

металлов можно описать некоей моделью «бильярдных шаров», становится наивным, если подумать о поразительном явлении сверхпроводимости. Многие металлы при низкой температуре начинают проводить таким образом, что проводимость должна быть бесконечной! (И даже такое предположение на самом деле недостаточно для описания их поистине фантастических электрических свойств.)

На графике рис. 4.6 показана проводимость различных чистых веществ и ее зависимость от температуры. Главная цель графика — показать широкий диапазон величин и их поведение. Обратите внимание на то, что температура и проводимость нанесены в логарифмическом масштабе.

#### 4.7. Сопротивление проводников

Если задано удельное сопротивление материала, то вычислить сопротивление  $R$  просто. Мы знаем (см. формулу (11)), что

$$R = \frac{\text{длина} \cdot \text{удельное сопротивление}}{\text{площадь поперечного сечения}}. \quad (20)$$

Сопротивление  $R$  имеет смысл только для тока вполне определенной конфигурации. В случае проволоки смысл сопротивления не вызывает сомнений. В более общем случае объемного распределения тока

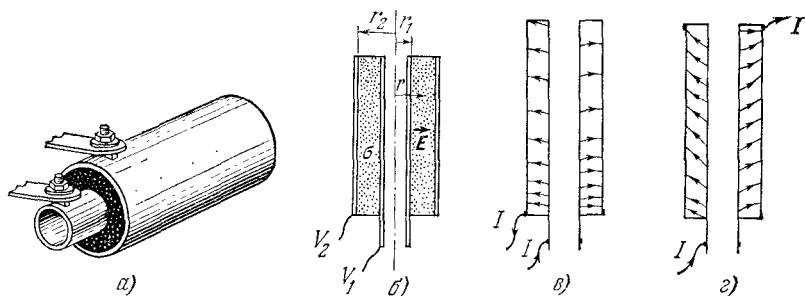


Рис. 4.7. Пространство между медными цилиндрическими трубками заполнено графитом (а, б). Если сопротивление трубок пренебрежимо мало, то ток через графит идет в радиальном направлении. В противном случае линии тока при разном расположении зажимов могут выглядеть как на (в) или (д).

нельзя говорить о сопротивлении, пока не указано расположение «зажимов» (клемм), через которые ток входит и выходит из системы. Распределение плотности тока в объеме следует определить, используя наше фундаментальное соотношение  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ .

В качестве примера рассмотрим прохождение тока через тело, показанное на рис. 4.7, а и б, состоящее из двух цилиндрических медных трубок, пространство между которыми заполнено графитом. Чему равно сопротивление между зажимами? Если сопротивление медных трубок для продольного тока очень мало по сравнению с сопротивлением графита для радиального тока, то все равно, где ток входит и выходит из меди (т. е. где расположены зажимы). В этом

случае мы можем предположить, что каждая медная трубка является эквипотенциальной поверхностью. Взглянув на график рис. 4.6, мы видим, что при комнатной температуре проводимости меди и графита отличаются в  $10^3$  раз, так что это предположение, по-видимому, соответствует действительности, если только медные трубки не очень тонкие. Допустим, что между медными электродами приложена разность потенциалов  $V_0$ . Чтобы определить электрическое поле в графите, вспомним, что поле между двумя заряженными цилиндрами пропорционально  $1/r$ , поэтому мы полагаем  $E = k/r$  и определяем константу  $k$  из условия:

$$V_0 = \int_{r_1}^{r_2} E dr = k \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = k \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (21)$$

Отсюда напряженность поля в графите при некотором значении радиуса  $r$  равна

$$E = \frac{V_0}{r \ln (r_2/r_1)}, \quad (22)$$

а плотность тока равна  $\sigma E$ . Полная площадь, через которую протекает ток при этом радиусе, есть  $2\pi rL$ , так что полный ток равен

$$I = \frac{2\pi L \sigma V_0}{\ln (r_2/r_1)}. \quad (23)$$

Заметим, что он, как и должно быть, не зависит от  $r$ . Сопротивление равно

$$R = \frac{V_0}{I} = \frac{1}{2\pi L \sigma} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (24)$$

Предположим, что медные трубки были бы чрезвычайно тонкими и их сопротивление продольному току было бы не мало по сравнению с сопротивлением графита. Мы не будем пытаться решить эту задачу, однако полезно подумать, как могли бы выглядеть линии тока в этом случае. На рис. 4.7, *в* и *г* показано примерное распределение линий тока для двух разных положений зажимов.

#### 4.8. Электрические цепи и их элементы

Электрические устройства обычно имеют определенные зажимы, к которым можно присоединять провода. По этим проводам заряды могут втекать внутрь устройства и вытекать из него. В частности, если два и только два зажима присоединены проводами к какому-то стороннему объекту и если ток стационарен, а потенциалы всюду постоянны, то ток через эти два зажима должен иметь одинаковую величину и противоположное направление \*). В этом случае мы мо-

\*) Представим себе ток величиной  $4a$ , втекающий через один зажим двух-зажимного устройства, и ток в  $3a$ , вытекающий из другого зажима. Но тогда объект накапливает положительные заряды со скоростью  $1$  к/сек. Его потенциал должен очень быстро меняться, а это не может долго продолжаться. Следовательно, такой ток не может быть стационарным, т. е. не зависящим от времени.