

2. Методические рекомендации об организации внеурочной деятельности при введении Федерального государственного образовательного стандарта общего образования. Письмо Департамента общего образования Минобрнауки России от 12 мая 2011 г. №03-С. 296.
3. Шулежко, Е. М. Физика. Программа внеурочной деятельности для основной школы: 5-6 класс / Е.М. Шулежко, А.Т. Шулежко. – М. : Бинوم. Лаборатория знаний, 2013. – С.40.

## МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ БЕСКОНЕЧНО ТОНКИХ РАВНОМЕРНО ЗАРЯЖЕННЫХ ТЕЛ В КУРСЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

*О. Г. Ревинская, Н. С. Кравченко*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

Изучение электрического поля статически распределенных в пространстве зарядов создает предпосылки для понимания всего раздела «Электричество и магнетизм» в курсе общей физики. Обучению студентов методам расчета основных физических характеристик электростатического поля, таких как напряженность и потенциал, посвящено много учебных пособий (например, [2]). Однако в традиционных методиках обучения расчеты напряженности и потенциала выполняются для отдельных точек пространства, окружающего заряженные тела. Получаемые при этом аналитические формулы позволяют судить об изменении напряженности или потенциала в некотором выделенном направлении. Но не позволяют сформировать у студентов представления о форме эквипотенциальных поверхностей даже равномерно заряженных тел, имеющих конечные размеры.

Одним из наиболее распространенных примеров расчета потенциала тел конечного размера является бесконечно тонкий стержень длиной  $2l$  равномерно (с постоянной линейной плотностью  $\tau$ ) заряженный по всей длине. Его потенциал  $\varphi$  вдоль оси его симметрии ОХ, направленной перпендикулярно стержню, изменяется по закону:

$$\varphi = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \ln \left( \frac{l + \sqrt{x^2 + l^2}}{-l + \sqrt{x^2 + l^2}} \right) + const.$$

Однако эта зависимость позволяет судить только о том, как изменяется потенциал при удалении от тела вдоль его оси симметрии, но не дает представления о форме эквипотенциальных поверхностей данного тела. Потенциал бесконечно тонкого равномерно заряженного (с постоянной поверхностной плотностью  $\sigma$ ) диска радиусом  $R$  также часто рассчитывают на прямой, перпендикулярной плоскости диска, проходящей через его центр:

$$\varphi = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left( -x + \sqrt{x^2 + R^2} \right) + const \quad (\text{при } x > 0).$$

Примеры расчета потенциала бесконечно тонких плоских изогнутых тел встречаются в курсе общей физики крайне редко даже для таких простых по форме тел как кольцо и полукольцо. Это связано с тем, что аналитические выражения потенциала кольца, например, в плоскости кольца

$$\varphi = \frac{\tau R}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{2\pi} \frac{d\alpha}{\sqrt{r^2 + R^2 - 2rR\cos\alpha}} + const$$

записываются через специальные (эллиптические) функции, с которыми студенты, изучающие курс общей физики еще не знакомы. Потенциал полукольца вдоль оси его симметрии

$$\varphi = \frac{\tau R}{4\pi\epsilon_0} \int_{\pi/2}^{3\pi/2} \frac{d\alpha}{\sqrt{x^2 + R^2 - 2xR\cos\alpha}} + const$$

также выражается через эллиптические функции. А Потенциал тел конечного размера в произвольной точке пространства (без учета какого-либо выделенного направления) выражается еще более сложными аналитическими формулами.

Сложность аналитических выражений потенциала для тел разной формы, подкрепленная отсутствием у студентов навыков анализа и графического воспроизведения аналитических зависимостей, не позволяет в рамках традиционной методики сформировать у них представления о форме эквипотенциальных поверхностей тел конечного размера. В итоге по окончании изучения курса общей физики у студентов формируются четкие представления о форме эквипотенциальных поверхностей и направлении напряженности электростатического поля только точечного заряда и бесконечной плоскости. Описание характеристик электрического поля тел другой формы, как правило, вызывает у студентов затруднения. Это связано с отсутствием у них опыта построения эквипотенциальных поверхностей и силовых линий поля для таких тел.

Для решения этой проблемы можно воспользоваться изученным идеальными физическими моделями на компьютере. Для этого компьютерная реализация модели электростатического поля, создаваемого равномерно заряженным телом заданной формы, должна позволять находить и фиксировать (отмечать) точки с равным потенциалом. Такая техническая реализация модели позволит визуализировать картину эквипотенциальных поверхностей. В настоящее время существует ряд программных продуктов, которые автоматически строят поверхности с заданным потенциалом вокруг заряженных тел. Благодаря быстрой построения этими программами эквипотенциальных поверхностей, использование полученных с их помощью результатов позволяет сохранить цельность изложения и анализа материала на лекции. Но такой обзорный подход не имеет долговременного педагогического эффекта и требует подкрепления личным опытом студентов, который они могут получить в процессе изучения физических моделей на компьютере в лабораторном практикуме. Для обеспечения возможности получения такого практического опыта авторами разработана и внедрена в учебный процесс преподавания курса общей физики в Национальном

исследовательском Томском политехническом университете компьютерная лабораторная работа «Электростатическое поле» (рис. 1).

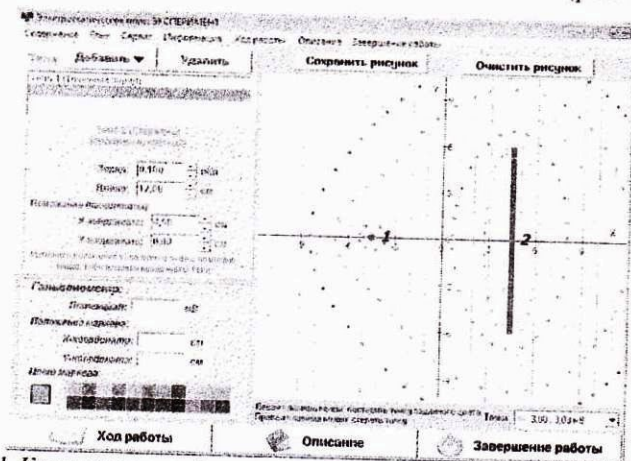


Рис. 1. Компьютерная лабораторная работа «Электростатическое поле»

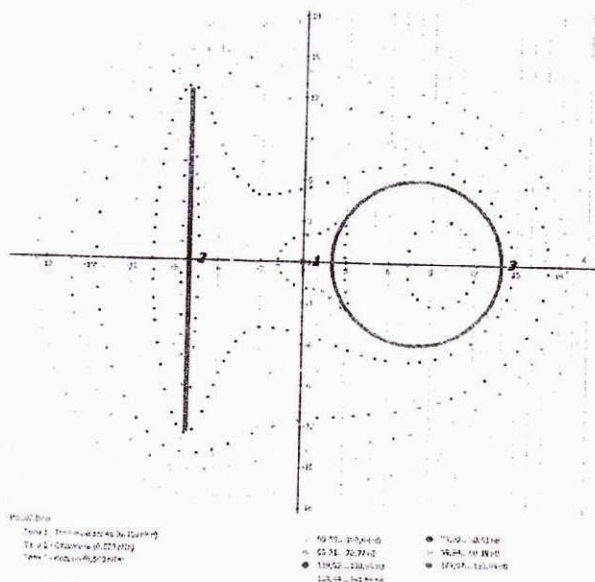


Рис. 2. Картина эквипотенциальных поверхностей

В этой лабораторной работе студентам предлагается самостоятельно найти и отметить маркером одного и того же цвета точки с равным

потенциалом вокруг заряженных тел различной формы. В процессе поиска таких точек студенты вынуждены решать два круга проблем: какие значения потенциала следует считать равными; в каком направлении следует искать следующую точку. В процессе самостоятельного решения этих вопросов студенты овладевают навыками анализа изменения потенциала электрического поля в различных направлениях от заряженного тела. Опыт такого анализа постепенно аккумулируется в предвидении направления поиска следующей точки эквипотенциальной поверхности. Именно такое предвидение формирует представление студентов о форме эквипотенциальных поверхностей заряженных тел различной формы.

Лабораторная работа позволяет исследовать электростатическое поле точечного заряда, бесконечно тонкого стержня конечной длины, кольца, полукольца в плоскости тела, бесконечно тонкого диска в плоскости, перпендикулярной диску и проходящей через его центр, а также различных комбинаций этих тел.

Чтобы закрепить навыки мысленного представления формы эквипотенциальных поверхностей заряженных тел различной формы, студентам в лабораторной работе предлагается изучить электростатическое поле, созданное одним, двумя, а затем тремя заряженными телами. Опыт показывает, что до выполнения данной работы в большинстве случаев студенты не могут предсказать картину эквипотенциальных поверхностей вблизи трех заряженных тел. Однако навыки, формируемые у них при исследовании поля, созданного одним, а затем двумя телами, помогает им получить необходимый эмпирический материал. Кроме того, студенты сами выбирают расположение тел в области эксперимента. Благодаря этому совокупность результатов, полученных учебной группой в целом, воспроизводит существующее многообразие распределений эквипотенциальных поверхностей нескольких различного заряженных и расположенных тел. Пример картины эквипотенциальных поверхностей электростатического поля, созданного тремя заряженными телами (точечным зарядом, стержнем и кольцом), полученной студентами в процессе выполнения лабораторной работы, приведен на рис. 2. Построенная студентами картина эквипотенциальных поверхностей сохраняется в одном из графических форматов (bmp или jpg), распечатывается и используется для построения проходящих перпендикулярно эквипотенциальным поверхностям силовых линий поля.

Качественный анализ распределения эквипотенциальных поверхностей и силовых линий поля вблизи группы заряженных тел подкрепляется расчетом напряженности электростатического поля в некоторых точках области эксперимента на основе принципа суперпозиции. Аналитические выражения напряженности поля, как правило, получают для изолированных тел. Для тел конечной формы эти выражения имеют наиболее простой вид вдоль некоторых выделенных направлений. Например, для стержня – вдоль прямой, перпендикулярной стержню и проходящей через его середину, для полукольца – вдоль его оси симметрии и т.д. Применение принципа суперпозиции требует не только

знания модуля напряженности поля создаваемого каждым из тел в данной точке пространства, но и ее направления. Если тела (их геометрические центры) в области эксперимента располагать вдоль одной прямой, например, вдоль оси  $OX$ , то для точек, расположенных на этой прямой, напряженности полей, создаваемых каждым из тел, оказываются направленными вдоль той же прямой  $OX$ . Такое расположение тел значительно облегчает расчет суммарной напряженности поля. Однако для вычисления напряженности кольца и полукольца вдоль выделенного направления студентами младших курсов соответствующие аналитические выражения необходимо записать не через эллиптических функций, а, например, в виде разложения в ряд: если центр кольца находится в начале координат, проекция напряженности

$$E_r \approx \frac{-\tau}{4\epsilon_0 R} \left( \frac{r}{R} + \frac{r^3}{R^3} + 2,91 \frac{r^5}{R^5} \dots \right) \quad (\text{при } r < R \text{ внутри кольца}),$$

$$E_r \approx \frac{\tau}{2\epsilon_0 R} \left( \frac{r^2 R^2}{(r^2 - R^2)^2} - 0,95 \frac{r^4 R^4}{(r^2 - R^2)^4} + 0,61 \frac{r^6 R^6}{(r^2 - R^2)^6} \dots \right) \quad (\text{при } r > 2R$$

снаружи от кольца) в плоскости кольца; если центр полукольца находится в начале координат, а ось  $OX$  совпадает с его осью

$$\text{симметрии, } E_x \approx \frac{-\tau}{4\epsilon_0 R} \left( \frac{R^2}{(x+R)^2} + 0,77 \frac{R^3}{(x+R)^3} + 0,29 \frac{R^4}{(x+R)^4} \dots \right) \quad (\text{при } x < -2R).$$

$$E_x \approx \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 R} \left( \frac{R^2}{(x+R)^2} + 1,2 \frac{xR^2}{(x+R)^3} + 0,96 \frac{x^2 R^2}{(x+R)^4} \dots \right) \quad (\text{при } x > -R).$$

Для вычисления напряженности поля, создаваемого остальными доступными в лабораторной работе заряженными телами (точечным зарядом, стержнем, диском), вдоль оси  $OX$  используются хорошо известные точные аналитические выражения.

При расположении заряженных тел вдоль оси  $OX$  суммарную напряженность поля можно также рассчитать через изменение потенциала вдоль этой оси ( $E_x \approx -\Delta\phi/\Delta x$ ) по измеренным в работе значениям потенциала.

Полученные в результате выполнения лабораторной работы результаты (числовые и графические) студенты совместно с преподавателем могут использовать при обсуждении вопроса, какие изменения будут наблюдаться, если в поле одного заряженного тела поместить другое (третье) заряженное тело. В процессе обсуждения следует отметить, что изученные в работе распределения напряженности и потенциала будут наблюдаться только, если заряженные тела являются бесконечно тонкими и равномерно заряженными, а при внесении в область эксперимента других заряженных тел перераспределение зарядов вдоль тел не происходит.

Таким образом, выполнение компьютерной лабораторной работы «Электростатическое поле» в курсе общей физики позволяет студентам овладеть фундаментальными понятиями, изучаемыми в электростати-

ке, приобрести навыки построения и предсказания распределения в пространстве эквипотенциальных поверхностей и силовых линий напряженности электростатического поля, а также вычисления напряженности электрического поля, созданного несколькими заряженными телами, используя принцип суперпозиции.

Несмотря на трудоемкий процесс построения, получаемые при выполнении лабораторной работы картины эквипотенциальных поверхностей вызывают живой интерес и обсуждение, как среди студентов, так и среди преподавателей. Выяснилось, что до выполнения лабораторной работы многие проецировали знания об отсутствии электрического поля внутри заряженной сферы на кольцо, путая плоское заряженное тело с объемным. В результате обсуждения установлено, что эквипотенциальные поверхности вблизи кольца имеют форму тора (рис. 3), на некотором удалении они начинают напоминать эллипсоид, и только на расстоянии в несколько раз превышающем радиус кольца принимают сферическую форму. Напряженность электрического поля обращается в ноль только в центре кольца, а также на бесконечности. Помещение вблизи кольца других заряженных тел приводит к искажению его эквипотенциальных поверхностей (рис. 2).

Компьютерная работа «Электростатическое поле» входит в комплекс лабораторных работ по изучению моделей физических процессов и явлений на компьютере, который разрабатывается на кафедре экспериментальной физики Национального исследовательского Томского политехнического университета 2002 г. [1]. В настоящее время комплекс включает 27 лабораторных работ.

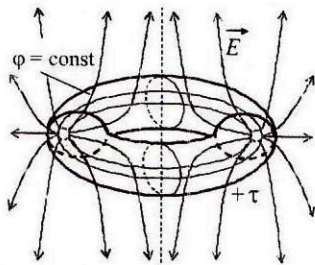


Рис. 3. Эквипотенциальная поверхность и силовые линии бесконечно тонкого кольца радиуса  $R$  с линейной плотностью заряда  $\tau$

#### Литература

1. Ревинская О.Г., Кравченко Н.С. Концепция развития лабораторного практикума по общей физике на основе дидактической модели научных экспериментальных исследований // Инновации в образовании. – 2014. – № 1. – С. 93-106.
2. Электростатические поля с элементами методики их изучения / Т.В. Котырло, И.В. Беляцын, Н.П. Тубалов, Л.Н. Татьянченко; под ред. В.В. Евстигнеева. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. – С.263.