quad \text{б) } E_1 = E_0 / \varepsilon, \quad D_1 = D_2 = \varepsilon_0 E_0; \quad E_2 = E_0.$$