

9. Показать, что эквипотенциальными поверхностями двух параллельных бесконечно длинных прямых, равномерно заряженных электричествами противоположных знаков, являются круговые цилиндры, оси которых параллельны рассматриваемым линиям и лежат с ними в одной плоскости.

У к а з а н и е. Уравнение эквипотенциальной поверхности имеет вид $r_1/r_2 = \text{const}$, где r_1 и r_2 — расстояния до рассматриваемых прямых. Записав это уравнение в координатах, нетрудно убедиться, что эквипотенциальными поверхностями будут круговые цилиндры.

§ 20. Измерение разности потенциалов электрометром. Электрический зонд

1. Электроскоп, листочки или стрелка которого окружены металлической оболочкой, может служить *электрометром*, т. е. прибором для измерения разности потенциалов между двумя проводниками. Один из проводников соединяют с шариком электрометра,

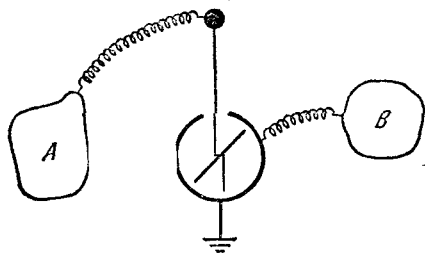


Рис. 58.

а другой — с оболочкой (рис. 58). Стрелка электрометра примет потенциал тела A , оболочка — потенциал тела B . Возникнет электрическое поле с силовыми линиями, идущими от оболочки к стрелке или обратно. Угол отклонения стрелки определяется напряженностью и конфигурацией этого поля. Но поле внутри замкнутой металлической оболочки совершенно не зависит от наружного поля.

Оно однозначно определяется разностью потенциалов между оболочкой и стрелкой. Следовательно, угол отклонения стрелки может служить мерой разности потенциалов между телами A и B . Электрометр можно проградуировать, чтобы сразу отсчитывать разность потенциалов в вольтах. Обычно в качестве тела B берут Землю, т. е. оболочку электрометра заземляют. Тогда электрометр покажет потенциал тела A относительно Земли.

2. В принципе безразлично что заземлять: оболочку или шарик. От этого зависит только направление силовых линий, но не их конфигурация и величина напряженности поля внутри оболочки. Угол отклонения стрелки в обоих случаях будет одинаков. Установим электрометр на диэлектрике и заземлим его оболочку. Затем с помощью наэлектризованной палочки зарядим шарик. Стрелка отклонится. Заземлим теперь шарик, а оболочку изолируем. Той же палочкой электризуем оболочку, стрелка отклоняется так же. Но стрелка электрометра защищена от влияния внешних электрических зарядов, так как она окружена металлической оболочкой. Почему же при электризации оболочки стрелка отклоняется? Дело

в том, что ее защита *не полная*. Оболочка не замкнута. В ней есть отверстие, через которое проходит металлический стержень, соединяющий стрелку с шариком электрометра. Электричество, сообщенное наружной поверхности оболочки, индуцирует заряды на шарике, которые по стержню переходят на стрелку электрометра. Заряженные стрелка и стержень оттягивают часть электричества с наружной поверхности оболочки на внутреннюю. В результате появляется электрическое поле не только снаружи, но и внутри оболочки. Мы видим, что электрометр только тогда может служить измерительным прибором, когда его стрелка защищена от внешних электрических полей не полностью. Но связь стрелки с внешними телами должна быть слабой. Для этого отверстие в оболочке, шарик электрометра и наружная часть стержня, соединяющего шарик со стрелкой, должны быть малыми. Иначе на этих частях электрометра могли бы возникать заметные заряды, индуцированные посторонними внешними телами. Переходя на стрелку, такие заряды внесли бы заметные искажения в измеряемую разность потенциалов. По той же причине провода, соединяющие тела *A* и *B* с шариком и оболочкой электрометра, должны быть тонкими.

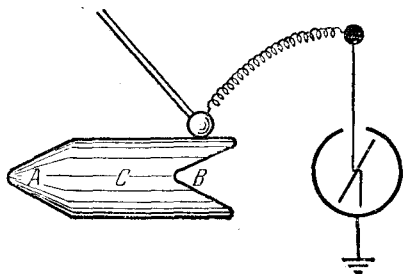


Рис. 59.

3. Поучителен также следующий опыт. Пробный шарик на изолирующей ручке соединен гибким проводом с шариком электрометра, оболочка которого заземлена (рис. 59). При перемещении пробного шарика по поверхности заряженного металлического тела *C* показание электрометра не меняется. Это и понятно. Электрометр измеряет разность потенциалов между шариками. Потенциал же пробного шарика не зависит от того, какой точки проводящего тела *C* он касается. В аналогичном опыте, описанном в § 11 (см. рис. 33), электрометр не чувствовал заряда, снятого с впадины *B*. Отсюда не следует, что в точке *B* поверхностная плотность электричества равна нулю. Можно лишь сказать, что прежний опыт недостаточно чувствителен, чтобы ее обнаружить. Новый опыт позволяет определенно утверждать, что плотность электричества у *B* хотя и мала, но не равна нулю. Если бы это было не так, то стрелка электрометра не могла бы отклоняться, когда незаряженным пробным шариком касаются проводника *C* в точке *B*. Заряд, перешедший с тела *C* на пробный шарик и электрометр, не зависит от положения точки касания. От этого может зависеть только время зарядки электрометра. Оно хотя и очень мало, но всегда конечно. Когда пробный шарик касается острия *A*, зарядка происходит

всего быстрее; когда он касается впадины B , электрометр заряжается медленнее.

4. Для измерения потенциала в различных точках жидкого или газообразного диэлектрика можно пользоваться методом *электрического зонда*. Зонд представляет собой малое металлическое тельце (кончик проволоочки, выступающий из диэлектрической трубочки, шарик или диск), соединенное с шариком электрометра, оболочка которого заземлена. Он вводится в ту точку диэлектрика, потенциал которой надо измерить. Очевидно электрометр укажет разность потенциалов между стрелкой и оболочкой или, что то же самое, между зондом и Землей. Однако зонд, соединенный с электрометром, вообще говоря, существенно меняет потенциал той точки пространства, в которую он вносится. Причиной этого являются индукционные заряды, появляющиеся на зонде и шарике электрометра, с которым он соединен.

Допустим сначала, что маленький зонд A изолирован (рис. 60, *а*). При введении в электрическое поле зонд поляризуется. Положительные и отрицательные заряды немного смещаются в противоположных направлениях. Так как эти смещения малы, то внесение зонда исказит поле в окрестности точки A очень мало. На шарике и стрелке электрометра также возникают индукционные заряды противоположных знаков. Соединим теперь тонкой проволокой зонд A с шариком электрометра B (рис. 60, *б*). Тогда на зонде A останется электричество только одного знака, электричество противоположного знака перейдет на электрометр. Так как количество перешедшего электричества очень мало, то потенциал шарика B и стержня электрометра при этом практически не изменится. Не то будет с потенциалом зонда A . Геометрические размеры зонда малы. Небольшой заряд, ушедший с зонда, существенно меняет его потенциал. Зонд A принимает потенциал шарика и стержня электрометра. Таким образом, соединение зонда с электрометром практически не сказывается на угле отклонения стрелки. Показание электрометра не имеет никакого отношения к потенциалу, существовавшему в точке A до внесения в нее зонда.

Для возможности измерения потенциала необходимо, чтобы при внесении зонда в точку A зонд и соединенный с ним шарик электрометра приняли потенциал, существовавший в точке A до внесения зонда. Этого можно достигнуть, убирая индукционные заряды, образующиеся на зонде. В *капельном зонде* телом A служит малое ведерко, наполненное проводящей жидкостью. В дне ведерка имеется малое отверстие. Капли жидкости, уходящие через это от-

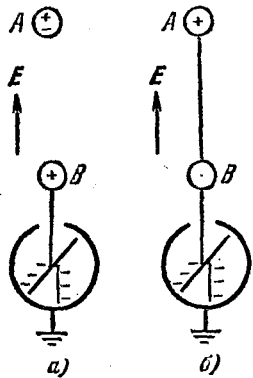


Рис. 60.

верстие, уносят индукционные заряды, образующиеся на зонде. При этом заряды противоположного знака переходят с зонда на стержень и стрелку электрометра. Благодаря этому угол отклонения стрелки изменяется. В установившемся состоянии, когда зонд оказывается незаряженным, потенциал зонда становится равным потенциалу окружающего пространства. А так как зонд соединен проводником с шариком электрометра *B*, то потенциал последнего будет таким же. В результате электрометр покажет как раз тот потенциал, который надо измерить.

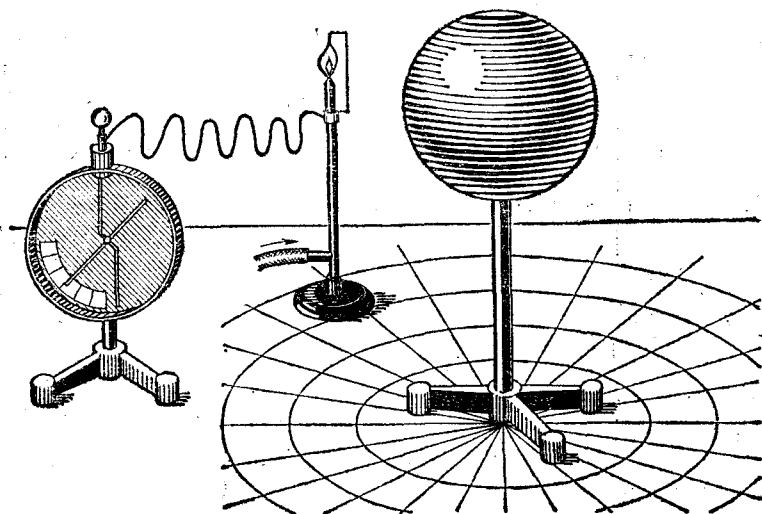


Рис. 61.

Удаление индукционных зарядов с зонда можно осуществить и другими способами. Например, зондом может служить кончик металлической проволоки, выступающий из диэлектрической трубочки, играющей роль газовой горелки (*пламенный зонд*). Благодаря высокой температуре пламени окружающий воздух немного ионизируется и становится проводящим. Образующиеся ионы снимают индукционные заряды с зонда и уносятся потоком окружающего газа. Аналогичная идея используется в *радиоактивном зонде*. На зонд наносится небольшое количество радиоактивного вещества, которое и создает нужную ионизацию окружающего газа. В том и другом случае на зонде устанавливается потенциал, равный потенциалу окружающего пространства до внесения в него зонда. То же самое происходит в проводящих жидкостях (электролитах), в которые погружены заряженные электроды. Здесь удаление

индуцированных зарядов с зонда обеспечивается проводимостью самой жидкости.

5. Следующий демонстрационный опыт может служить для иллюстрации действия зонда. Холодный пламенный зонд помещается вблизи большого изолированного металлического шара (рис. 61). Пока зонд холодный, стрелка электрометра не отклоняется, если даже шар сильно зарядить. Но отклонение стрелки становится большим, если зажечь светильный газ, вытекающий из трубочки зонда. При приближении электрометра к шару отклонение стрелки увеличивается, при удалении — уменьшается. Стрелка стоит на месте при перемещении зонда по сферической эквипотенциальной поверхности, concentрической с поверхностью шара.

§ 21. Электрическое поле Земли

1. Электрическим зондом можно измерять и напряженность поля в диэлектриках, например в газах. Надо измерить потенциал ϕ в различных точках пространства, а затем вычислить его градиент. Проще и точнее, однако, напряженность поля измеряется непосредственно.

Один из способов состоит в следующем. Две параллельные металлические пластины (воздушный конденсатор) устанавливаются перпендикулярно к направлению измеряемого электрического поля (рис. 62). Пластины соединяются между собой через баллистический гальванометр, с помощью которого можно измерять величину заряда, прошедшего через цепь. Так как пластины соединены, то их потенциалы одинаковы, а напряженность электрического поля между ними равна нулю. Поле существует только снаружи

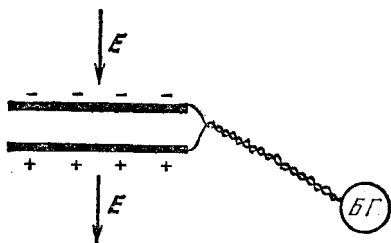


Рис. 62.

пластин и связано с поверхностной плотностью электричества соотношением $E = 4\pi\sigma$ (в газах различием между D и E можно пренебречь). Если зазор между пластинами мал по сравнению с их размерами, то можно также пренебречь влиянием краев пластин, считая величину σ постоянной. Пластины быстро поворачивают на 90° в вертикальное положение. При этом через баллистический гальванометр проходит заряд $q = S\sigma$, где S — площадь пластины. Измерив q , можно вычислить σ , а затем и напряженность поля E .

2. Подобные измерения показали, что земной шар заряжен отрицательно. Земное электрическое поле меняется во времени. Эти изменения могут быть регулярными (суточными и годовыми) и нерегулярными. В среднем напряженность поля у самой поверхности Земли составляет 130 В/м. Между двумя уровнями, отстоящими друг от друга на рост человека, существует разность потенциалов примерно 200 В. Человек не чувствует этой разности потенциалов и его не поражает ток потому, что сам он является хорошим проводником электричества. Как и всякий проводник, тело человека сильно искажает электрическое поле. Электрические силовые линии подходят к поверхности тела человека нормально, а эквипотенциальные поверхности огибают его совершенно так же, как они огибают металлический предмет. Все точки тела человека находятся под одним и тем же потенциалом.

Зная напряженность поля вблизи земной поверхности, нетрудно подсчитать, что полный отрицательный заряд Земли составляет около $6 \cdot 10^5$ Кл. На высоте