



**Московский государственный университет им.
М.В.Ломоносова**

Лабораторный практикум по общей физике

Электричество и магнетизм

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

МОСКВА 2008

1. Введение

Как хорошо известно [1-4], источником статического электрического поля является стационарное распределение свободных электрических зарядов (в объеме, на поверхностях, линиях, в дискретных точках в соответствии с моделью, принятой для описания формы и материала физических тел). С другой стороны, если какое-либо тело поместить во внешнее электрическое поле, то последнее приводит к появлению индукционных зарядов на поверхностях проводников и поляризационных зарядов (поверхностных или объемных) в диэлектриках. Эти наведенные заряды заметно искажают первичное внешнее поле в области пространства вблизи и внутри тела. Определение параметров поля – потенциала, напряженности и т. д. – это трудная проблема, как для теории, так и для эксперимента.

Потенциал электростатического поля удовлетворяет уравнению Лапласа (или Пуассона) и определенным граничным условиям на границе раздела различных сред [1-4]. В общем случае только численное решение этих уравнений позволяет определить потенциал. В частных случаях (некоторые двумерные задачи и т.д.) можно найти аналитическое решение этих уравнений. Если известно распределение электрических зарядов, то напряженность электрического поля (или потенциал) можно рассчитать в каждой точке пространства, используя закон Кулона и принцип суперпозиции. Наконец, если распределение зарядов обладает высокой степенью симметрии (сферической, цилиндрической или плоской), то для расчета характеристик поля можно использовать теорему Гаусса-Остроградского.

Основное преимущество экспериментального подхода (если не считать принципиального вопроса о проверке основных положений теории) - это возможность непосредственного определения (измерения) потенциала поля в произвольной точке в случае любого неизвестного распределения электрических зарядов. Очевидно, что для реализации такой возможности необходимы соответствующие приборы. Разность потенциалов между двумя проводниками можно измерить с помощью электрометра (электростатического вольтметра [1-4]) В случае газообразных диэлектриков можно использовать электрический зонд, соединенный с электрометром [1-3]. Иногда возможно моделирование электростатического поля в электролитической ванне [1-5]. Рассмотренные методы измерений позволяют определить эквипотенциальные поверхности. Для нахождения силовых линий поля требуется построение системы кривых, ортогональных к этим эквипотенциальным поверхностям. Очевидны проблемы такой методики эксперимента. Как поместить зонд внутрь твердого тела без нарушения

целостности системы? Как избежать искажений, вызванных появлением индукционных зарядов на зонде? Как измерить напряженность электрического поля? Решение этих проблем лежит на пути разработки новых методик измерений и конструирования новых приборов.

Наконец, если использовать как теоретический (расчетный), так и экспериментальный подход к проблеме определения параметров поля, то возникает возможность сравнения двух систем эквипотенциальных поверхностей (и/или силовых линий) поля. Если в пределах погрешности измерений эти две системы поверхностей (линий) согласуются, то степень уверенности в правильности определения параметров поля, очевидно, будет выше, чем в случае реализации только одного из подходов. Именно к сочетанию двух этих подходов и надо стремиться при проведении каждого исследования.

В данной задаче впервые реализована принципиально новая идея в моделировании: использование «экспериментального» метода (в частном примере определения характеристик электростатического поля). Такие параметры поля как потенциал и напряженность «измеряются» «приборами», которые были «изобретены» авторами задачи. Исключением является допуск, цель которого – проверка уровня понимания основных положений электростатики. В этом случае процедура определения параметров поля реализована иначе: графики для поля, индукции и потенциала строятся на основе интуитивных представлений (качественно) и/или теоремы Остроградского-Гаусса и определений [1-4]. Результаты «измерений» затем сравниваются с расчетными кривыми, что позволяет сделать вывод о качестве «измерений». Расчеты для выбранной конфигурации тела и поля выполняются в автоматическом режиме в реальном времени. При желании точность расчетов можно проконтролировать независимыми вычислениями. Очевидно, что именно эти расчеты – основа «экспериментального» метода. Следует особо отметить, что выполняющий работу по своему усмотрению может произвольно изменять многие как геометрические (форма и размеры тел, их расположение), так и физические (проводник, диэлектрик, величина относительной диэлектрической проницаемости, заряд и т. д.) параметры. Огромное разнообразие вариантов (практически бесконечное число) исключает возможность «запоминания» ответов.

Основное преимущество предложенного варианта моделирования – это активизация усилий выполняющего задачу в поисках ответов на поставленные вопросы.

2. Метод «измерения».

Для задач с цилиндрической (плоской) симметрией силовые линии электрического

поля и соответствующая им совокупность ортогональных кривых-экипотенциалей лежат в плоскостях, перпендикулярных оси симметрии (плоскости симметрии). Этот факт позволяет моделировать картину силовых линий поля и эквипотенциалей на плоском экране монитора. Таким образом, часть экрана монитора служит моделью (отображением) области пространства, в котором необходимо определить характеристики поля. В этой же части экрана изображается сечение эллиптического (кругового) цилиндра (или заряженных плоскостей), который искажает внешнее однородное поле (является источником дополнительного поля).

Для выполнения «измерений» необходимы «приборы». В задаче используются три «прибора»: «электрометр» с зондом, «измеритель» поля и «измеритель» углов – «транспортир». «Электрометр» используется для построения эквипотенциалей. Корпус прибора соединяется с точкой поля, потенциал которой выбран равный нулю. Зонд обозначается перекрестием вертикальной и горизонтальной линий. Зонд можно поместить в любую точку пространства, в том числе и внутрь твердого тела. Он не вносит никаких искажений в измеряемое поле. На цифровом табло «прибора» высвечиваются потенциал и разность потенциалов ΔU и координаты X и Y положения зонда. Если положение нулевой точки фиксировано, то на табло отображается потенциал точки, в которой находится зонд, по отношению к нулевой. Однако, если за нулевую принимать разные стартовые точки поля, то траектории зонда, для которых $\Delta U = 0$, будут отображением эквипотенциалей на экране монитора. Чтобы зафиксировать результат «измерения» – найденное положение точки, для которой $\Delta U \approx 0$, – необходимо нажать клавишу «Enter» (техника измерений более подробно описана ниже). Таким образом, для построения эквипотенциалей необходимо с помощью подвижного зонда находить на экране, на котором отображена исследуемая область пространства, точки с наименьшими по модулю показаниями «прибора» (это удобнее, чем поиск точек с определенным и для каждой линии своим значением потенциала) и фиксировать их положение. Погрешность «измерений» как координат, так и потенциала можно выбирать перед началом работы. Очевидно, что в случае «плохих приборов» «измеренные» характеристики поля могут заметно отличаться от истинных (расчетных) значений.

Второй прибор – «измеритель» напряженности электрического поля. По отношению к точке, в которой «измеряется» поле, с помощью зонда произвольно выбирается вторая точка, и на табло прибора высвечивается значение производной по направлению $-\Delta U/\Delta l$, где ΔU – разность потенциалов, а Δl – расстояние между выбранными точками. Ориентируясь на картинку эквипотенциалей, легко найти точку, в которой эта производная максимальна, т. е. определить как направление силовой линии,

так и величину поля в выбранной точке. Следует заметить, что, согласно определению, величину Δl следует устремить к нулю, однако, очевидно, что Δl должна быть много больше погрешности «измерения» координат. Если неоднородность исследуемого поля не очень велика, то всегда возможен компромиссный выбор. В противном случае следует использовать «приборы» более высокого класса точности. Если сопоставить выбранной величине электрического поля E_∞ определенную густоту силовых линий (число линий на 1 см экрана), то с помощью «измерителя» можно определить «экспериментально» полную картину силовых линий поля. Для удобства работы в левой части изображения исследуемой области пространства на мониторе заданы начальные точки, дистанция между которыми определяется выбранной густотой силовых линий на бесконечности. Результат проделанной «экспериментальной» работы – картина эквипотенциалей и силовых линий – сравнивается с системой расчетных кривых (линии другого цвета). По указанию преподавателя можно получать «экспериментальные» данные только для части исследуемой области. Если в пределах погрешности «экспериментальные» данные согласуются с расчетными кривыми, то «эксперимент» можно считать выполненным успешно.

Наконец, есть возможность использовать «калькулятор». (Описание см. ниже).

«Включение» необходимых «приборов» происходит автоматически в зависимости от выполняемых «измерений».

3. Допуск. Сферически симметричное поле.

Предполагается, что выполняющий работу должен хорошо понимать основные положения электростатики в рамках университетских курсов общей физики [1-4]. Уровень понимания проверяется с помощью следующего задания. Преподаватель указывает произвольное (от 0 до 9) число сферических слоев (поверхностей) с общим центром и их внутренние и внешние радиусы и материал каждого слоя (проводник, диэлектрик, вакуум). Внешнее пространство считается вакуумом. В случае диэлектриков указываются величины относительной диэлектрической проницаемости. Если слой – не вакуум, то задается полный заряд $q_i(Kл/4\pi\epsilon_0)$, который в случае диэлектрика предполагается распределенным с однородной плотностью ρ_i по слою. Таким образом задается сферически симметричная система. Сечение заданной системы слоев плоскостью, проходящей через центр симметрии, высвечивается в верхней части экрана в виде соответствующей картинке с указанием основных параметров. Задача проверяемого – построить на экране монитора с помощью зонда-«чертежника» качественные графики зависимостей индукции D , поля E и потенциала U как функции расстояния от центра.

Зонд-«чертежник» – это перекрестие координатных линий, которое можно поместить в любую точку экрана и зафиксировать ее положение – «нарисовать», нажав клавишу «Enter», и табло, отображающее величины радиуса и значения ординаты (т.е. величины D , E или U) в некотором масштабе. График рисуется в масштабе, заданном на экране монитора, соответствующем выбранной конфигурации сферических поверхностей и зарядов, постановкой с помощью зонда в необходимых местах точек, которые автоматически соединяются отрезками линий. Сначала выбирается необходимая точка и в нее устанавливается зонд, затем эта точка фиксируется (подробное описание выполнения допуска см. ниже). Для удобства работы можно использовать встроенный калькулятор. Итог проделанной работы – три графика для индукции $D(r)$, поля $E(r)$ и потенциала $U(r)$ сравниваются **В ПРИСУТСТВИИ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ** и **С ЕГО ПОМОЩЬЮ** с расчетными кривыми. Если нарисованные графики качественно совпадают с расчетными, то допуск считается успешным. Кроме того, во время допуска студент осваивает работу в компьютерной среде задачи по материалам описания.

3.1 Выполнение допуска

3.1.1 Вход в систему.

3.1.1.1 Общее описание.

Запуск задачи осуществляется преподавателем (лаборантом). На экране монитора можно увидеть в верхней части горизонтальное меню, состоящее из разделов: «Допуск», «Упр. 1», «Упр. 2» ... и «Help», а в нижней части экрана окно с указанием клавиш, которые могут быть использованы в данный момент. (Указаны наиболее часто используемые клавиши, полную информацию можно найти в описании или нажав клавишу «F1»).

Сначала войдите в раздел «Допуск» горизонтального меню. Для этого клавишами перемещения курсора (клавишами с изображением стрелок) подведите селектирующее поле (т. е. прямоугольное поле контрастной окраски) горизонтального меню к разделу «Допуск» и нажмите клавишу «Enter». Если компьютер оснащен мышью, подведите стрелку, высвеченную на экране, к разделу «Допуск» и нажмите **ЛЕВУЮ** кнопку мыши. Вообще, если курсор мыши, который может принимать различные формы в зависимости от поля, на котором он находится, наведен на какую-либо точку, и нажата левая кнопка мыши, то будет выполнена команда выбора, смысл которой определяется полем, на который указывает курсор. Исключением является случай, когда курсор принимает форму песочных часов. Это означает, что компьютер занят, например, идут сложные вычисления или обращение к диску, и не готов воспринимать команды, как от мыши, так и с клавиатуры. Нажатие правой кнопки мыши соответствует нажатию клавиши «Esc» – это

отмена или прерывание текущей операции. Так, если вы находитесь в каком-то разделе меню и нажмете клавишу «Esc», то произойдет возврат на предыдущий уровень меню.

Выполнение задачи основано на идее последовательного принуждения: правильное исполнение текущей операции влечет появление новой информации для выбора следующей и т.д., а неверное – сигнал об ошибке.

3.1.1.2. Выбор числа сферических слоев.

Войдите в раздел «Число сфер». Вначале это число равно 0. Выберите число в соответствии с заданным преподавателем количеством границ раздела сред. Если выбранное число отлично от 0, откроются новые входы в меню для задания радиусов, материала среды слоев и ее параметров: величины относительной диэлектрической проницаемости ϵ и заряда q в единицах $\text{Кл}/4\pi\epsilon_0 = \text{В}\cdot\text{м}$.

3.1.1.3. Задание параметров слоев.

Войдите в раздел для задания радиуса первой сферы и выберите значение. После этого откроются входы для задания выбора материала и параметров среды этой сферы и радиуса следующей сферы. Диэлектрическая среда указывается со значением диэлектрической проницаемости. Если выбранная среда – вакуум, перейдите к следующей сфере, иначе задайте заряд d . Далее переходите к выбору радиуса следующей сферы и действуйте аналогично предыдущему, пока не заполните все сферы. Когда система будет полностью определена, в верхней части экрана появится ее схематическое сечение, причем цвет заполнения сечений сфер зависит от среды. Также откроются три входа для вызова изображения масштабов для графиков индукции $D(r)$, поля $E(r)$ и потенциала $U(r)$.

3.1.2. Построение графиков индукции $B(r)$, поля $E(r)$ и потенциала $U(r)$.

Войдите в один из разделов построения графиков. В нижней части экрана появится масштаб, соответствующий выбранной системе сфер. По горизонтальной оси отложены значения радиуса r , а по вертикальной – значения $D(r)$ (или $E(r)$ или $U(r)$). Ваш график должен быть максимально вписан в этот масштаб. Пунктирные линии обозначают границы раздела сред (для ориентировки смотрите на картинку в верхней части экрана монитора). С помощью клавиш перемещения курсора (или мышью, курсор которой при этом принимает форму косоугольного перекрестия) подведите зонд – точку пересечения вертикальной и горизонтальной линий – к начальной точке графика и зафиксируйте ее положение – нажмите клавишу «Enter» (или левую клавишу мыши). Точка будет зафиксирована, и от нее к зонду будет постоянно тянуться линия. Переместите зонд в новую точку, зафиксируйте ее и т.д. Для стирания поставленных точек используйте клавиши «BackSpace». На специальном табло высвечиваются текущие значения

координат зонда по осям R и ординате. Когда вы закончите строить график, нажмите «Esc» и подтвердите желание закончить данный график (используя клавиши «Y» – да, «N» – нет). Если вы затрудняетесь определить положение следующей точки графика, можно воспользоваться встроенным калькулятором для расчетов по формулам на основе теоремы Гаусса-Остроградского и определений характеристик поля.

Работа по построению графиков всех трех функций аналогична. Построение графика для потенциала рекомендуется начинать с больших r (т.е. чертить справа налево) и после того, как нарисован график для поля $E(r)$.

После построения всех трех графиков откроется вход «Проверка».

3.1.3 Проверка

Вход «Проверка» защищен паролем, о котором информирован только преподаватель. После правильного введения пароля последовательно демонстрируются графики построенных и расчетных зависимостей, причем введенные точки отмечены маркерами-квадратиками. Смена графиков возможна после нажатия любой из клавиш. После просмотра результатов допуска открывается вход «Оценка», и преподаватель принимает решение о возможности выполнения остальных упражнений: На заданный вопрос: «Продолжить выполнение?» нажимает клавиши («Y» – да, «N» – нет).

3.1.4. Встроенный калькулятор.

Если нажать клавиши «Alt-C», то появится панель калькулятора. В первой строке можно набрать арифметическое выражение, затем, после нажатия клавиши «Enter» будет вычисление его значение. Выражение может включать числа, знаки арифметических операций (+, -, *, /, ^ – возведение в степень), круглые скобки, имена переменных и функций. В допуске разрешены следующие переменные:

r – текущее значение положения зонда;

$r[1]...r[9]$ – радиусы границ раздела сред;

$\epsilon_{ps}[1]... \epsilon_{ps}[9]$ – значения относительной диэлектрической проницаемости сред (для металла не определено);

$q[1]...q[9]$ – заряды на сферических слоях в единицах Кл/4 $\pi\epsilon_0$, т.е. В·м, и функции: sqrt(), abs(), exp(), sin(), cos(), tan(), arctan(). Примеры корректных выражений и результат:

1	1
1.2+2*3	7.2
3^3	27
sqrt(1+3)	2
1/sqrt(abs(4-2^3))	0.5

В вычислениях принято $\varepsilon_0 = 1$, что соответствует $[q] = \text{Кл}/4\pi\varepsilon_0 = \text{В}\cdot\text{м}$ и $[\sigma] = \text{Кл}/\text{м}^2\varepsilon_0 = \text{В}/\text{м}$.

Если выражение введено корректно, во второй строчке появится его значение, иначе вы получите сообщение об ошибке. Не вставляйте пробелы между именами функций и скобками! Для выхода из «калькулятора» – нажмите клавишу «Esc».

4. Первое упражнение. Исследование однородного поля (плоская симметрия).

Источником однородного поля служит система бесконечных заряженных плоскостей. Разнообразие вариантов достигается произвольным выбором с экрана числа плоскостей ($1 \leq n \leq 9$), их координат d_i , поверхностной плотности σ_i электрического заряда каждой плоскости. Крайняя левая плоскость располагается в начале координат, ее потенциал принимается равным нулю. Выполняющему работу предоставляется право решать, с какой точностью он будет «измерять» параметры поля. Это решение обеспечивается свободным выбором величин погрешностей «измерения» как координат положения зонда σ_x , так и потенциала σ_U (т.е. класса точности приборов). В соответствии с выбором погрешностей будет зафиксировано следующее значение координаты зонда:

$$x = x_{\text{факт}} + R\sigma_x, \quad (1)$$

где $x_{\text{факт}}$ – фактическое значение координаты, R – случайное число, распределенное по закону Гаусса (мат. ожидание равно 0, дисперсия 1) и потенциала:

$$U = U_{\text{факт}} + R\sigma_U, \quad (2)$$

где $U_{\text{факт}}$ – фактическое значение потенциала в точке $x_{\text{факт}}$, R – определено выше. Согласно принципу суперпозиции и условию калибровки потенциала

$$U_{\text{факт}} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_{\text{факт}} - d_i |\sigma_i - d\sigma_i). \quad (3)$$

В данном упражнении не используется «измеритель» напряженности электрического поля, а анализируется его принцип действия. Ясно, что силовые линии горизонтальны, а величина и знак, т. е. направление; поля определяются формулой

$$E = -\frac{U(x_2) - U(x_1)}{x_2 - x_1} = -\frac{\Delta U}{\Delta x}, \quad (4)$$

где координаты x_1 , x_2 и потенциалы $U(x_1)$, $U(x_2)$ – результаты «измерений» согласно (1) и (2). Погрешность «измерения» поля (4), очевидно, равна

$$\sigma_E = E \sqrt{2 \left(\frac{\sigma_U}{\Delta U} \right)^2 + 2 \left(\frac{\sigma_x}{\Delta x} \right)^2}, \quad (5)$$

где E определено (4), а σ_U , σ_x – выбором. Из (5) ясно, что чем меньше Δx и ΔU , тем больше погрешность «измерения» E .

Цель данного упражнения – построить графики потенциала и поля как функции координаты x . Результаты «измерений» с учетом всех погрешностей сравниваются с данными «оптимальных измерений». Степень согласования отражает качество проведенного «эксперимента». Практическая работа состоит в выборе точек, в которых измеряется потенциал, и пар точек для определения поля. Все вычисления по формулам (1-5) для проведенного и оптимального «экспериментов» выполняются автоматически. Очевидно, проделанная работа дает богатый материал для обсуждения вопросов, как электростатики, так и методики измерений и погрешности экспериментальных данных.

4.1. Выполнение первого упражнения.

4.1.1 Задание конфигурации пластин.

Войдите в раздел «Число пластин» и выберите число пластин, с которыми вы собираетесь работать. После этого откроются входы для определения положения и плотности заряда на первой пластине. После задания этих величин откроются входы для второй пластины и т. д. Только после выбора всех необходимых параметров откроется вход для выполнения упражнения. Плотность заряда задается в единицах $\text{Кл}/\text{м}^2\epsilon_0 = [\text{В}/\text{м}]$.

4.1.2 Задание точности приборов.

Входы меню «Точность координаты» и «Точность электрометра» позволяют задавать величины погрешностей «приборов» σ_U и σ_x , влияющие на процесс измерения. Для сравнения выполняющий работу должен самостоятельно оценить погрешности $\sigma_{UЭ}$, $\sigma_{EЭ}$ «измерений» потенциала и поля и ввести их, используя входы «Ошибка потенциала» и «Ошибка поля». Две величины $\sigma_{UЭ}$ и $\sigma_{EЭ}$, оцениваются на основании выбора погрешностей σ_U и σ_x и приведенных формул и задаются численно для типичных расстояний Δx между точками и значений ΔU .

4.1.3 Практическая часть работы.

Для определения потенциала и поля используется «электрометр» с зондом, который можно перемещать, используя клавиши движения курсора или мышь. Выберите точки, в которых вы хотите измерить потенциал, и помещайте последовательно в каждую из них зонд. Для фиксации положения точек нажимайте каждый раз клавишу «Enter» (левую кнопку мыши). Для удаления точек (в обратной последовательности) используйте клавиши «Backspace». Для измерения поля необходим выбор не менее двух точек в каждой области пространства, ограниченной плоскостями. Величина поля оценивается по формуле (4). Чтобы закончить упражнение, нажмите клавишу «Esc» (правую кнопку мыши).

4.1.4 Просмотр результата.

Войдите в раздел «Результат». На экране появятся два графика: $U(x)$ и $E(x)$. Первый график точно воспроизводит помеченные вами точки. Поле же E второго графика вычисляется по формуле (4) последовательно для каждой пары точек, не разделенных плоскостью. На графике точки E проставлены посередине отрезков, для которых они вычислялись. На тех же графиках изображены теоретические коридоры для $U(x)$ и $E(x)$ для случая «оптимального измерения». Ширина коридоров соответствует выбранным погрешностям приборов. Если «экспериментальные» точки с учетом рассчитанной выполняющим задачу погрешности не выходят за пределы коридора, а потенциал и поле «промерены» между всеми плоскостями, упражнение считается выполненным правильно. Конечно, рассчитанные величины погрешностей также должны быть определены правильно, т. е. длины вертикальных отрезков, которые изображают эти погрешности, для «экспериментальных» точек не должны значительно отличаться от ширины коридора ошибок оптимальных «измерений».

5. Второе упражнение. Диэлектрическая бесконечная пластина в однородном электрическом поле.

Если бесконечную пластину из диэлектрика поместить в однородное поле, то вне пластины однородность этого поля не изменится, а внутри, очевидно, будет также однородное поле, но отличное от внешнего по величине и направлению. Цель данного упражнения – «экспериментально» проверить эти утверждения (с помощью «электрометра» с зондом и «измерителя» поля) и определить «опытным» путем граничные условия для линий индукции D и поля E .

Сначала необходимо выбрать величину внешнего однородного поля (которое совпадает в данном случае с полем на бесконечности) и густоту линий (число линий на 1 см экрана монитора) для его изображения. Предполагается, что направление поля совпадает с положительным направлением горизонтальной оси координат OX . Необходимо также выбрать толщину пластины и, угол α ее наклона к оси OX и величину относительной диэлектрической проницаемости с материала пластины. Если задать $\epsilon < 1$, то «пластина», очевидно, будет щелью внутри бесконечного диэлектрика с относительной проницаемостью $\epsilon' = 1/\epsilon$. Таким образом, появляются дополнительные возможности для исследования поля внутри бесконечной щели в однородном диэлектрике, ориентированной различным образом по отношению к внешнему полю. Потенциал точки, соответствующей началу координат, помещенной в середину пластины, принимается равным нулю.

Выполнение упражнения начинается с проведения 10-20 эквипотенциалов на всей

области экрана монитора, отведенной под изображение поля, с помощью «электрометра» с зондом. При выполнении этого и последующих упражнений погрешностью «приборов» можно пренебречь. Картина эквипотенциалей должна подсказать экспериментатору структуру электрического поля. В соответствии с выбранной величиной внешнего поля, начиная с левой части экрана монитора, проводят линии индукции D , которые непрерывны на границе раздела двух сред, с помощью «измерителя» поля, а затем – силовые линии поля E . При проведении линий поля E внутри пластины необходимо учитывать разрыв этих линий на границе раздела двух сред (из-за появления поляризационных зарядов на поверхности пластин). Густоту линий поля внутри диэлектрика следует согласовывать с выбранной густотой линий внешнего поля и величиной относительной диэлектрической проницаемости ϵ' .

В конце выполнения упражнения «экспериментальные» кривые сравниваются с расчетными, полученными в автоматическом режиме. Проверка граничных условий возможна после оценки соответствующих углов.

5.1 Техника выполнения упражнений 2-4.

5.1.1 Определение конфигурации системы.

Задайте величину поля на бесконечности E_∞ , густоту линий n_∞ (число линий на 1 см экрана монитора), геометрические параметры тела и в случае необходимости, среду тела.

5.1.2 Построение эквипотенциалей.

С помощью мыши или клавиш управления курсором можно перемещать зонд «электрометра». Начальная точка, положение которой указывается автоматически, соединяется с текущим положением зонда линией (как в допуске). Перемещайте зонд так, чтобы показание «электрометра» ΔL было как можно ближе к нулю. Для фиксации положения выбранной точки нажмите клавишу «Enter». Если неоднородность поля велика, то кривизна линии возрастает. В этом случае необходимо использовать большее число точек (чаще фиксировать их положение) для корректного отображения линии. Для перехода к построению новой линии нажмите клавишу «L». После окончания выполнения этой части упражнения нажмите клавишу «C». Если нажать клавишу «Esc», то высвечивается приглашение прервать линию, упражнение или продолжить выполнение. Если вы вышли из этого этапа, а затем снова в него войдете, выполнение начнется с последней зафиксированной точки при условии, что вы не меняли параметры системы.

5.1.3 Построение линий индукции.

Техника выполнения этой части упражнения аналогична предыдущей: от заданных в левой части экрана монитора начальных точек зонд "измерителя" поля последовательно перемещается в правую часть экрана. Необходимо каждый раз добиваться максимального значения показания «прибора» прежде чем фиксировать результат измерения, нажимая клавишу Enter.

5.1.4 Построение силовых линий поля.

Линии поля проводятся так же, как и линии индукции, за одним исключением. Когда зонд попадает внутрь тела, линия изображается прерывистой, а после фиксации положения точки и вовсе пропадает. Для построения поля внутри тела необходимо получить специальное приглашение системы, которое последует, если нажать клавишу «С». После положительного ответа (если нажать клавишу «Y») необходимо самостоятельно задать систему начальных точек, которая определит густоту линий поля внутри тела. Для этого сначала с помощью «измерителя» поля нужно определить общую структуру силовых линий (их направление) и величину поля E_i в различных точках внутри тела. После выяснения структуры поля густота n_i линий внутри тела (а, следовательно, и система начальных точек) определится из соотношения:

$$n_i = n_\infty \cdot E_i / E_\infty$$

где n_∞ – заданная густота линий на бесконечности, E_i , E_∞ – значения поля внутри тела и на бесконечности. Положение первой начальной точки можно выбрать произвольно (подведите зонд к нужному месту и зафиксируйте его положение – нажмите клавишу «Enter») – рекомендуется на оси OX . Положение остальных определяется рассчитанной густотой n_i , структурой поля E_i и размерами тела.

5.1.5 Просмотр результатов.

Войдите в раздел «Результат». Последовательно будут рисоваться «экспериментальные» и теоретические линии для заданной конфигурации системы (которые различаются цветом). Для смены изображения нажмите любую клавишу.

6. Третье упражнение. Круговой цилиндр из диэлектрика или проводника в однородном электрическом поле (цилиндрическая симметрия).

Если бесконечный круговой цилиндр из диэлектрика (проводника) поместить в однородное электрическое поле, направленное перпендикулярно оси симметрии, то на поверхности цилиндра появятся поляризационные (индукционные) электрические заряды, которые исказят структуру первичного поля [6]. Это искажение, очевидно, будет

уменьшаться с увеличением расстояния от оси цилиндра. Цель данного упражнения – «измерить» положение эквипотенциалей, линий индукции и силовых линий в искаженном поле с помощью «электрометра» с зондом и «измерителя» поля. Перед началом работы выбираются значения следующих величин: поле на бесконечности, густота силовых линий, радиус цилиндра, материал цилиндра (проводник, диэлектрик), относительная диэлектрическая проницаемость ϵ в случае диэлектрика. Потенциал вертикальной плоскости симметрии, проходящей через ось цилиндра, принимается равным нулю. Выполнение аналогично случаю упр. 2.

7. Четвертое упражнение. Эллиптический цилиндр из диэлектрика (проводника) в однородном электрическом поле.

Цель данного упражнения, как и предыдущего, – «экспериментально» определить положение эквипотенциалей, линий индукции и силовых линий поля с помощью «электрометра» с зондом и «измерителя» поля. Отличие состоит в том, что вследствие понижения симметрии, вообще говоря, возрастает неоднородность поля. Последнее обстоятельство предъявляет более жесткие требования к квалификации «экспериментатора», который должен приобрести необходимый опыт в процессе выполнения предыдущих упражнений. Разнообразие вариантов обеспечивается выбором значений следующих величин: поля на бесконечности E_∞ и густоты линий для его изображения n_∞ , полуосей эллипса a и b , ($a > b$) – сечения цилиндра плоскостью $z = \text{const}$, которое изображено на экране, угла наклона α большей полуоси к оси ОХ, материала цилиндра (проводник, диэлектрик), относительной диэлектрической проницаемости ϵ в случае диэлектрика. Потенциал точки, соответствующей центру эллипса принимается равным нулю. Выполнение аналогично случаю упр. 2.

Литература

1. С.Г.Калашников, «Электричество», «Наука», М., 1985.
2. А. Н. Матвеев, «Электричество и магнетизм», «Высшая школа», М., 1983.
3. Д. В. Сивухин, «Общий курс физики», том 3 «Электричество», «Наука», М., 1977.
4. Р.Фейнман и др., «Фейнмановские лекции по физике», том 5, «Электричество и магнетизм». «Мир», М., 1966.
5. В. И. Козлов, «Электричество. Практикум по курсу общей физики.» Под ред. А.Н.Матвеева, Изд. МГУ, М, 1991.
6. В. Смайт, «Электростатика и электродинамика». Изд. И. Л., М., 1954.