

Земной шар в целом является проводником. Возможно, что Земле присущ некоторый электрический потенциал по отношению к удаленным точкам мирового пространства, и возможно, что другим небесным телам присущи другие значения потенциала.

Земля (если ее рассматривать отдельно от атмосферы) имеет отрицательный заряд порядка 500 000 кулонов. Примерно такой же положительный заряд распределен в атмосфере. Если бы заряда атмосферы не было, то Земля по отношению к каким-либо точкам мирового пространства, которые удалены от электрических зарядов, имела бы потенциал порядка 700 млн. в.

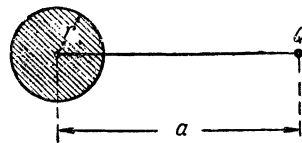


Рис. 28.

В электротехнике (а часто и в физике) потенциал земли принимают условно равным нулю. Термин «напряжение» обычно служит для обозначения потенциала поля по отношению к земле. Все проводники, которые соединены проводником с землей («заземлены»), в состоянии электрического равновесия имеют потенциал, по отношению к земле равный нулю. Но если состояние электрического равновесия нарушено, то потенциал заземленного (например, при помощи длинной тонкой проволоки) проводника по отношению к земле может быть и не равен нулю; тогда ток идет из проводника в землю, если напряжение проводника положительно, и в обратном направлении, если оно отрицательно.

В более широком смысле слова под «напряжением» понимают вообще разность потенциалов в двух точках проводника.

§ 12. Контактная разность потенциалов

Весьма важно, что при соприкосновении проводников различной химической природы электрическое равновесие устанавливается, вообще говоря, при *неодинаковых* потенциалах этих проводников. Для электрического равновесия необходимо, чтобы во всех точках внутри проводника потенциал был одинаков, но на границе соприкосновения (контакта) разнородных проводников значение потенциала может испытывать некоторый скачок, причем во всех точках другого проводника потенциал имеет также одинаковое значение, однако оно может быть отлично от значения потенциала в первом проводнике. Поле в каждом из соприкасающихся проводников отсутствует, но для перемещения небольшого пробного заряда Q из одного проводника в другой может потребоваться вследствие различной химической природы соприкасающихся проводников затрата некоторой работы A , пропорциональной величине заряда Q . Отношение этой работы к величине перемещаемого заряда и будет представлять собой разность потенциалов соприкасающихся про-

водников при их электрическом равновесии:

$$\frac{A}{Q} = V_2 - V_1.$$

Опыт показывает, что при соприкосновении разнородных проводников на границе соприкосновения действительно обнаруживается некоторая характерная для каждой пары проводников разность потенциалов, которую называют *контактной разностью потенциалов*. Величина этой контактной разности потенциалов зависит только от химической природы и молекулярного строения соприкасающихся проводников, а также от физических условий, определяемых температурой и давлением, но не зависит ни от размеров, ни от геометрической формы проводников, ни от площади поверхности, по которой они соприкасаются.

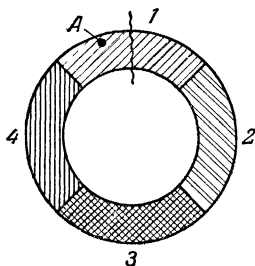


Рис. 29. Цепь разнородных проводников первого рода.

Каково происхождение контактной разности потенциалов и как связана ее величина с особенностями строения проводника? Эти вопросы мы только кратко рассмотрим в данном параграфе и остановимся на них дополнительно в § 33. Но прежде всего мы должны согласовать с выводами электростатики тот факт, что на поверхностях соприкосновения проводников различной химической природы могут существовать и обычно существуют скачки потенциала.

Если соприкосновение разнородных проводников не влечет за собой химического превращения соприкасающихся веществ, их называют *проводниками первого рода*. Проводниками первого рода являются металлы, сплавы, уголь, графит.

Рассмотрим «цепь», составленную из нескольких проводников первого рода (рис. 29). Обратим внимание на величину потенциала в какой-либо точке одного из этих проводников, например в точке A; пусть он равен V_2 . Поскольку никакие химические или другие процессы в данном случае не являются источником электрического тока, то по принципу сохранения энергии рассматриваемая цепь проводников должна находиться в электрическом равновесии.

В электростатическом поле потенциал является величиной однозначной. Это означает, что если, отправляясь из точки A, мы будем перемещать единицу заряда в любом направлении, например по цепи проводников, и, проведя ее по замкнутому пути, вернемся в исходную точку A, то суммарная затрата работы алгебраически будет равна нулю, т. е. в данном случае будет равна нулю полная сумма контактных скачков потенциала; вследствие этого, вернувшись в точку A, мы обнаружим в ней то же значение потенциала, которое

было найдено до осуществления указанной «циркуляции»:

$$V_A + \sum \Delta V_{k, k+1} = V_A,$$

или

$$\sum \Delta V_{k, k+1} = 0,$$

где $\Delta V_{k, k+1}$ — контактная разность потенциалов между участками цепи k и $k+1$ (где $k=1, 2, 3$ и т. д.).

Итак, для цепи, составленной во всех своих звеньях из проводников первого рода, полная сумма контактных скачков потенциала равна нулю. Это утверждение называют законом Вольта.

Разрежем цепь проводников, представленную схематически на рис. 29 так, как показано на этом рисунке волнистой чертой, т. е.

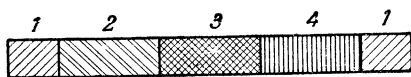


Рис. 30. Правильно разомкнутая цепь имеет на концах проводники одного рода

не по поверхности раздела разнородных проводников. Такая разомкнутая цепь проводников, имеющая на концах («на полюсах») проводники одного рода, называется *правильно разомкнутой цепью* (рис. 30). В такой цепи сохраняется та же полная сумма контактных скачков потенциала, которая по закону Вольта равна нулю. Стало быть, *разность потенциалов на полюсах правильно разомкнутой цепи, составленной из проводников первого рода, равна нулю.*

Следует иметь в виду, что для приведенного нами обоснования закона Вольта и теоремы о равенстве потенциалов на полюсах правильно разомкнутой цепи проводников первого рода существенное значение имело предположение, что на рассматриваемую цепь проводников не оказывается какого-либо энергетического воздействия. Если это условие не соблюдено, например, если один участок цепи мы будем нагревать, а другой охлаждать, то закон Вольта может нарушиться и на концах правильно разомкнутой цепи проводников первого рода может обнаружиться некоторая разность потенциалов (§ 33).

Если соприкосновение проводников вызывает химическую реакцию между ними, то проводник, в котором протекает химическая реакция, называют *проводником второго рода*, или *электролитом* (обычно это жидкости, в частности водные растворы многих веществ). Химическая реакция, протекающая в электролите и на поверхностях соприкосновения электролита с металлами, углем, может явиться причиной длительного нарушения электрического равновесия, т. е. причиной электрического тока. Условия, обеспечивающие

подобную «электрификацию» химических реакций, рассмотрены в главе VII.

Для цепи, составленной из проводников, среди которых имеются проводники второго рода, закон Вольта несправедлив. Полная сумма скачков контактных потенциалов в такой цепи, вообще говоря, отлична от нуля. Это связано с тем, что, когда такая цепь замкнута, в ней не устанавливается электрическое равновесие, а протекает электрический ток. Если же такая цепь разомкнута (подразумевается, что она правильно разомкнута), то между ее полюсами обнаруживается разность потенциалов, равная полной сумме контактных разностей потенциалов во всей цепи. Подробнее об этом сказано в §§ 24, 33 и 40.

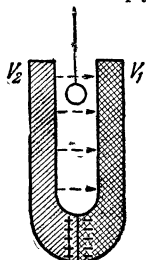


Рис. 31.

Скачки потенциала в электростатическом поле могут существовать не только на поверхностях соприкосновения проводников, но и на поверхностях соприкосновения проводника и диэлектрика, а также и на поверхностях соприкосновения двух диэлектриков.

Экспериментальные исследования показывают, что контактные разности потенциалов в большинстве случаев составляют десятые доли вольта, но во многих случаях они существенно больше вольта.

На рис. 31 представлена принципиальная схема возможного определения контактной разности потенциалов по измерению напряженности создаваемого ею электрического поля. Скачок потенциала имеет место на границе тесного соприкосновения металлов, например их спая, а также на границе металла и диэлектрика. Когда две электрически нейтральные пластины, допустим, цинковая и серебряная, приведены в тесное соприкосновение, то вследствие контактной разности потенциалов каждая из них электризуется; цинковая приобретает положительный заряд, а серебряная — отрицательный. Поверхности пластин будут эквипотенциальными поверхностями. Если некоторая часть пластин разъединена вакуумом, то в пространстве между этой частью пластин должно существовать электрическое поле, напряженность которого равна разности потенциалов (с учетом скачка потенциала на границе металл — вакуум), деленной на расстояние между пластинами.

В действительности измерение контактной разности потенциалов сопряжено со многими трудностями. Если придерживаться схемы, показанной на рис. 31, и для оценки поля между пластинами поместить туда легкий, например бузиновый, наэлектризованный шарик, подвешенный на нити, то ожидаемый эффект отклонения шарика и нити под действием поля, вызванного контактной разностью потенциалов, будет совершенно искажен явлением электрической индукции. Присоединение вольтметров к проводникам, контактный потенциал которых мы хотели бы измерить, сопряжено с созданием других контактов между этими проводни-

ками и проводами; это вводит в измерительную цепь новые скачки потенциалов.

Существование контактной разности потенциалов было обнаружено Александром Вольта на заре развития учения об электричестве, в 1797 г. Но вследствие трудностей измерения до сравнительно недавнего времени не было надежных данных о величинах контактных разностей потенциалов. Многие противоречия в сделанных измерениях были вызваны, между прочим, тем, что величина контактной разности потенциалов сильно зависит от состояния поверхностных слоев металлов и от наличия примесей в них.

Следует отметить также, что измерения контактной разности потенциалов по схеме рис. 31 дают сумму, в которую входят скачок потенциала на границе соприкосновения двух металлов и два скачка потенциала при переходе из металлов в вакуум (рис. 32). Поэтому, во-первых, замена вакуума диэлектриком влияет на измеряемую суммарную разность потенциалов. Во-вторых, измерение суммарного скачка потенциала не позволяет однозначно определить скачок потенциала на поверхности соприкосновения двух проводников.

Как примирить универсальный факт скачка электрического потенциала на поверхностях раздела веществ с представлением о том, что равновесие осуществляется при выравнивании потенциалов? Чтобы получить правильный ответ на этот вопрос, нужно отказаться от изолированного рассмотрения электрических явлений вне их природной связи с другими явлениями, т. е. выйти за рамки классической электростатики и учесть действительную взаимосвязь электрических, химических и тепловых явлений.

В первом томе (§ 105, стр. 424, 425) было указано, что термодинамическое равновесие между разнородными веществами устанавливается при равенстве полных термодинамических потенциалов, вычисленных парциально для веществ-компонентов (иначе эти потенциалы называют «химическими»). Мы должны теперь принять во внимание, что, во-первых, термодинамическое равновесие — это сочетание равновесий в отношении всех макрофизических процессов, т. е. сочетание теплового, диффузионного, химического, электрического и других равновесий. Во-вторых, нужно иметь в виду, что электрический потенциал входит в полный термодинамический потенциал в качестве одного из слагаемых (другими

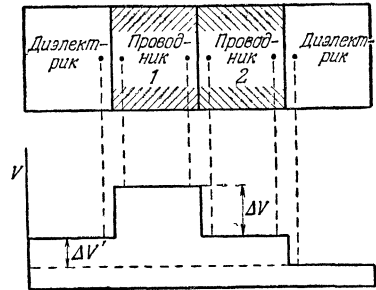


Рис. 32. Разность потенциалов $\Delta V'$, определяемая по полю в диэлектрике (см. рис. 31), отличается от действительной разности потенциалов ΔV при контакте проводников.

слагаемыми являются потенциал термического давления, потенциал сил химического сродства, потенциал сил тяготения и т. п.). Итак, электрическое равновесие между разнородными веществами — будь то проводники или изоляторы — должно существовать при равенстве полных термодинамических потенциалов, вычисленных парциально для частиц — носителей электрических зарядов, т. е. электронов или (в случае проводников второго рода) ионов. Для разных веществ эти полные потенциалы вообще неодинаковы. Поэтому при соприкосновении разнородных веществ *выравнивание этих полных потенциалов как раз и происходит за счет возникновения скачка электрического потенциала.*

Иначе говоря, контактная разность электрических потенциалов уравнивается природным неравенством потенциалов других сил — сил «электронного термического давления» в металлах (§ 33), электрохимических сил в электролитах (§ 40), сил «сродства» электронов к атомам и молекулам в диэлектриках. Можно сказать также, что в слое соприкосновения разнородных веществ электрические заряды перемещаются внутренними — или, как их называют также, «сторонними» — силами до тех пор, пока эти силы не уравновешиваются силами, вызванными происшедшей электризацией соприкасающихся тел. Это означает также, что в слое соприкосновения разнородных веществ **суммарная напряженность электрического поля** складывается из силы, вызванной зарядами макроскопической электризации, происшедшей благодаря контакту, и внутренней, «сторонней» электрической силы, имеющей противоположное направление. При равновесии эта суммарная напряженность поля в слое соприкосновения проводников равна нулю.

Следует, однако, отметить, что в электростатике, где изучается поле неподвижных зарядов и где поневоле мы отвлекаемся от связи явлений с другими формами движения, не принято применять указанную суммарную напряженность поля. В электростатике под напряженностью поля подразумевают только первую из указанных составляющих суммарной напряженности поля, т. е. напряженность, создаваемую макроскопическими зарядами электризации тел.

По-видимому, допустимо считать, что при теснейшем сближении тел разноименные заряды контактной электризации размещены двойным слоем на расстоянии порядка межмолекулярных расстояний, т. е. порядка 10^{-8} см. Оценивая электростатическую напряженность поля в тончайшем слое соприкосновения тел как величину, равную контактной разности потенциалов, разделенной на упомянутое расстояние, мы приходим к выводу, что макроэлектростатическая напряженность поля здесь очень велика и имеет порядок 10^8 в/см. Такова же, но обратна по направлению напряженность внутреннего электрического поля «сторонних» сил. Неудивительно, что эти мощные силы разрывают связь электронов с веществом про-

водника или диэлектрика и в первое же мгновение при соприкосновении тел приводят к их электризации, создавая этим контактный скачок потенциала.

Если можно было бы проводники, зарядившиеся вследствие контактной разности потенциалов, разъединить строго одновременно во всех точках поверхности соприкосновения, то, удаляя друг от друга эти противоположно заряженные проводники и, следовательно, затрачивая работу на преодоление их взаимного притяжения, мы многократно повысили бы потенциал каждого из них. Однако на деле такой способ обнаружения контактной разности потенциалов у проводников невозможен. Поверхности всегда имеют микроскопические шероховатости, поэтому в какой-либо точке поверхности контакт будет нарушен позже, чем в других точках. К этому моменту потенциал разъединяемых проводников уже несколько возрастет, и вследствие проводимости соприкасающихся веществ заряды стечут по «мостику» последнего контакта и нейтрализуются.

Из сказанного ясно, что электризация, возникающая при контакте диэлектриков, должна сохраняться при их разъединении, а установившаяся между ними при соприкосновении контактная разность потенциалов должна при разъединении диэлектриков многократно возрастать. Это подтверждается в явлениях «электризации тел при трении». Трение здесь играет, по-видимому, только ту роль, что обеспечивает последовательно тесное соприкосновение различных точек поверхностей тел. Электризация тел при трении возникает, вероятно, вследствие контактной разности потенциалов соприкасающихся диэлектриков. Вначале потенциал электризации незначителен — порядка нескольких вольт, но при разъединении тел потенциал возрастает в соответствии с работой, затрачиваемой на преодоление притяжения разноименных зарядов (аналогично возрастает потенциал заряженного конденсатора при раздвигании его пластин). В итоге потенциал электризации от контакта диэлектриков может достигать сотен вольт. Об этом свидетельствуют искорки, появляющиеся при сближении наэлектризованного «трением» тела с проводником.

§ 13. Электроемкость

Электроемкостью какого-нибудь проводника называют численную величину заряда, который сообщает этому проводнику потенциал, равный единице (при условии, что рассматриваемый проводник весьма удален от других проводников или же что другие проводники, находящиеся в поле, заземлены, т. е. что их потенциал равен нулю).

Когда мы заряжаем электричеством проводник, изолированный от влияния посторонних зарядов, электричество, сообщенное