

Герман Хэртел

НАПРЯЖЕНИЕ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЗАРЯДЫ

Абстрактное определение электрического напряжения как «способности источника тока совершать работу» или эквивалентное определение как «количества энергии на единицу заряда» предваряется качественным описанием явлений на основе представлений о существовании поверхностных зарядов. Наличие поверхностных зарядов и связанных с ними электрических полей может быть доказано экспериментально. Поверхностные заряды позволяют дать причинное объяснение протекающих в электрической цепи процессов и описывающих их физических законов.

1. РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ – ОДНО ИЗ НАИБОЛЕЕ ТРУДНЫХ ПОНЯТИЙ

Электрический ток на качественном уровне обычно объясняется направленным движением (дрейфом) электронов. Тем не менее, в книгах редко можно встретить со-

ответствующее этому качественное определение понятия «напряжение» или «разность потенциалов». Напряжение вводится как мера способности источника электрической энергии совершать работу и количественно равно отношению энергии к величине заряда.

Это определение несомненно правильно с физической точки зрения и элегантно с математической точки зрения. Однако оно не способно объяснить физические причины процессов, происходящих в электрических цепях.

Чтобы проиллюстрировать возникающие трудности, зададим себе несколько простых вопросов.

Какие различия (на микроскопическом уровне) в физическом состоянии точек А и В источника напряжения на рис. 1 являются причиной существования разности потенциалов?

Рис. 2 показывает, что в резисторе существует гораздо более сильное электрическое

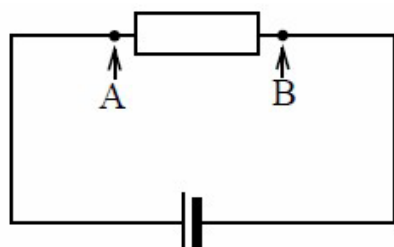


Рис. 1. Чем свойства проводника в точке А отличаются от свойств проводника в точке В?

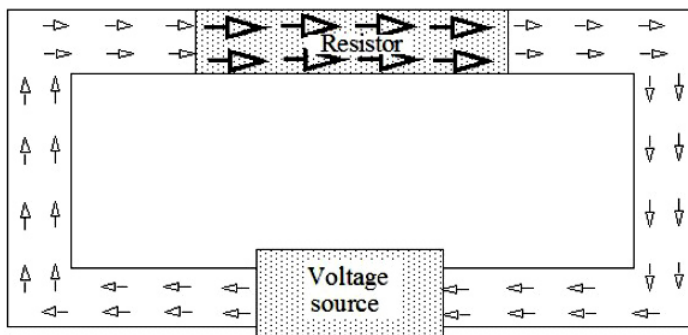


Рисунок 2. Какие заряды образуют сильное электрическое поле в резисторе?

поле по сравнению с очень слабым электрическим полем в подводящих проводах. Как это различие можно объяснить с помощью определения напряжения как «отношения значения энергии к величине заряда»?

И еще несколько вопросов. Электрическое поле внутри проводников, соединяющих резистор с источником, однородно (всюду одинаково) и направлено вдоль оси проводников, вне зависимости от длины и формы проводников. Как можно объяснить это? Что заставляет электрическое поле следовать искривлениям проводов? Где находятся заряды, создающие это электрическое поле? Находятся ли они внутри источника напряжения? В соответствии с законом Кулона, определяющим основное соотношение между зарядами и электрическим полем, разделенные заряды на выходах аккумулятора могут создать только такое электрическое поле, напряженность которого зависит от расстояния.

Результаты тестов показывают, что большинство учеников и даже многие учителя физики не могут дать ответ на эти вопросы.

В результате опросов [1] было выявлено, что учащиеся считают понятие напряжения сложным и непонятным. Неизвестно, сколько учеников теряют интерес к физике, поскольку не могут понять ее основные идеи, но, возможно, что многие. Удивитель-

но, что большинство учителей и авторов учебников мирятся с этой удручающей ситуацией, в то время как альтернативный способ объяснения известен уже более ста лет.

2. НАПРЯЖЕНИЕ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЗАРЯДЫ

Решение описанной проблемы было найдено более 150 лет назад. В 1892 году Вильгельм Вебер указал на тот факт, что, хотя проводник с током в целом является электрически нейтральным (не заряженным), на его поверхности сосредоточены заряды, плотность которых не одинакова в разных местах поверхности [2].

Сознавая, что разность потенциалов между двумя точками электрической цепи связана с различием плотности зарядов на поверхности проводников, можно найти ответы на приведенные выше вопросы:

- заряды на поверхности проводника в точке А (рис. 1) являются положительными, а в точке В – отрицательными;

- поперечные сечения внутри и вне резистора представляют собой области, в которых проводимость отличается на много порядков величины (рис. 2). Электроны и положительные заряды будут скапливаться в пограничных областях, порождая электрическое поле, под действием которого ток и будет протекать через резистор (рис. 4).

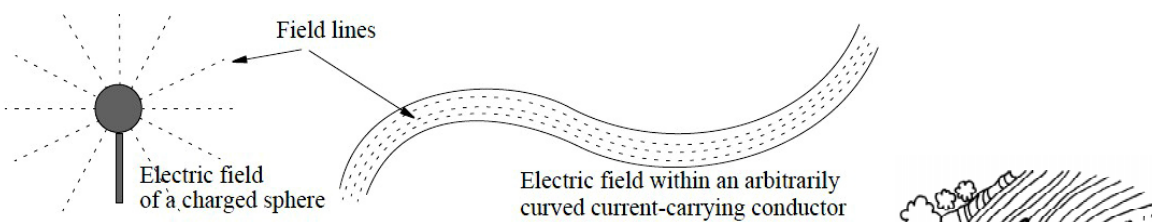


Рис. 3. Почему электрическое поле внутри проводника всюду одинаково и не зависит от расстояния до источника?

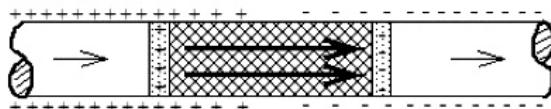
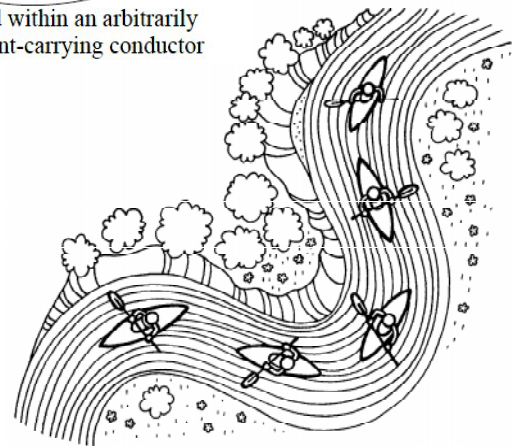


Рис. 4. Разделение зарядов на соединениях резистора и проводника

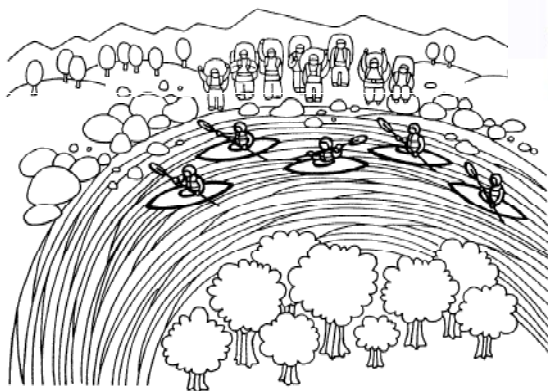


Корректность данного утверждения можно доказать с помощью теоремы Гаусса, согласно которой поток вектора напряженности электрического поля через любую замкнутую поверхность пропорционален заряду, заключенному внутри этой поверхности.

Рассмотрим замкнутую цилиндрическую поверхность на границе проводника и резистора, как показано на рис. 5. При этом поток напряженности электрического поля через основания цилиндра А и В будет различаться. Таким образом, должен существовать заряд на границе между областями высокой и низкой проводимости.

Поверхностные заряды на прямом бесконечно длинном проводнике будут порождать постоянное электрическое поле, ориентированное вдоль оси проводника (рис. 3). Если плотность заряда на поверхности проводника изменяется по линейному закону (то есть с постоянным градиентом, рис. 6), то внутри проводника создается однородное электрическое поле.

В случае, когда проводник изогнут, градиент поверхностной плотности заряда будет разным в разных местах. Больше электронов будет скапливаться с «внешней» стороны изогнутого проводника, определяя тем самым путь движения дрейфующих электронов проводимости, направленный вдоль оси проводника. Аналогичное объяснение может быть применено и для положительно заряженных участков проводника (рис. 7).



Больше электронов будет скапливаться с «внешней» стороны изогнутого проводника...

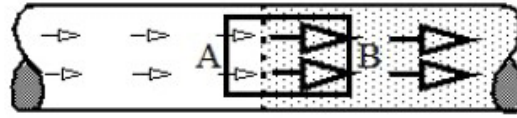


Рис. 5. Применение теоремы Гаусса на границе между проводником и резистором

В литературе встречается много упоминаний о связи напряжения с поверхностными зарядами [3–8], но они не привлекают большого внимания научного сообщества. Логично предположить, что отсутствие интереса к этому подходу усложняет для многих учащихся понимание основ электричества, что впоследствии может привести к потере у них интереса к предмету. Было бы полезным тщательное изучение этой гипотезы.

Историческое развитие представлений о поверхностных зарядах для различных проводников тока, эксперименты по их обнаружению и подробные теоретические выводы описаны в работе [9].

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Если в процессе преподавания понятие напряжения и разности потенциалов связать сначала с поверхностными зарядами, и лишь затем вводить количественное определение

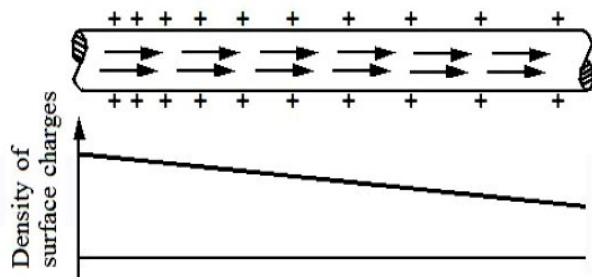


Рис. 6. Постоянный градиент плотности поверхностного заряда проводника

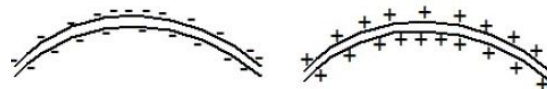


Рис. 7. Распределение зарядов на поверхности изогнутого проводника

этой величины как отношения энергии к заряду, то нужно предварительно изучить определенный фактический материал. Кроме того, требуется соблюдать определенную последовательность шагов обучения, сопровождая их физическими демонстрациями и работой в классе.

3.1. ЗАРЯДЫ, КУЛОНОВСКИЕ СИЛЫ, ЗАРЯДЫ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКАХ (КЛЕТКА ФАРАДЕЯ)

Требуются начальные знания об электрических зарядах и определенные экспериментальные факты о характере взаимодействия носителей заряда различной полярности (закон Кулона). Нужно также знать, что избыточные (не скомпенсированные) электрические заряды не могут находиться в объеме металлического проводника. Заряженные проводники несут свободные, не нейтрализованные электрические заряды только на своей поверхности.

Необходимо также объяснить, почему поверхность металла представляет собой барьер для электронов, но поскольку это довольно трудный вопрос, для начала можно просто считать этот факт известным. Тем не менее следует отметить, что этот барьер не является непреодолимым. Например, до создания транзисторов использовались электронные лампы, в которых свободные электроны оказывались в вакууме вне металлических проводников из-за нагрева этих проводников электрическим током.

Функционирование источника питания

В простейшем случае источник электрической энергии можно рассматривать как

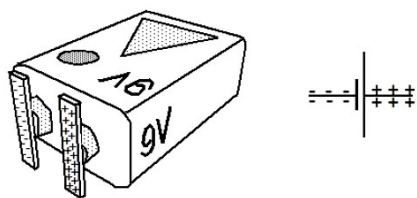


Рис. 8. Аккумулятор, рассматриваемый в качестве примера источника напряжения, и схема распределения поверхностных зарядов

токопроводящее устройство, подключаемое к внешней цепи двумя металлическими контактами. Главное свойство источника питания заключается в том, что он может обеспечить силу для перемещения находящихся внутри него электронов от одного внешнего контакта к другому. Природа этой силы зависит от типа источника. В случае аккумулятора это будут силы химической природы, а в случае генератора – электромагнитной.

Хотя природа сил может быть различной, их действие всегда одинаково: на одном из контактов будут накапливаться избыточные электроны, а на другом будет увеличиваться положительный заряд по причине недостатка электронов (рис. 8).

Чем больше плотность положительных или отрицательных зарядов на поверхности контактов, тем больше сила отталкивания между ними. То же самое справедливо и для положительно заряженных носителей на противоположном конце источника. В результате часть одноименных зарядов вытесняется с поверхности контактов и концентрируется на противоположных контактах. Таким образом, под действием кулоновских сил через некоторое время достигается определенный предел концентрации зарядов на поверхности контактов. Этот предел, при котором кулоновские силы и сторонние силы уравниваются друг друга, и разделение зарядов прекращается, характерен для каждого источника напряжения.

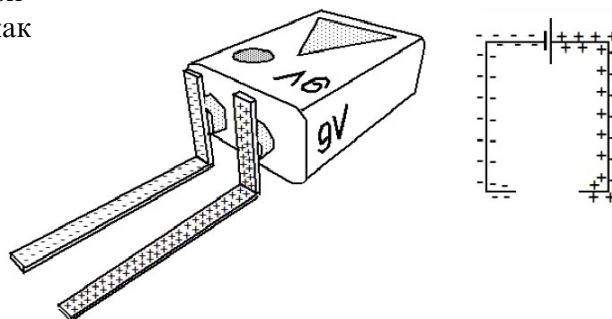


Рис. 9. Источник питания с подключенными к нему проводниками и схема распределения поверхностных зарядов

3.2. ЗАРЯДЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРОВОДНИКА

Подключение к контактам источника питания металлических проводников принципиально не отличается от увеличения площади поверхности контактов.

Пытаясь минимизировать взаимное отталкивание, носители заряда будут перераспределяться по этой увеличенной поверхности, что приведет к уменьшению плотности поверхностных зарядов. Это означает, что на короткий промежуток времени внутри источника нарушится равновесие между сторонними и кулоновскими силами, и электроны будут дополнительно выталкиваться на эту увеличенную поверхность, пока равновесие не восстановится.

3.3. ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЗАРЯДЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Если провода от источника соединить резистором, и источник питания обладает достаточной мощностью, чтобы все время замещать свободные электроны, проходящие сквозь резистор, в цепи будет циркулировать ток, в котором будут участвовать все электроны проводников (рис. 10).

Пока сторонние силы, выполняющие разделение зарядов в источнике питания, остаются постоянными, заряды на поверхности проводников также будут оставаться неизменными; однако электроны в проводниках будут дрейфовать по замкнутой цепи вместе с зарядами внутри источника.

3.4. РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ И ПЕРЕПАД ДАВЛЕНИЯ В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Такая механическая система как водяной контур может рассматриваться в качестве модели электрической цепи, если трактовать поток воды и давление воды как аналоги электрического тока и напряжения. Для того чтобы такая аналогия была корректной, кинетическая энергия потока воды должна быть пренебрежимо малой, то есть вода должна двигаться с достаточно малой скоростью. В таком случае причиной передачи энергии становится перепад давления. Распределение давления может быть продемонстрировано для последовательных и параллельных сетей с использованием датчиков давления или водяных столбов; затем может быть проведена аналогия с электрическими цепями.

Данный метод был применен во время разработки учебного пособия по электрическим цепям и сопровождался следующими иллюстрациями и экспериментами (рис. 11).

Опыт этой разработки показал, что наглядная гидравлическая аналогия обеспечивает большее взаимопонимание между учителями и учащимися, когда речь идет о процессах, протекающих в электрических цепях и недоступных органам чувств.

Тем не менее, как было подробно описано в предыдущей статье и подтверждено более ранними исследованиями [11], не следует ожидать слишком многого от аналогии

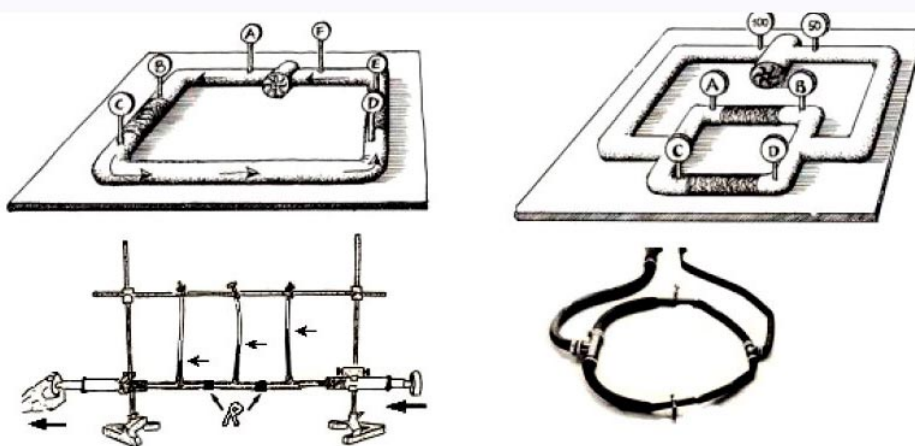


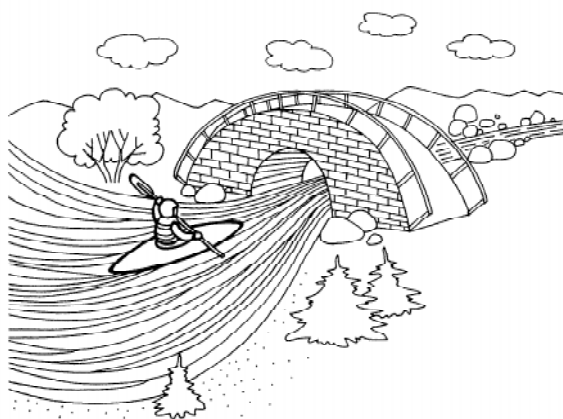
Рис. 11. Иллюстрации и установки для демонстрации действия перепадов давления в водяных контурах



...из-за кратковременного торможения перед резистором возникает противоток.

между перепадами давления и разностью потенциалов. Разница давлений в жидкости определяется ее сжатием, которое может отличаться в различных точках. Ученики, как правило, не знают этого и не могут полностью понять тему, просто обсуждая сжимаемость жидкости. Для определения градиента давления в последовательных и параллельных сетях и объяснения условий установившегося движения жидкости требуется тщательный и сложный анализ.

Если такой анализ возможен, то может быть полезным рассмотрение потока воды как движение фронта волны сжатия. Когда такой фронт достигает резистора, из-за кратковременного торможения перед резистором возникает противоток. Этот противоток уменьшает скорость набегающего потока, пока не будет достигнуто установившееся соотношение между входным и выходным потоками. Чтобы поток через резисторы был постоянным, давление на входе должно пре-



В состоянии установившегося движения перепад давления будет существовать между входом и выходом каждого резистора...

вышать давление на выходе резистора. Это означает, что сжатие протекающей воды на выходе меньше, то есть вода расширяется при прохождении через резистор.

Такая же ситуация происходит с любым резистором, через который волновой фронт должен пройти во время циркуляции по цепи. В состоянии установившегося движения перепад давления будет существовать между входом и выходом каждого резистора и будет пропорционален его сопротивлению.

Такой же анализ можно применить для объяснения происхождения и распределения поверхностных зарядов на проводниках с током. Электроны проводимости могут рассматриваться как некоторый «электронный газ», который может немного сжиматься или расширяться под действием источника напряжения. Однако это приводит лишь к уплотнению или разряжению «электронного газа» на поверхности проводника, а не по всему сечению, как в случае механического потока воды. Молекулы воды могут реагировать только за счёт короткодействующих сил взаимодействия с ближайшими соседними молекулами, благодаря чему вода может испытывать сжатие по всему сечению. Электроны взаимодействуют друг с другом благодаря кулоновским далекодействующим силам; при отталкивании они удаляются на большие расстояния друг от друга и могут быть нейтрализованы внутри проводника только точно таким же количеством положительных зарядов. Но на поверхности и только на поверхности проводника могут существовать дополнительные носители заряда.

3.5. ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Демонстрация поверхностных зарядов

В 1962 году О. Ефименко довольно просто продемонстрировал наличие зарядов на поверхности резистора, по которому протекал электрический ток [12]. В качестве резисторов использовались полосы красной краски, нанесенные на стеклянные пластины; к резисторам было приложено относи-

тельно высокое напряжение (> 10 кВ). Для визуализации электрического поля использовались семена травы, которые ориентируются по линиям напряженности электрического поля. Семена травы имеют заостренные концы, благодаря чему под воздействием электрического поля у них возникает относительно большой дипольный момент. Кроме того, семена имеют небольшую площадь опоры, следовательно, при их движении не возникает заметной силы трения. Легкое постукивание по стеклянной пластине помогает семенам на пластине ориентироваться вдоль линий напряженности электрического поля (рис. 12).

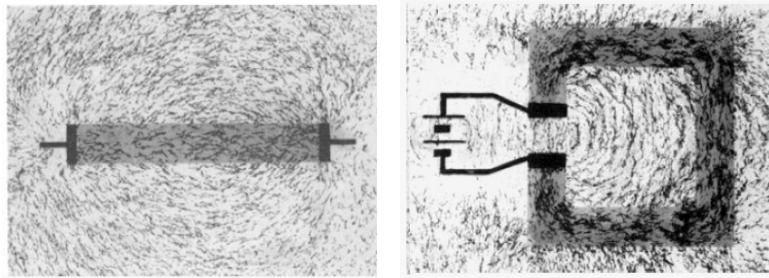


Рис. 12. Картины электрического поля внутри и вне резисторов, полученные с помощью семян травы [12]

Взаимодействие поверхностных зарядов с внешними зарядами

Наблюдать взаимодействие поверхностных зарядов с внешним заряженным объектом можно при достаточно большом сопротивлении и при большой разности потенциалов.

При соблюдении этих условий мы можем ясно наблюдать отталкивание легкой подвижной заряженной металлической фольги от цепочки резисторов с током (рис. 13). В этом эксперименте используется последовательное соединение 4 резисторов с приложенным напряжением 10 кВ. В ходе экс-

перимента рассматривается отталкивание заряженной металлической фольги при размещении рядом с различными точками цепи [13].

Этот эксперимент наглядно демонстрирует отсутствие взаимодействия фольги и электрической цепи близко к середине цепи. Однако при приближении к любому из концов цепи фольга отталкивается за счет электростатической индукции.

При замене металлической фольги заряженным изолятором (подвешенная соломинка с графитовым покрытием на концах) можно продемонстрировать различную полярность поверхностных зарядов на резисторах в разных концах цепи [14] (рис. 14).

3.6. УСПЕШНЫЙ УЧЕБНЫЙ КУРС: ВЫЗОВ ПРИНЯТ

В США издан курс «Электрические и магнитные взаимодействия» [15], в котором

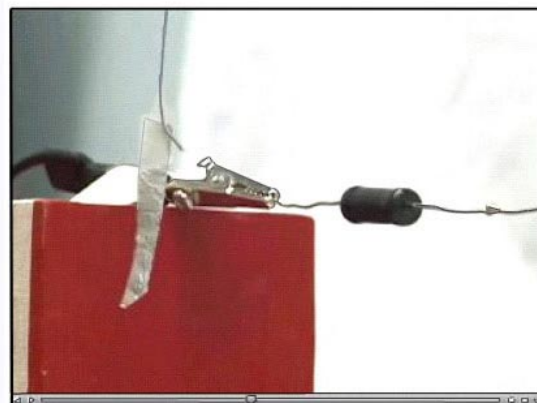
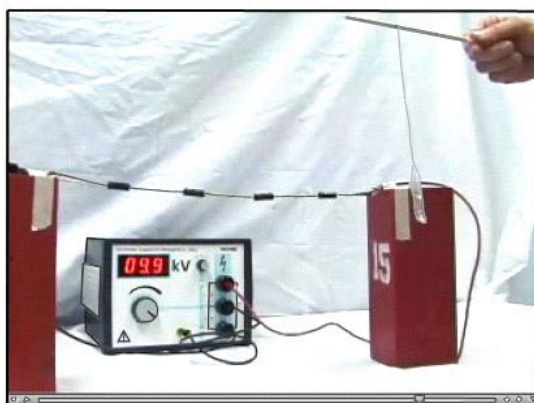


Рис. 13. Взаимодействие проводника с током с заряженной металлической фольгой для доказательства существования поверхностных зарядов

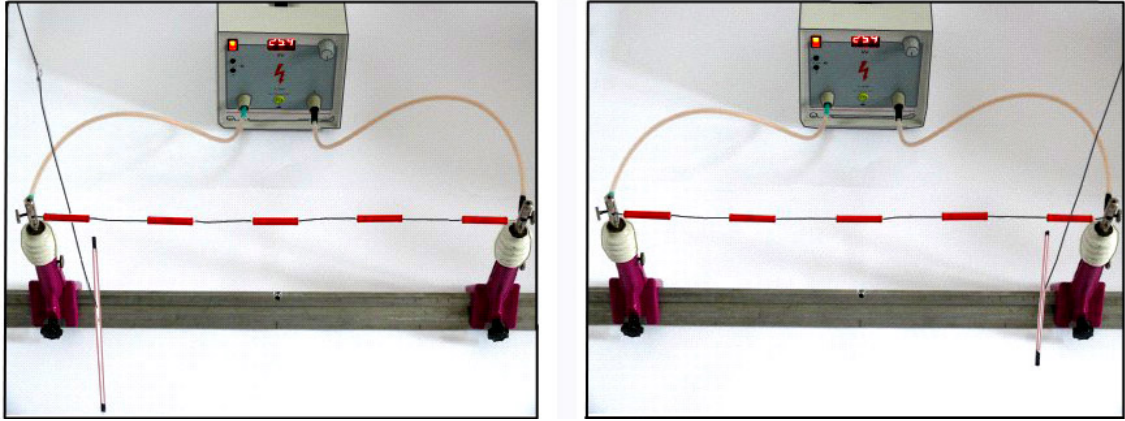


Рис. 14. Взаимодействие электрической цепи с током, состоящей из резисторов и заряженной соломинки для доказательства существования поверхностных зарядов

используются следующие иллюстрации (рис. 15).

Эти иллюстрации используются для объяснения происхождения силы, движущей электроны в проводнике любой формы, для объяснения, почему уменьшение сечения провода приводит к повышению сопротивления, какие заряды связаны с сильным полем внутри резистора и т. д.

Подобные иллюстрации – хотя бы частично – могут стимулировать учеников к обсуждению во время занятия или могут быть использованы в качестве упражнения для проведения более детального анализа электрической цепи, которая является одно-

временно и очень простой, и сложной системой.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введение понятия разности потенциалов или напряжения как способности источника тока совершать работу, которое количественно определяется как отношение энергии к величине заряда, является односторонним в своей математической направленности. С точки зрения обучения, такой подход может критиковаться как одновременно слишком абстрактный и не интуитивный. Он не вскрывает связи между напряжением и

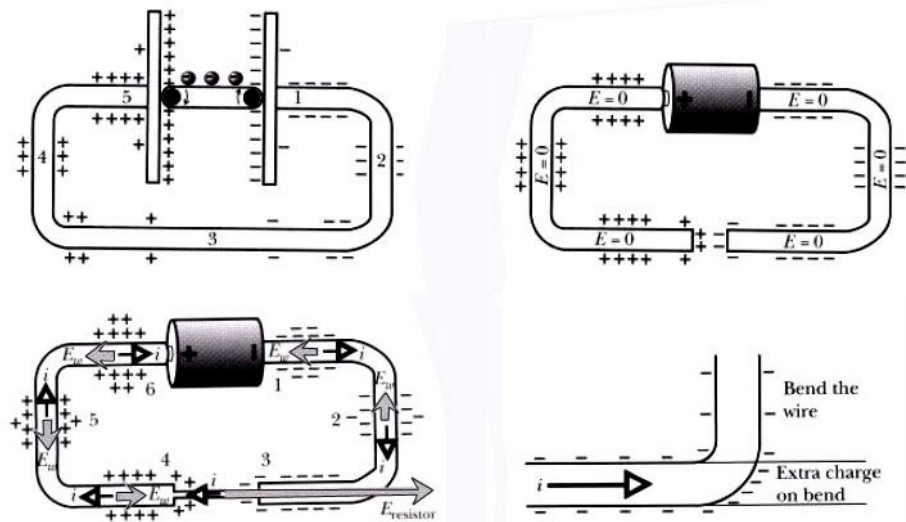


Рис. 15. Иллюстрации из американского курса, демонстрирующие распределение плотности поверхностных зарядов [15]

поверхностными зарядами и не дает шанса учащимся развить физическую интуицию.

Если учащиеся самостоятельно не задают вопрос, каков физический смысл электрического напряжения, то следует предложить им найти ответ на этот вопрос, изучая приведенные выше примеры. Однако, как

правило, учащиеся их задают, и ответы, приведенные здесь, должны войти в стандартный план урока, чтобы преподаватель мог справиться с вопросами учащихся или стимулировать дискуссию, предлагая учащимся подумать над подобными вопросами.

Литература

1. Härtel H. et al. (2005): Test about Voltage – A Basic Term in Electricity Results. http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/Spannung/voltage_test_result.pdf
2. W. Weber. (1852): Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Widerstandsmessungen. Abhandlungen der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften, mathematisch-physische Klasse, 1, S. 199–381. Nachdruck in Wilhelm Weber's Werke, Vol. 3, H. Weber (ed.), Springer, Berlin, 1993, S. 301–471.
3. Marcus A. (1941) The electric field associated with a steady current in a long cylindrical conductor, American Journal of Physics, 9, S. 225–226.
4. Rosser W.G.V. (1963): What makes an electric current flow, American Journal of Physics, 31, S. 884–885.
5. Sommerfeld A. (1964): Elektrodynamik, Leipzig 1964, S. 113–117.
6. Härtel H. (1979): Zur Einführung des Spannungsbegriffs in der Sek. I. In: Härtel, H. (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie, Hannover: Schroedel, S. 154–156.
7. Walz A. E-Felder um stationäre Ströme; PU 2-1984, 5 S. 61–68.
8. Härtel H. (1985): The electric voltage: What do students understand? What can be done to help for a better understanding? In: Duit, R. (ed.); Jung, W. (ed.); Rhöneck, C. von (ed.): Aspects of Understanding Electricity. Proceedings of an International Workshop. IPN-Arbeitsberichte 59. Kiel: IPN, S. 353–362.
9. Assis A., Hernandes J. (2007): The Electric Force of a Current; Apeiron Montreal; (verfügbar unter: <http://www.ifi.unicamp.br/~assis/The-Electric-Force-of-a-Current.pdf>).
10. Härtel H. (1981) IPN-Unterrichtseinheit «Stromstärke, Spannung; Widerstand» für das 7. bis 8. Schuljahr, Klett (Überarbeitete und gekürzte Fassung verfügbar unter <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/PUB/UE-7.pdf>).
11. Schwedes H., Dudeck W.-G., Seibel C. (1995): Elektrizitätslehre mit Wassermodellen, Praxis der Naturwissenschaften – Physik, 44, S. 28–36.
12. Jefimenko O. (1962): Amer. J. Phys. 30, S. 19–21.
13. A video about this experiment is found under: <http://matterandinteractions.org/Content/Materials/Videos/SurfaceCharge.mov>.
14. A video about this experiment is found under: <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/PUB/straw.htm>.
15. Chabay R., Sherwood B. (2002): Matter and Interaction, Vol. II: Electric & Magnetic Interaction, John Wiley.

Dr. Herman Hartel,
Университет им. Христиана
Альбрехта, г. Киль, Германия.

Перевод с нем. Курбатовой М.А.
под ред. Бутикова Е.И.



Наши авторы, 2013.
Our authors, 2013.