



**4-0**

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Иркутский государственный университет»  
(ФГБОУ ВПО «ИГУ»)

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ**

*Методические рекомендации*

Иркутск 2012

Печатается по решению научно-методического совета  
Иркутского государственного университета

Рассмотрен метод моделирования электрического поля, даны рекомендации по изучению электрических полей различной конфигурации. Предназначены для студентов 1 и 2 курсов дневного и заочного отделений естественных факультетов

Библиогр. 2 назва. ил.б.

Составители: к.ф.-м.н., доц. Л.И. Алексеева  
ст. преп. С.А. Сверчинская  
(каф. общей и космической физики ИГУ)

Редактор: к.ф.-м.н., ст. преп. Черных А.А.

Рецензент: к.ф.-м.н., доц. В.В. Дорохова.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

## Цель работы:

1. Знакомство с одним из методов моделирования и графического изображения электрического поля.
2. Исследование электрического поля заряженных тел различной конфигурации

## Приборы и принадлежности:

Электролитическая ванна (деревянный ящик с влажным песком). Набор электродов: 2-плоских; 2-Г-образных (точечных); металлическое кольцо. Наушники. Латр. Вольтметр на 50 В. Линейка. Миллиметровая бумага.

## Краткая теория

Необходимость знать структуру электростатического поля заряженных тел возникает во многих случаях и практических задачах: при конструировании электронных ламп, конденсаторов, электронных ламп, фотоэлектронных умножителей и других электронных и ионных приборов. По изменению структуры электростатического поля можно определять зону месторождений полезных ископаемых, т.к. удельная электропроводность пород, составляющих месторождение, может сильно отличаться от электропроводности среды. Теоретический расчет поля в большинстве случаев наталкивается на большие математические трудности. Поэтому часто прибегают к экспериментальному изучению поля на его модели. Модельные эксперименты при исследовании сложных физических процессов находят все более широкое применение.

В ряде случаев модель и натура имеет одинаковую физическую природу, характер самого явления сохраняется, но геометрические размеры модели отличаются от природы. Примером такого, так называемого физического моделирования, является испытание модели летательного аппарата в аэродинамической трубе.

Возможно также моделирование процессов, когда закономерности различных по природе физических явлений описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями и граничными условиями. Тожественность математического описания позволяет заменить сложное исследование одного явления более простым исследованием другого. В этом случае имеют дело с математическим моделированием.

Так, например, тот факт, что электрическое поле тока в слабо проводящей среде является потенциальным, позволяет использовать его для моделирования электростатического поля заряженных тел в вакууме. При этом силовым линиям электростатического поля будут соответствовать линии тока, а поверхностям равного потенциала – поверхности равных напряжений. В качестве слабо проводящей среды при моделировании электростатических полей используют разные материалы: дистиллированную воду, мокрый песок, электропроводную бумагу (при изготовлении бумаги в целлюлозу вводят электропроводные частицы сажи или графита).

Электростатическое поле характеризуется в каждой точке поля значением вектора напряженности поля  $\vec{E}$  и значением электростатического потенциала  $\varphi$ , являющегося скалярной величиной.

Напряженность является силовой характеристикой поля. Она численно равна силе, с которой поле действует на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля:  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ .

Линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с напряженностью электростатического поля, называется силовой линией. Графически поле принято изображать в виде силовых линий, причем их густота характеризует численное значение напряженности.

Потенциал  $\varphi$  является энергетической характеристикой поля. Он измеряется работой, совершаемой силами поля при перемещении единичного

положительного заряда из данной точки поля в точку, находящуюся вне поля в бесконечности  $\varphi = \frac{A_{1\infty}}{q}$ .

Потенциал является функцией расстояния от данной точки до заряда. Однако, можно выделить такую совокупность точек, для которых потенциал будет один и тот же. Геометрическое место точек равного потенциала носит название эквипотенциальной поверхности.

Силовые линии напряженности всегда перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям (линиям в сечении поля)

Связь между характеристиками поля  $\vec{E}$  и  $\varphi$  и ортогональность силовых линий к поверхностям равного потенциала нетрудно доказать.

По формуле взаимосвязи работы и энергии работа ( $dA$ ) сил потенциального поля (электростатического или гравитационного) совершается за счет убыли потенциальной энергии ( $-dW_n$ ), т.е.

$$dA = -dW_n = -(W_{n_2} - W_{n_1}) = -q(\varphi_2 - \varphi_1) = -qd\varphi \quad (1)$$

Это означает, что, если положительный заряд  $q$  под действием сил электростатического поля  $\vec{F} = q\vec{E}$  перемещается из точки 1 с потенциалом  $\varphi_1$  в точку поля 2 с потенциалом  $\varphi_2$ , то должно выполняться условие  $\varphi_2 < \varphi_1$ . Элементарная работы, совершаемая силами поля, может быть записана двояко (рис. 1):

$$dA = -qd\varphi \quad (1) \quad \text{и} \quad dA = qEdl \cos \alpha \quad (2)$$

Приравнивая выражения для работ (1) и (2) получаем

$$E = -\frac{d\varphi}{dl \cdot \cos \alpha} = -\frac{d\varphi}{dn}; \quad \vec{E} = -q \text{grad} \varphi, \quad (3)$$

где  $dl$  – элементарный отрезок пути,  $\alpha$ - угол между  $\vec{E}$  и  $d\vec{l}$ ,  $dn$  – отрезок участка пути по нормали к поверхности.

Таким образом, вектор напряженности электростатического поля равен градиенту потенциала и направлен в сторону убывания потенциала.

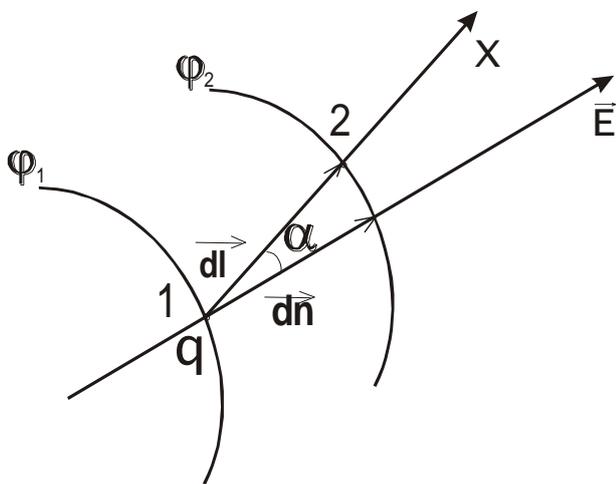


рис. 1.

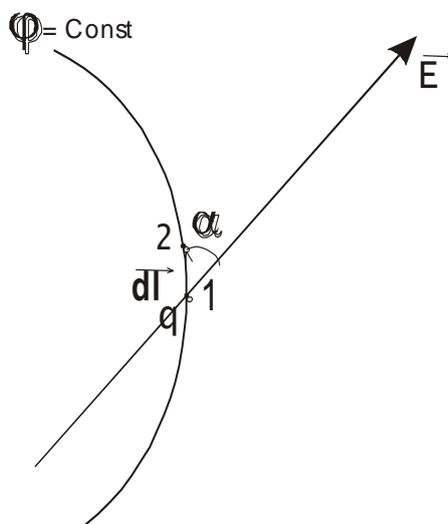


рис. 2.

На рис. 2 изображена поверхность равного потенциала некоторого электрического поля и вектор напряженности  $\vec{E}$ , проведенный под произвольным углом  $\alpha$  к этой поверхности. Пусть положительный заряд  $q$  перемещается на малый отрезок пути из т.1 в т.2 вдоль эквипотенциальной поверхности, т.е.  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ ;  $d\varphi = 0$ . Тогда  $dA = -qd\varphi = 0$ , а также  $dA = qEdl \cos \alpha = 0$ . Но заряд, его перемещение и напряженность электрического поля не могут равняться нулю, следовательно,  $\cos \alpha = 0$  или  $\alpha = 90^\circ$ . Это означает, что силовые линии всегда перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

Ортогональность силовых линий и поверхностей равного потенциала существенно облегчает как теоретическое, так и экспериментальное исследование электростатического поля; именно, если найдены значения вектора напряженности поля, облегчается задача нахождения поверхностей равного потенциала. Справедливо и обратное: найденное положение поверхностей равного потенциала позволяет построить силовые линии поля. Последняя возможность как раз имеет практическое значение. Как

теоретические, так и экспериментальные измерения потенциалов проще и точнее, чем измерения напряженности.

Для исследования распределения потенциала в стационарных электрических полях тока используются зонды, вводимые внутрь поля. Зондом является тонкий металлический стержень, хорошо изолированный по всей длине, кроме его конца. Зонды соединяются с токоизмерительными приборами, широко используемыми в измерительной практике (вольтметром и гальванометром); в данной работе с наушниками.

Электрическая цепь зонда должна обладать большим сопротивлением по сравнению с сопротивлением проводящих слоев вещества между точкой, в которую помещен зонд, и ближайшим электродом. В противном случае включение зонда исказит распределение потенциалов в исследуемом поле. Практическое осуществление метода изучения электростатического поля будет ясно из объяснения устройства применяемой для этой цели установки.

### **Описание установки**

В данной работе модель электрического поля, строится следующим образом. Во влажный песок вставляются металлические электроды (плоские или точечные), которые подключаются к источнику переменного тока напряжением 20-40 В частотой 50 Гц (Латр). (рис. 3-6). Влажный песок – это высокоомный проводник, в нем устанавливается некоторое распределение потенциала. Линии тока подобные силовым линиям электростатического поля.

В данной работе проще определять разность потенциалов двух любых точек, находящихся в пространстве между электродами, чем напряженность в этих точках. Для этого используют наушники. Если оба щупа находятся в двух точках равного потенциала ( $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 0$ ), то ток между ними не протекает и в наушниках отсутствует звук.

Если  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \neq 0$ , то ток через наушники протекает и появится низкий звук (частота 50 Гц).

Чем больше разность потенциалов, тем громче звук в наушниках.

На песке строят эквипотенциальные поверхности.

Перпендикулярно к ним проводят силовые линии, начиная от поверхности электрода. Поверхность электрода – эквипотенциальная поверхность

### **Порядок выполнения работы**

Задание 1. Исследуйте электрическое поле между двумя плоскими параллельными электродами (рис. 3).

1) Убедитесь, что наушники находятся в нормальном рабочем состоянии. Для этого щупы установите в произвольных точках недалеко от электродов, при этом в наушниках должен появиться звуковой сигнал.

2) Разбейте промежуток между электродами на равные части для построения 3-4 эквипотенциальных линий.

3) Установите один щуп вертикально напротив середины электродов. Вторым щупом, касаясь поверхности песка, найдите другие точки того же потенциала выше и ниже средней точки. Звук в наушниках должен отсутствовать. Проведите линию, соответствующую эквипотенциальной поверхности.

4) Убедитесь, что каждый электрод является эквипотенциальной поверхностью.

5) На миллиметровой бумаге в масштабе начертите ящик с песком и электроды. С помощью линеек, наклеенных на бортиках ящика, и подвижной линейки определите координаты точек линий равного потенциала и перенесите их на миллиметровую бумагу в протокол лабораторной работы.

6) Проведите на чертеже силовые линии электрического поля перпендикулярно к эквипотенциальным линиям, начиная и заканчивая их на электродах.

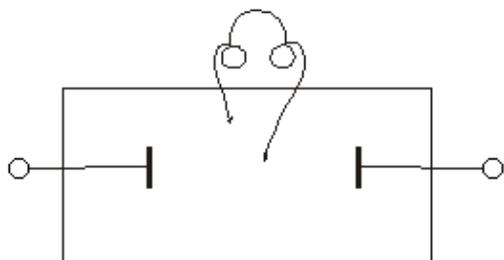
Задание 2. Исследуйте аналогично электрическое поле между двумя плоскими электродами, установив между ними металлическое кольцо глубоко в

песок (рис. 4) Убедитесь, что само кольцо и пространство внутри него являются эквипотенциальными поверхностями. Изобразите поле на чертеже.

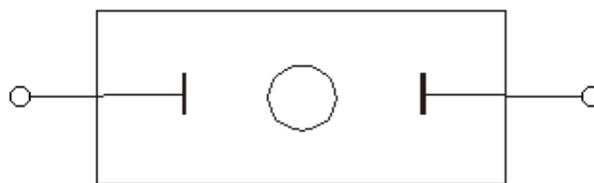
Задание 3. Исследуйте электрическое поле и начертите его картину для плоского и точечного электродов (рис. 5)

Задание 4. Исследуйте электрическое поле и начертите его картину для двух точечных электродов (рис.6).

**В результате, в отчете у вас должно быть 4 рисунка (ящик с потенциальными (одним цветом) и силовыми (другим цветом) линиями на песке) в масштабе 1:2 (или 1:3). Сделайте вывод.**



**Рис.3.**



**Рис.4.**



**Рис.5.**



**Рис.6.**

### **Контрольные вопросы:**

1. Какие поля называются электростатическими. Что является характеристиками электростатического поля? Дайте им определение. Как эти характеристики связаны между собой?
2. Дайте определение силовой линии и эквипотенциальной поверхности. Докажите их взаимную перпендикулярность.
3. Изобразите на чертеже картину поля точечного заряда положительного и отрицательного, поля диполя, бесконечной плоскости и двух плоскостей, нити и шара.
4. Почему моделирование поля можно проводить на мокром песке?
5. Почему при протекании тока через наушники слышен звук?

### **Список литературы:**

1. Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб. пособие для Вузов. – М.: Высш. шк. 1998. – 542 с.
2. Лабораторный практикум по физике: учеб. пособие для студентов вузов (Ахматов А.С. Андреевский В.М. и др.; Под ред. А.С. Ахматова.) – М.: Высш. школа, 1980. – С.140-144.

Алексеева Лариса Ивановна  
Сверчинская Светлана Анатольевна

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ**

## **Методические рекомендации**

