

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

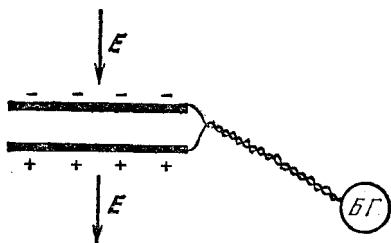


Рис. 62.

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

1 км напряженность земного поля падает примерно до 40 В/м. На высоте 10 км поле не превышает нескольких вольт на метр. На высоте 50 км и больше земное поле едва заметно. Большая часть падения потенциала приходится на малые высоты. Полная разность потенциалов между поверхностью Земли и верхними слоями атмосферы составляет почти 400 000 В. Эти данные показывают, что земная атмосфера заряжена положительно.

3. Воздух обладает электрической проводимостью. Она обусловлена ионами, образующимися в результате ионизации молекул и атомов космическими лучами. Благодаря проводимости в атмосфере текут токи, стремящиеся разрядить Землю. Средняя плотность тока порядка 10^{-6} мкА/м². Полный электрический ток, достигающий земной поверхности, равен приблизительно 1800 А. Заряд Земли, как указывалось выше, равен $\sim 6 \cdot 10^5$ Кл. Используя эти данные, нетрудно подсчитать, что заряд Земли должен был бы убывать в два раза примерно через каждые 4 минуты. Земля должна была бы полностью потерять свой заряд менее чем за полчаса. Если этого не происходит, то существуют какие-то процессы, непрерывно заряжающие Землю отрицательным электричеством и поддерживающие ее средний заряд неизменным. Долгое время оставалось загадкой, что это за процессы. В настоящее время, по-видимому, можно считать установленным, что заряд Земли поддерживается грозовой деятельностью атмосферы.

Гроза является одним из величественных явлений природы. Хотя электрическая природа молнии давно установлена, в учении об атмосферном электричестве еще очень много неисследованного и неясного. Далеко не ясен даже механизм возникновения электрических зарядов в атмосфере. Однако, по-видимому, можно считать установленным, что заряд земного шара поддерживается молниями, проскакивающими между атмосферой и поверхностью Земли. С каждым ударом молнии на Землю низвергается в среднем 20—30 Кл отрицательного электричества. Ричард Фейнман (р. 1918) в своих известных лекциях по физике приводит следующие аргументы в подтверждение этой точки зрения. При ясной погоде над поверхностью моря систематически измерялся электрический ток, идущий на Землю. Оказалось, что этот ток, если его усреднить по земной поверхности, испытывает суточные вариации. Ток в максимуме примерно на 15% больше среднего суточного тока, причем максимум приходится примерно на 19 часов по лондонскому времени. Такие же вариации испытывает и напряженность земного электрического поля. Самое интересное здесь то, что момент максимума *один и тот же* для всех точек земного шара *не по местному времени, а по единому* (например, лондонскому) *времени*. Это не так уж удивительно, потому что верхние слои атмосферы (ионосфера) сильно ионизованы и обладают высокой электропроводностью. Высокой электропроводностью обладает и морская вода. Имеются, таким образом, две хорошо проводящие сферические оболочки, между которыми и возбуждается электрическое поле Земли, как между обкладками сферического конденсатора. В самих оболочках из-за их высокой электропроводности не может возникнуть сколько-нибудь существенной разности потенциалов. С другой стороны, установлено, что максимум грозовой деятельности, усредненный по всей поверхности земного шара, приходится также на 19 часов по лондонскому времени. Это подтверждает гипотезу о наличии связи между грозовой деятельностью атмосферы и электрическим полем Земли.

ЗАДАЧА

Земля непрерывно облучается космическими лучами высокой энергии, приходящими из пространства вне Солнечной системы. Космические лучи в основном состоят из протонов, средняя энергия \mathcal{E} которых составляет несколько миллиардов электронвольт. Интенсивность I потока протонов, достигающих земной атмосферы, равна примерно одному протону на квадратный сантиметр в секунду. Оценить время, необходимое для того, чтобы протоны космических лучей повысили потенциал Земли настолько, чтобы они уже не могли попадать на поверхность Земли из-за электрического отталкивания. Объяснить, почему и после

этого времени протоны космических лучей продолжают достигать земной поверхности.

О т в е т. $t = \frac{\mathcal{E}}{4\pi R I e^2} \approx 10^6 \text{ с} \approx 10 \text{ сут}$ (R — радиус Земли, e — заряд протона; численный ответ получен при $\mathcal{E}/e \sim 10^9 \text{ В}$). В действительности потенциал Земли не может достигать такого значения, так как наряду с приходом протонов существует обратный процесс, в котором земная атмосфера теряет положительные заряды в виде протонов и положительных ионов, уходящих в космическое пространство под действием возникшего электрического поля.

§ 22. Общая задача математической электростатики

1. Если известен потенциал φ как функция пространственных координат, то его дифференцированием можно вычислить напряженность электрического поля по формуле (18.5). Зная диэлектрическую проницаемость, можно затем определить вектор индукции $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$ и по теореме Гаусса (13.5) найти объемную плотность свободных зарядов ρ . Поверхностная плотность свободных зарядов найдется по скачку нормальной составляющей вектора \mathbf{D} из соотношения (14.1).

Наоборот, если известны плотности свободных и связанных зарядов, то интегрированием можно вычислить потенциал по формуле (19.3) или (19.4), а затем найти и все остальные величины. Как правило, интегралы (19.3) или (19.4) не берутся аналитически, но они всегда могут быть найдены численно.

Реальные задачи, к которым приводит электростатика, гораздо сложнее. Дело в том, что связанные заряды, а также распределение свободного электричества по поверхности проводников не бывают известными, а сами подлежат определению. Общая задача математической электростатики формулируется следующим образом.

В диэлектрической среде заданы расположение и форма всех проводников. Известна диэлектрическая проницаемость среды ε между проводниками и объемная плотность свободных электрических зарядов во всех точках диэлектриков. Кроме того, известны: а) либо потенциалы всех проводников, б) либо заряды всех проводников, в) либо заряды некоторых проводников и потенциалы всех остальных проводников. Требуется определить напряженность электрического поля во всех точках пространства и распределение электричества по поверхностям проводников.

2. Задача сводится к нахождению потенциала φ , как функции пространственных координат x, y, z . Найдем дифференциальное уравнение, которому должна удовлетворять эта функция. Для этого теорему Гаусса (13.5) запишем в виде $\text{div}(\varepsilon \mathbf{E}) = 4\pi\rho$ и подставим в нее выражение для \mathbf{E} из формулы (18.5). Получим

$$\text{div}(\varepsilon \text{grad } \varphi) = -4\pi\rho, \quad (22.1)$$