

ника тока, но зато благодаря разветвлению тока в n раз уменьшается внутреннее сопротивление.

Нередко применяют смешанное (групповое) соединение источников тока. Допустим, что n источников тока соединены последовательно, образуя группу, электродвижущая сила которой будет $n\mathcal{E}$, а внутреннее сопротивление nR_i . Если m таких групп соединить параллельно, то электродвижущая сила батареи останется равной $n\mathcal{E}$, а внутреннее сопротивление батареи будет $\frac{n}{m}R_i$, следовательно, величина тока, даваемая такой смешанной батареей, определится формулой

$$I = \frac{n\mathcal{E}}{R_e + \frac{n}{m}R_i}. \quad (13)$$

Мощность, отдаваемая источниками тока во внешнюю цепь, определяется произведением тока на падение напряжения во внешней цепи. *Отдаваемая мощность будет наибольшей (§ 79), когда сопротивление внешней цепи равно суммарному внутреннему сопротивлению источников тока.*

§ 27. Закон Джоуля — Ленца

Когда количество электричества Q переходит от потенциала V_1 к потенциалу V_2 , то при этом совершается работа (§ 15)

$$A = QU,$$

где U — падение напряжения (разность потенциалов):

$$U = V_1 - V_2.$$

В электрическом токе происходит постоянное перемещение электричества от высшего потенциала к низшему; поэтому ток непрерывно производит работу, которая частично или полностью превращается в теплоту, нагревающую провода, по которым идет ток. Если величина тока равна I и ток проходил в течение t сек., то количество прошедшего за это время электричества $Q = It$, причем ток совершит работу

$$A = IUt.$$

Работа, совершаемая в единицу времени, называется мощностью, или эффектом, тока. Мы видим, что *мощность тока равна произведению величины тока на напряжение тока:*

$$P = IU. \quad (14)$$

Основываясь на законе Ома, можно в этой формуле I заменить отношением $\frac{U}{R}$, можно также U заменить произведением IR . Таким

образом, получаются *три выражения для мощности* постоянного электрического тока:

$$P = IU = \frac{U^2}{R} = I^2 R, \quad (15)$$

равносильных для участков цепи, не содержащих электродвижущих сил.

Если величина тока выражена в амперах, а разность потенциалов — в вольтах, то работа тока выражается в джоулях, а мощность — в ваттах. 100 *вт* составляют 1 *гвт*; 1000 *вт* составляют 1 *квт*. Единица работы, равная работе тока мощностью в 1 *квт* в течение часа, называется *киловатт-часом*.

1 *квт-ч* = $3,6 \cdot 10^6$ *дж*.

Наглядное представление о величине работы, измеряемой одним киловатт-часом, можно получить, сопоставляя энергию, расходуемую на освещение, с работой электротрактора. Чтобы вспахать один гектар земли, электротрактор расходует в среднем около 40 *квт-ч*. Такое же количество энергии расходуется в месяц на освещение квартиры, где по 5 часов в день горят три лампы по 40 *вт* и две по 75 *вт*. (Действительно, в последнем случае расходуемая мощность будет: $40 \cdot 3 + 75 \cdot 2 = 270$ *вт* и, следовательно, расходуемая в месяц энергия составит $270 \cdot 5 \cdot 30 = 40\,500$ *вт-ч* = 40,5 *квт-ч*.)

Одна лошадиная сила соответствует мощности в 736 *вт*. Стало быть, киловатт-час представляет собой работу, в 1,36 раза превышающую непрерывную часовую работу лошадиной силы.

Если падение потенциала вдоль проводника с током обусловлено только сопротивлением проводника, то вся работа тока идет на нагревание проводника и соприкасающихся с ним тел.

Один джоуль эквивалентен 0,24 *кал*. Поэтому в проводнике, не содержащем электродвижущих сил, на концах которого разность потенциалов равна одному вольту и по которому течет ток в один ампер, ежесекундно выделяется 0,24 *кал* тепла.

Из приведенных выше формул для работы тока мы видим, что при токе I ампер в проводнике, сопротивление которого равно R омам, в течение t сек. должно выделяться количество тепла, равное

$$Q = IUt \text{ джоулей,}$$

или

$$Q = 0,24 I^2 R t \text{ кал.} \quad (16)$$

Когда указано напряжение, а не величина тока, то количество выделяющегося тепла можно найти по формуле

$$Q = 0,24 \frac{U^2}{R} t \text{ кал.} \quad (17)$$

Понятно, что не все тепло, доставляемое током, идет на нагревание самого проводника; часть этого тепла передается окружаю-

щему проводник пространству путем теплопроводности, другая часть — путем лучеиспускания. Температура проводника не будет расти все время, а достигнет некоторого предела. Действительно, чем выше будет температура проводника, тем больше тепла будет он отдавать окружающему пространству; поэтому через некоторое время прибыль тепла вследствие превращения электрической энергии и убыль его путем теплопроводности и лучеиспускания уравновесятся и температура останется постоянной.

Закон теплового действия тока был экспериментально обнаружен в 1843 г. Джоулем и твердо установлен посредством тщательных измерений петербургским академиком Эмилием Христиановичем Ленцем в 1844 г. Теоретически этот закон впервые был обоснован в 1852 г. Клаузиусом, исходившим при этом из закона сохранения энергии.

Технические применения теплового действия тока многообразны: лампы накаливания, нагревательные приборы, электросварка и т. п.

Чтобы сосредоточить выделение мощности тока в нужном участке цепи, необходимо цепь тока составить так, чтобы сопротивление того участка, где должно быть сосредоточено тепловое действие тока, значительно превышало сопротивление всех остальных участков цепи. Действительно, когда проводники включены в цепь последовательно, то ток I в них одинаков и количество тепла, выделяемого в каждом проводнике ежесекундно [формула (16)], *прямо пропорционально сопротивлению проводника*. Поэтому нить лампочки накаливания, имеющая большое сопротивление, раскаляется, тогда как медные провода, ведущие к ней ток, остаются холодными. То же можно сказать о нагревательных приборах. По той же причине место плохого соединения двух проволок (плохой контакт) электрической сети сильно нагревается током (для предотвращения этого в электрических установках концы соединяемых проволок тщательно спаивают).

Сосредоточение отдаваемой мощности (при последовательном соединении проводников) в проводнике, имеющем большое сопротивление, используется, в частности, при *распылении металлов* током. В этом случае ток подводят по массивным проводникам к тонкой проволочке и почти вся мощность тока идет на нагревание этой тонкой проволочки. Если взять батарею конденсаторов большой емкости, зарядить ее до разности потенциалов в десятки тысяч вольт и затем через массивные проводники и тонкую серебряную или другую проволоку разрядить эту батарею конденсаторов, то получается столь интенсивный разогрев проволоки, что она, не успев расплавиться, распыляется со вспышкой ослепительного белого света. В таких опытах была достигнута температура порядка 20 000°, т. е. в три раза более высокая, чем температура поверхности Солнца. Распыление проволок током применяют для

покрытия поверхностей тонким слоем металла — для *металлизации поверхностей*.

При параллельном соединении токи в проводниках будут разные, зато все они имеют общее напряжение; количества тепла, выделяемого ежесекундно [формула (17)], в этом случае *обратно пропорциональны сопротивлениям*, т. е. явление как раз противоположно тому, что наблюдается при последовательном соединении проводников. Поэтому если лампочки накаливания включены в цепь параллельно, как это и делается обыкновенно, то лампочка с меньшим сопротивлением будет брать на себя больше энергии, чем лампочка с большим сопротивлением.

Одним из первых и, как оказалось позже, весьма важных применений теплого действия тока явилась открытая в 1802 г. В. В. Петровым *электрическая дуга*. Благодаря изобретениям П. Н. Яблочкова и В. Н. Чиколева электрическая дуга с 70-х годов XIX в. широко используется для электрического освещения в дуговых лампах и прожекторах.

Русской науке принадлежит приоритет и в области другого важного использования электрической дуги—для *сварки металлов* (рис. 81). Метод сварки

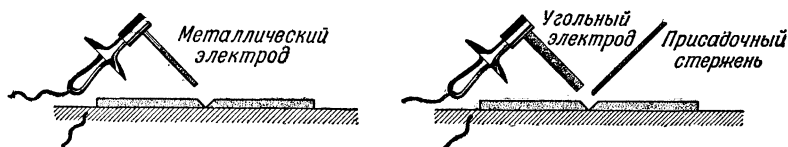


Рис. 81. Два способа дуговой сварки.

металлов посредством электрической дуги был впервые разработан Н. Н. Бенардосом в 1882 г. и усовершенствован в 1888 г. Н. Г. Славяновым. Теперь этот метод применяется во всем мире и имеет громадное значение для многих отраслей техники. Для электросварки применяют ток напряжением 25—35 в и величиной 200—800 а.

Электрическая сварка металлов может быть осуществлена и без образований видимой электрической дуги—посредством нагрева места соприкосновения тел током (*контактный метод*). В этом случае применяют ток небольшого напряжения, но очень большой величины (от 4000 до 25 000 а). Свариваемые металлические листы или другие детали приводят в соприкосновение давлением электродов последовательно каждый раз в одном каком-либо месте («точечная сварка» и «стыковая сварка») или же по шву («роликовая сварка»). При этом площадь истинной поверхности соприкосновения оказывается весьма незначительной. В связи с этим сопротивление контакта оказывается большим в сравнении с сопротивлением других участков цепи тока, составленной из хороших, массивных проводников. Поэтому в месте контакта при большом токе выделяется в доли секунды такое количество тепла, что металл здесь плавится. При прекращении тока образовавшийся расплав снова быстро кристаллизуется. В итоге образуется прочное сочленение листов металла по местам сварки.

Громадное значение для развития культуры имела изобретенная в 1872 г. Александром Николаевичем Лодыгиным *электрическая лампа накаливания*. Массовое производство этих ламп было налажено Эдисоном после ряда усовершенствований в 80-х годах XIX в. Вначале изготавливались только «угольные лампы» (лампы с угольной нитью в пустотном баллоне), потреблявшие мощность в 4 вт на свечу. В 1890 г. А. Н. Лодыгин предложил изготавливать электролампы нака-

ливания с нитями из тугоплавких металлов: вольфрама, осмия и др. Но только через 20 лет (с 1910 г.), когда был найден способ производства тянутых вольфрамовых нитей, лампы с вольфрамовой нитью получили широкое распространение. Их стали называть «экономическими», так как в них расход мощности электрического тока был снижен примерно до $1,5 \text{ вт}$ на свечу (пустотные лампы с вольфрамовой нитью часто называют также «пустотными лампами»).

В последующие годы было найдено, главным образом благодаря исследованиям Ленгмюра, что распыление вольфрамовой нити, вызываемое высокой температурой накала, можно уменьшить, если баллон лампы наполнять аргоном или азотом и скручивать нить вольфрама в тесную спираль. Такие лампы применяют в настоящее время и называют их «полуваттными» или «газонаполненными». Расход мощности в таких лампах действительно приближается к $0,5 \text{ вт}$ на свечу, но только в очень больших лампах, тогда как в 100-ваттных лампах расходуется 1 вт на свечу. Средний срок службы газонаполненных ламп накаливания—около 800 часов. (Подробнее об электрической дуге сказано в § 48 данного тома; в т. III, § 76 рассмотрены газосветные, люминесцентные и другие лампы.)

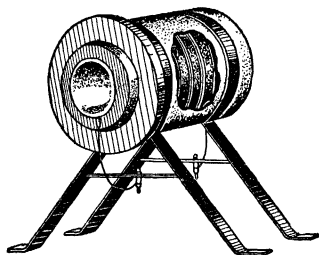


Рис. 82. Муфельная печь.

С развитием электропромышленности широко вошли в обиход разнообразие по своему назначению электрические нагревательные приборы и электропечи. При хорошей теплоотдаче в открытых бытовых нагревательных приборах для проволок из нихрома, никелина и других аналогичных сплавов допускается плотность тока (стр. 126) до 50 а/мм^2 ; в закрытых нагревательных приборах допускается плотность тока не более $8-10 \text{ а/мм}^2$.

В лабораторной практике часто применяют *муфельную печь* сопротивления, показанную на рис. 82. Эта печь представляет собой фарфоровую трубку с обмоткой из платиновой или иридиевой проволоки, а для сравнительно низких температур (до 800°С)—с обмоткой из проволоки, изготовленной из никелевых сплавов. Для уменьшения потерь на лучеиспускание трубка с обмоткой накаливания вставляется в другую трубку, причем промежутки между стенками трубки заполняются магнезией. Тигель с нагреваемым веществом вносят в цилиндрическую полость магнезией и устанавливают нужную температуру, регулируя реостатом силу тока, пропускаемого через обмотку печи.

Для расплава металлов служат *тигельные печи*, в которых тигель из огнеупорного материала окружен спиральной лентой из тугоплавкого металла (рис. 83).

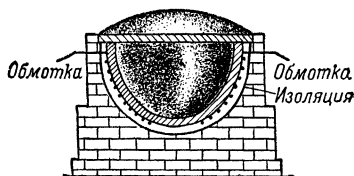


Рис. 83. Тигельная электропечь.

Для нагрева до 2000°С служат *криптоловые печи*, в которых между двумя металлическими электродами засыпана грубозернистая смесь из карборунда, графита и глинозема; эта смесь обладает большим сопротивлением и при прохождении через нее тока раскаляется. Еще более высокий нагрев осуществляется в *дуговых печах*, применяемых в электрометаллургии для выработки высококачественных сталей, содержащих примесь наиболее тугоплав-

ких металлов — вольфрама, молибдена и др. (сталеплавильная дуговая печь, рассчитанная на одновременную загрузку в 10 т, потребляет мощность около 3500 квт; более мощные печи используются для выплавки чугуна из руд).

Разрушение (*эрозия*) металла под действием сосредоточенного выделения джоулева тепла (в частности, при искровом разряде) в последние годы стали применять для обработки металлических изделий. Сконструированы станки для электроискровой прошивки тонких отверстий в металлических изделиях и др.

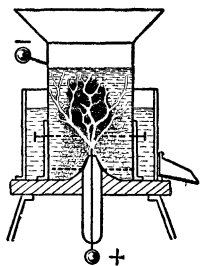


Рис. 84. Схема электрогидравлической дробилки.

Искровой высоковольтный разряд, осуществляемый под водой, сопровождается возникновением резких гидравлических ударов. В недавнее время ленинградский инженер Л. А. Юткин, изучив условия, при которых искровой разряд приводит к наибольшему *электрогидравлическому эффекту*, использовал этот эффект в ряде сконструированных им приспособлений. В частности, он показал, что гидроэлектрический эффект может быть с успехом применен для дробления каменных пород; электрогидравлическая дробилка, схема которой показана на рис. 84, не имеющая в отличие от

обычных дробилок никаких вращающихся или движущихся частей, размельчает до 3—4 мм за один час 300 кг камней размером 5—8 см каждый.

Вследствие нагревания при большой величине тока провод плавится. Величины тока, расплавляющего провод диаметром 1 мм, для различных металлов таковы:

Материал	Ток (в амперах), расплавляющий провод диаметром в 1 мм
Свинец	10,8
Олово	12,8
Железо	24
Алюминий	59
Медь	80

При изменении диаметра провода величина тока, расплавляющего провод, изменяется приблизительно пропорционально диаметру в степени $3/2$ и может быть вычислена по формуле

$$I = I_{\text{для } d = 1 \text{ мм}} \cdot d^{3/2} \text{ (в мм)}.$$

В электротехнической практике допустимой величиной тока считается величина тока, в несколько (в 7—10) раз меньшая, чем ток, расплавляющий провод. Так, для медного провода диаметром в 1 мм допустимой считают величину тока в 11 а. Диаметр d (в мм) свинцовой проволоки, расплавляющейся при заданной величине тока (в амперах), можно найти по формуле, которая является следствием предыдущей формулы:

$$d \approx \frac{1}{5} \sqrt[3]{I^2}.$$

Железная и медная проволока плавится при той же величине тока, что и свинцовая, когда диаметр железной проволоки приблизительно в два раза, а медной — в четыре раза меньше диаметра свинцовой проволоки, вычисленного по только что приведенной формуле.

Теплота, выделяемая электрическим током, используется также и при устройстве электроизмерительных приборов. На рис. 85 показана схема *теплового амперметра*. Ток, подводимый к клеммам прибора, проходит через тонкую проволоку *ab*, которая от нагревания током удлиняется тем больше, чем больше сила тока. С проволокой *ab* скреплена тонкая проволока *Cd*, несколько оттянутая в сторону пружиной *T* и нитью *fe*, охватывающей блок стрелки. Когда проволока *ab* от нагревания током удлиняется, нить *fe* сильнее оттягивает в сторону проволоку *Cd* и, вращая на некоторый угол блок, поворачивает стрелку прибора. Винт *R*, регулирующий степень натянутости проволоки *ab*, служит для установки стрелки прибора на нуль.

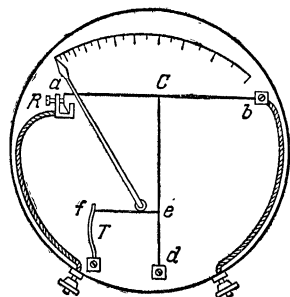


Рис. 85. Схема теплового амперметра.

§ 28. Дифференциальная форма законов Ома и Джоуля—Ленца.

Соотношение аналогии между проводимостью и емкостью

Преобразуем закон Ома применительно к дифференциально малым участкам цепи. Для этого введем в формулу (4) закона Ома напряженность электрического поля внутри проводника, по которому течет электрический ток.

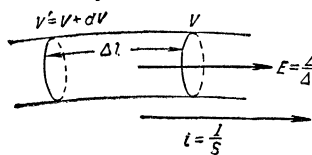


Рис. 86

Выделим элементарно малый по длине Δl участок проводника. Падение напряжения на его концах обозначим через ΔV (рис. 86). Тогда закон Ома для этого участка проводника напишется так:

$$I = \frac{\Delta V}{\rho \frac{\Delta l}{S}}$$

Напряженность электрического поля определяется градиентом потенциала

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta l}, \text{ или } \Delta V = E \cdot \Delta l.$$

Подставив это выражение в вышеприведенную формулу, получим:

$$I = \frac{1}{\rho} \cdot ES.$$