

ROZDZIAŁ XIX.

Przemiany ciepłne, zachodzące w obwodzie prądu elektrycznego.

1. Ciepło Joule'a. Pod wpływem prądu elektrycznego wszystkie przewodniki ogrzewają się nawet wtedy, gdy są wykonane z materiałów o najlepszym przewodnictwie i gdy pod każdym względem są jednorodne na całej długości.

Prawo Joule'a głosi, że ilość ciepła, powstająca w jednostce czasu w przewodniku, po którym przepływa prąd, jest proporcjonalna do drugiej potęgi prądu, tudzież do pewnej wielkości, która określa własność przewodników, zwaną opornością elektryczną, ściślej opornością omową.

Stosowany już tutaj wielokrotnie wzór pracy prądu, skutkiem której powstaje ciepło Joule'a jest następujący:

$$i^2 r dt,$$

lub też, gdy natężenie prądu jest stałe w ciągu czasu t :

$$i^2 r t.$$

Gdy prąd jest wyrażony w amperach, r — w omach, t — w sekundach, to pracę otrzymujemy w dżaulach; chcąc zaś wyrazić ilość otrzymanego ciepła w kalorjach gramowych, należy uwzględnić równoważnik mechaniczny ciepła. Mianowicie z jednego dżaula otrzymujemy 0,24 kalorji gramowych ciepła.

Oznaczając więc ilość ciepła w kalorjach gramowych przez Q , otrzymamy:

$$Q = 0,24 \cdot i^2 r t.$$

W praktyce elektrotechnicznej posiada jeszcze szczególne znaczenie wzór, dotyczący wzrostu temperatury w przewodniku pod wpływem omawianego wyżej ciepła.

Przewodnik, po którym przepływa prąd, przybiera po upływie pewnego czasu¹⁾ temperaturę stałą, wyższą od otoczenia. W warunkach takiej rów-

¹⁾ Teoretycznie, temperatura może być uważana za stałą po upływie czasu nie-długiego, praktycznie jednak — po kilku minutach lub kilku godzinach, zależnie od różnych okoliczności.

nowagi cieplnej cała ilość ciepła, otrzymywana pod wpływem prądu w ciągu pewnego czasu, rozprasza się w tym samym czasie naokoło przewodnika.

Możemy ułożyć równanie, które określa, że ciepło, otrzymane w przewodniku skutkiem prądu elektrycznego, równa się ilości ciepła rozproszonego.

Oznaczmy przez:

- Θ_p — temperaturę przewodnika,
- Θ_o — „ otoczenia,
- i — prąd,
- t — czas,
- r — oporność omową przewodnika,
- ρ — oporność właściwą przewodnika,
- l — długość przewodnika,
- s — przekrój przewodnika,
- u — obwód przekroju przewodnika.

Nadto przez h oznaczmy wielkość stałą, która jest zależna od własności powierzchni przewodnika i rodzaju otaczającego ośrodka. Załóżmy jednocześnie, że przewodnik traci ciepło przede wszystkim przez powierzchnię boczną i że wpływ końców przewodnika może być zupełnie pominięty.

Ilość ciepła, otrzymana przez przewodnik, wynosi:

$$i^2 r t = i^2 \rho \cdot \frac{l}{s} t.$$

Ilość zaś ciepła rozproszonego przyjmować będziemy za proporcjonalną do różnicy temperatur przewodnika i otoczenia, do powierzchni bocznej przewodnika i do czasu; otrzymamy wtedy wyrażenie następujące:

$$h (\Theta_p - \Theta_o) u l t.$$

Więc:

$$h (\Theta_p - \Theta_o) \cdot u l t = i^2 \rho \cdot \frac{l}{s} t,$$

skąd:

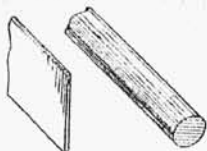
$$\Theta_p - \Theta_o = \frac{i^2 \rho}{h u s}$$

Wzór ten wskazuje, że różnica temperatur przewodnika i otoczenia nie zależy od długości przewodnika, nadto, co najważniejsza, że nie będzie ona jednakowa dla różnych materiałów, jest bowiem proporcjonalna do oporu właściwego przewodnika.

Oprócz tego ważną jest rzeczą zwrócić uwagę na mianownik, w którym mamy iloczyn z obwodu przekroju przez pole przekroju przewodnika.

Jak wiadomo, druty o jednakowym polu przekroju mogą mieć różne obwody przekroju. a to zależnie od kształtu przekroju.

Najkrótszy obwód, ze wszystkich figur geometrycznych przy stałym polu, posiada koło. Natomiast bardzo długi obwód przy tem samym polu będzie miał prostokąt wydłużony (rys. 160).

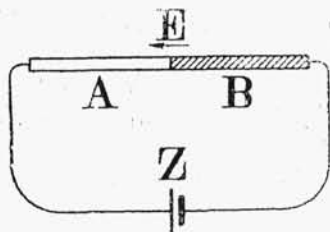


Rys. 160.

Z wyrażenia nadwyżki temperatury przewodnika względem otoczenia wynika, że przewodnik o przekroju kołowym ogrzeje się do temperatury wyższej niż przewodnik o przekroju prostokątnym, przy tym samym polu przekroju.

2. Ciepło Peltier'a. Zupełnie innego rodzaju przemiany cieplne wykryte zostały przez Peltier'a.

Jeżeli przez miejsce spojenia dwóch różnych¹⁾ przewodników *A* i *B* (rys. 161. przepuszczamy prąd elektryczny ze źródła *Z*, to zależnie od tego, w którą stronę popłynie prąd przez miejsce spojenia tych przewodników, w tym miejscu temperatura obniża się albo wzrasta.



Rys. 161.

W pierwszym przypadku ciepło jest pochłaniane, w drugim zaś wydzielane.

Zjawisko to odbywa się tylko w miejscu zetknięcia dwóch przewodników, przeto twierdzimy, że w tym miejscu zjawia się siła elektromotoryczna *E*, która działa w pewnym kierunku, np. od *B* do *A*, i zależnie od tego, czy prąd elektryczny jest zgodny, co do kierunku, z tą siłą elektromotoryczną, czy też skierowany jest względem niej odwrotnie, otrzymujemy dwa rodzaje przemian cieplnych.

Jeżeli kierunek prądu *i* jest zgodny z siłą elektromotoryczną, to moc prądu Ei wytwarza się kosztem ciepła, pochłanianego w miejscu zetknięcia przewodników. Jeżeli natomiast prąd płynie wbrew tej sile elektromotorycznej, to — Ei wyraża moc prądu, wytwarzającą ciepło w miejscu zetknięcia przewodników.

Wymierzając natężenie prądu i ilość otrzymanego ciepła, łatwo obliczyć wielkość siły elektromotorycznej.

Doświadczenia wykazały, że wielkość i kierunek tej siły elektromotorycznej zależy od własności chemicznych i fizycznych przewodników *A* i *B*. Dla tych ciał, nad którymi wykonano dotychczas doświadczenia, wielkość tej siły elektromotorycznej jest bardzo mała. Wynosi ona zaledwie tysięczne części wolta. Przy zetknięciu np. miedzi z żelazem przy 0° powstaje elektromotoryczna siła, wynosząca około 0,00288 wolta.

¹⁾ Różnica pomiędzy dwoma przewodnikami *A* i *B* może zachodzić pod względem chemicznym lub fizycznym, a więc mogą to być ciała nawet o tym samym składzie chemicznym, ale o różnych własnościach fizycznych.

3. **Ciepło Thomsona**²⁾). Istnieje jeszcze inny rodzaj zjawisk cieplnych, wykryty przez Thomsona.

Przewodnik AB (rys. 162), wykonany na całej swej długości z jednego metalu, jest zupełnie jednorodny. Przepuszczamy przez niego prąd, a jednocześnie ogrzewamy go pośrodku za pomocą płomienia (rys. 162).

Doświadczenie wykazało, że rozkład temperatur pod wpływem prądu staje się niesymetryczny. Zależnie od rodzaju metalu, ciepło przenosi się z prądem lub przeciwko prądowi.

W tych warunkach jedna połowa przewodnika staje się cieplejszą od drugiej. Na podstawie przyjętego wyobrażenia o siłach elektromotorycznych zjawisko to daje się wytłumaczyć w sposób następujący.

Przewodnik AB , ogrzewany w środku, ma w tym miejscu temperaturę oczywiście najwyższą, na prawo zaś i na lewo od środka temperatury są coraz niższe; możemy więc sobie przedstawić że cały ten przewodnik składa się z szeregu odcinków o temperaturach coraz niższych z jednej i drugiej strony. Na rys. 163 wskazany jest układ takich odcinków przewodnika.

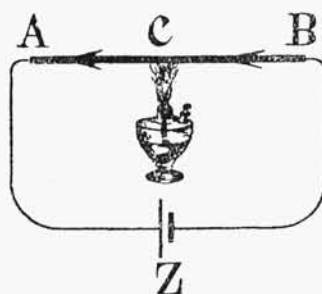
Różnica temperatur dwóch odcinków stanowi różnicę ich własności fizycznych, wystarczającą, aby w miejscu zetknięcia tych odcinków powstała siła elektromotoryczna w pewnym określonym kierunku, np. od odcinka zimniejszego do cieplejszego. W tych warunkach rozkład wspomnianych sił elektromotorycznych będzie

taki, jak wskazano na rys. 163. Oczywiście, pamiętać przytem należy, że odcinki są w rzeczywistości nieskończenie małe i także są też siły elektromotoryczne, istniejące pomiędzy niemi; ponieważ jednak takich sił elektromotorycznych, działających w jedną stronę, będzie nieskończenie wiele, przeto siły elektromotoryczne wypadkowe będą wielkościami skończonemi.

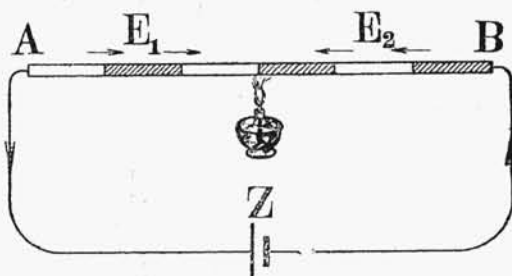
Prąd elektryczny, płynący od B do A , wywoła oczywiście pochłanianie ciepła z prawej strony i powstawanie ciepła ze strony lewej. Moc równoważna ilości ciepła pochłanianej w jednostce czasu będzie:

$$E_2 i,$$

²⁾ W. Thomson posiada tytuł lorda Kelwina i często zamiast nazwiska używał tego tytułu.



Rys. 162.



Rys. 163.

a moc prądu równoważna ilości ciepła, powstającej w jednostce czasu, będzie:
 $E_1 i$.

W różnych metalach kierunek sił elektromotorycznych E_1 i E_2 bywa rozmaity. W jednej siły elektromotoryczne skierowane są od części cieplejszych metalu do chłodniejszych, w innych zaś od chłodniejszych do cieplejszych.

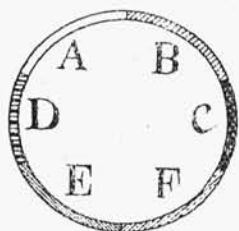
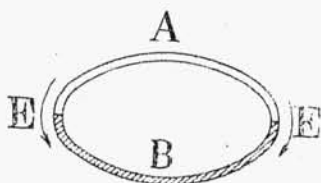
W pierwszym przypadku ciepło przenosi się w kierunku odwrotnym do prądu, a w drugim — w kierunku zgodnym z kierunkiem prądu.

Własność, powyższą, posiadają różne metale w stopniu różnym. Odróżniamy metale, wykazujące własność tę jaką dodatnią, np. żelazo, w którym ciepło przenosi się w kierunku prądu elektrycznego, i metale, wykazujące własność ujemną, np. miedź, w której ciepło przenosi się w kierunku odwrotnym do kierunku prądu. W ołowiu siły elektromotorycznych Thomsona prawie niema.

Wielkość rozważanych sił elektromotorycznych zależy od spadku temperatury wzdłuż przewodnika i od wartości bezwzględnej tych temperatur.

4. Prawo Volty. Siły elektromotoryczne, występujące w zjawiskach Peltier'a i Thomsona, mogą wywołać w pewnych warunkach prąd elektryczny. Przedewszystkiem rozważamy te przypadki, kiedy tych sił elektromotorycznych niema lub też są one w równowadze.

W obwodzie, utworzonym z dwóch przewodników A i B (rys. 164) przy temperaturze jednakowej w całym obwodzie, dwie siły elektromotoryczne czynne w miejscach spojenia przewodników znoszą się wzajemnie, więc pod ich wpływem prąd w takim obwodzie powstać nie może.



Rys. 164 i 165.

Jeżeli mamy cały szereg różnorodnych przewodników, ułożonych w obwód zamknięty (rys. 265) i w żadnym spojeniu nie odbywają się przemiany chemiczne z powodu oddziaływania jednego przewodnika na drugi, to przy jednakowej temperaturze w całym obwodzie pod wpływem sił elektromotorycznych w spojeniach, prąd elektryczny powstać nie może, ponieważ siły elektromotoryczne znoszą się wzajemnie. O prawdziwości tego twierdzenia przekonywa nas doświadczenie.

Prawo to ma największe znaczenie praktyczne dla metali i znane jest w nauce pod nazwą prawa Volty. Krócej, to prawo wypowiedzieć można w sposób następujący: w obwodzie zamkniętym, utworzonym z różnych metali o temperaturach jednakowych, suma algebraiczna sił elektromotorycznych, działających w miejscach zetknięcia metali, równa się zeru.

Omawiane prawo można rozważać jako wynik prostszego twierdzenia, polegającego na tem, że siła elektromotoryczna, powstająca przy zetknięciu dwóch przewodników, równa się sumie algebraicznej sił elektromotorycznych, działających przy zetknięciu tych przewodników z trzecim.

Jeśli np. w miejscu zetknięcia przewodników *A* i *B* działa siła elektromotoryczna *E* (rys. 166), to, umieszczając pomiędzy *A* i *B* trzeci przewodnik *C* (rys. 167), otrzymamy nowe siły elektromotoryczne *E*₁ i *E*₂, których suma *E*₁ + *E*₂ równa się *E*.

Wychodząc z tego prawa, opartego na doświadczeniu, łatwo dowieść ogólnego prawa Volty.

Dla obwodu, składającego się z dwóch metal (rys. 164) mamy oczywisty wyraz:

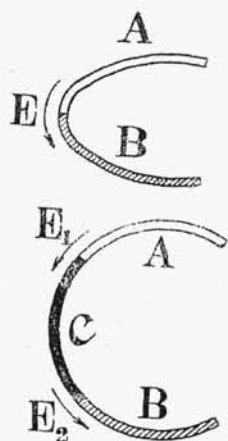
$$E - E = 0.$$

Dodając kolejno w spójeniach nowe metale, przez rozłączenie spójni i wstawianie odpowiednich kawałków innych metali, otrzymamy obwód składający się z dowolnej liczby metali, jak pokazany np. na rys. 165. Przy umieszczaniu nowych metali otrzymywać będziemy w powyższym równaniu nowe siły elektromotoryczne, których suma algebraiczna zawsze równać się będzie zeru.

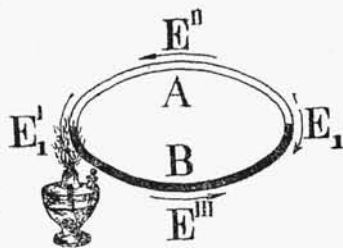
5. Prąd termoelektryczny. Wszystkie omawiane w § 4 obwody rozważaliśmy przy temperaturze jednakowej wokoło całego obwodu.

Weźmy teraz inny przypadek, gdy w obwodzie, składającym się z dwóch metali, jedno spójnie jest ogrzewane, skutkiem czego temperatury spójni są różne (rys. 168). Wtedy siły elektromotoryczne w spójniach będą różne *E*₁' *E*₁, a nadto wzdłuż metali *A* i *B*, z powodu różnicy temperatur na końcach tych metali, powstaną siły elektromotoryczne Thomsona.

W tych warunkach suma algebraiczna sił elektromotorycznych w obwodzie zamkniętym nie równa się zeru. W obwodzie powstanie prąd w kierunku siły elektromotorycznej wypadkowej¹⁾. Prąd taki nazywamy prądem termoelektrycznym, a siłę elektromotoryczną wypadkową — siłą termoelektryczną pary metali *A* i *B* przy danej różnicy temperatur spójni.



Rys. 166 i 167.



Rys. 168.

¹⁾ Zjawisko to pierwszy spostrzegł Seebeck, stosując bismut i miedź. Przy omawianiu zjawisk tego rodzaju zwykle mówimy o metalach, ponieważ większa część doświadczeń była wykonywana z metali. Odbywają się jednak takie same zjawiska przy zastosowaniu innych przewodników, nie oddziaływających na siebie chemicznie. Np. różne minerały posiadają ciekawe własności termoelektryczne.

Stosownie do oznaczeń na rys. 163, siła termoelektromotoryczna będzie:

$$E = E'_1 - E_1 + E'' + E'''.$$

Wielkość siły termoelektromotorycznej zależy, jak wskazuje doświadczenie, przede wszystkim od rodzaju metali, a następnie od wysokości temperatur spoeń. Dla danego układu metali, według przyjętej obecnie teorii zjawisk termoelektrycznych, wielkość sił elektromotorycznych Thomsona E'' i E''' zależy tylko od temperatur końców przewodników, w których te siły elektromotoryczne powstają i nie zależy od rozkładu temperatury wzdłuż przewodnika. Siły elektromotoryczne Peltier'a E'_1 i E_1 zależą tylko od temperatur spoeń. Suma więc algebraiczna powyższych sił elektromotorycznych, wyrażająca siłę termoelektromotoryczną układu danych metali, zależy tylko od temperatur spoeń metali.

Siły termoelektromotoryczne podlegają trzem prawom zasadniczym.

Prawo I. Siła termoelektromotoryczna nie zmienia się, gdy w miejscu spojenia pary metali umieścimy trzeci metal, którego temperatura równa się temperaturze tego spojenia.

Prawo to można wyprowadzić z następującego rozumowania.

Dla pary termoelektrycznej $A B$ (rys. 169) otrzymamy siłę termoelektromotoryczną E_I , która, przy zastosowaniu oznaczeń wskazanych na rysunku, wyrazi się wzorem:

$$E_I = E'_1 - E_1 + E'' + E''' \dots \dots \dots (1)$$

Dla układu, złożonego z trzech metali $A B C$ (rys. 170), wypadkowa siła termoelektromotoryczna E_{II} , jak widać z rysunku, będzie:

$$E_{II} = E'_1 - E_2 - E_3 + E'' + E''' \dots \dots \dots (2)$$

Dla układu (rys. 171), złożonego z tych samych trzech metali, lecz przy jednakowej temperaturze t_2 wszystkich spoeń siły elektromotoryczne będą w równowadze:

$$E_1 - E_2 - E_3 = 0.$$

zatem:

$$E_1 = E_2 + E_3,$$

a na podstawie tej zależności, porównyując równania (1) i (2) widzimy, że:

$$E_I = E_{II},$$

Prawo II. Siła termoelektromotoryczna pary metali A, B równa się różnicy sił elektromotorycznych par metali A, C i B, C przy tych samych temperaturach spojeń, jakie miała para A, B .



Siłę termoelektromotoryczną pary A, C oznaczamy przez E_{III} . Z rysunku 172 widzimy, że:

$$E_{III} = E_2' - E_2 + E'' + E^{IV}.$$

Siłę termoelektromotoryczną pary B, C oznaczmy przez E_{IV} . Z rysunku 173 widzimy, że:

$$E_{IV} = E_3' - E_3 - E''' + E^{IV}.$$

Dla obwodu, składającego się z trzech metali A, B, C przy jednakowej temperaturze wszystkich spojeń t_1 , mamy (rys. 174).

$$E_1 + E_3 - E_2 = 0.$$

Dla takiegoż obwodu przy temperaturze t_2 (rys. 175):

$$E_1 + E_3 - E_2 = 0.$$

Z tych czterech równań znajdujemy:

$$E_{III} - E_{IV} = E_2' - E_3' - E_2 + E_3 + E'' + E''' = E_1' - E_1 + E'' + E''',$$

a więc, mając na uwadze rys. 169, otrzymamy:

$$E_{III} - E_{IV} = E_I,$$

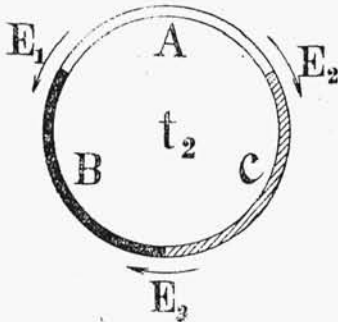
gdzie E_I oznacza siłę termoelektromotoryczną pary metali A, B .

Prawo III. Siła termoelektromotoryczna pary metali przy temperaturach spojeń t_1, t_2 równa się sumie sił termoelektromotorycznych tej samej pary metali przy temperaturach t_1, t_1' i t_2, t_2' .

Wynika to z następującego rozumowania: Siłę termoelektromotoryczną pary A, B przy temperaturach t_1, t_1' oznaczmy przez E_V . Z rysunku 176 otrzymamy:

$$E_V = E_1' - E_1'' + E^{IV} + E^V.$$

Rys. 169, 170. i 171.



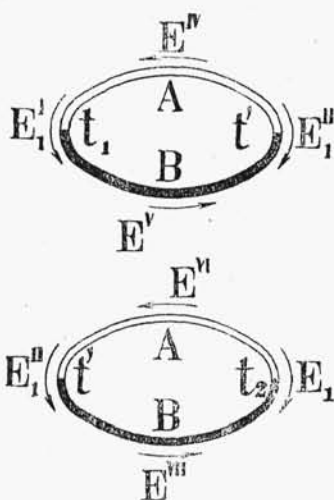
Siłę termoelektromotoryczną pary A, B przy temperaturach t' i t_2 oznaczmy przez E_{VI} . Z rysunku 177 widzimy, że:

$$E_{VI} = E_1'' - E_1 + E^{VI} + E^{VII}.$$

Dodając te dwa równania, otrzymamy:

$$E_V + E_{VI} = E_1' - E_1 + E^{IV} + E^V + E^{VI} + E^{VII}.$$

Siły elektromotoryczne Thomsona na przewodnikach między temperaturami t_1 i t_2 równe są odpowiednim sumom sił



Rys. 176 i 177.

elektromotorycznych na tych samych przewodnikach pomiędzy temperaturami t_1 , t' i t' , t_2 .

Stosując przeto oznaczenia, wskazane na rys. 169, 176 i 177, otrzymamy:

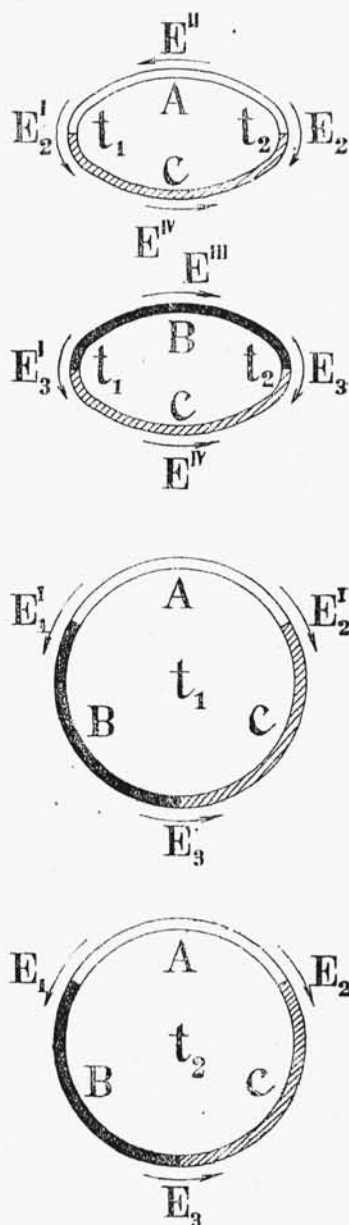
$$E'' = E^{IV} + E^{VI}, \text{ a } E''' = E^V + E^{VII}.$$

Wtedy, mając na uwadze rys. 169, będzie:

$$E_V + E_{VI} = E_1.$$

Jest to właśnie siła termoelektromotoryczna pary A, B przy różnicy temperatur t_1 i t_2 .

Pierwsze i trzecie prawo zostało potwierdzone doświadczalnie przez Becquerela.



Rys. 172, 173, 174 i 175

Zależność wielkości siły termoelektromotorycznej od różnicy temperatur nie daje się wyrazić za pomocą jednego wzoru dla wszystkich par termoelektrycznych przy dowolnych temperaturach.

Dla par termoelektrycznych (Cu, Bi), (Ag, Cu), (Au, Cu) i (Pt, Fe) można przyjąć w dość szerokich granicach, że siła termoelektromotoryczna E zmienia się proporcjonalnie do różnicy temperatur spojeń $(t_2 - t_1)$. Jeżeli więc przez k oznaczmy stały współczynnik, to:

$$E = k \cdot (t_2 - t_1).$$

Dla par termoelektrycznych (Ag, Fe), (Ag, Zn), (Cu, Fe) i (Pt, Pb) będzie według Avenariusza:

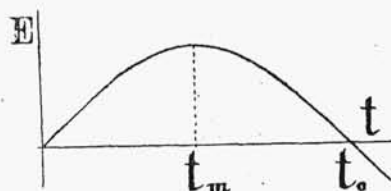
$$E = k_1 \cdot (t_2 - t_1) \pm k_2 \cdot (t_2^2 - t_1^2),^1$$

gdzie k_1 i k_2 są to współczynniki stałe.

Zakładając $t_1 = 0^\circ$, otrzymamy:

$$E = k_1 \cdot t_2 \pm k_2 \cdot t_2^2.$$

W tym przypadku zależność siły termoelektromotorycznej od temperatury spojenia sąsiedniego, gdy pierwsze jest utrzymywane stałe przy temperaturze 0° , wyraża się parabolą.



Rys. 178.

Na rys. 178. mamy właśnie taką parabolę nakreśloną przy założeniu, że przed k_2 stoi znak minus. Widzimy wówczas, że przy temperaturze t_m siła termoelektromotoryczna osiąga maximum, a przy t_0 równa się zero

i następnie zmienia znak; wtedy prąd termoelektryczny zaczyna płynąć w stronę odwrotną.

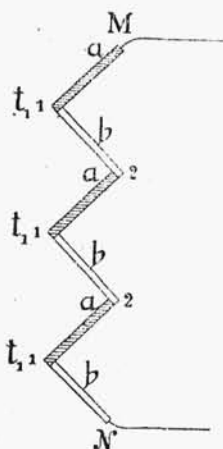
Dla pary np. Ag, Fe temperatura t_m wynosi, według Avenariusza, 223° .

6. Termoogniwa i termobaterje. W praktyce największe znaczenie mają pary termoelektryczne w przyrządach do mierzenia temperatury.

Wtedy najodpowiedniejsze są takie pary, w których siła termoelektryczna jest możliwie dokładnie proporcjonalna do różnicy temperatur spojeń.

W baterjach termoelektrycznych, które niekiedy służą za źródła prądu, chodzi przede wszystkim o to, aby mieć jak największą siłę termoelektryczną, a nadto także trwałe spójnienia.

Połączenie poszczególnych par w termobaterjach wykonywa się tak, jak to wskazuje rys. 179, gdzie a, a, \dots są kawałki jednego metalu, a b, b, \dots kawałki drugiego, M i N są końcówkami termobaterji.



Rys. 179.

¹⁾ Dla jednych par znak (+), dla innych (—).

Spojenia 1, 1, ogrzewamy, a 2, 2, oziębamy, wtedy na końcówkach MN otrzymujemy napięcie równe sumie sił termoelektromotorycznych poszczególnych par.

W celu wskazania, jak wielkie są siły termoelektromotoryczne, podaję kilka liczb, otrzymanych za pomocą dokładnych pomiarów¹⁾.

Według W. Jaegera i Diesselhorsta siła termoelektromotoryczna różnych metali przy spojeniu z platyną wynosi E , gdy jedno spojenie znajduje się przy temperaturze 0°C ., a drugie przy $+100^{\circ}\text{C}$. Za dodatnią przyjmujemy siłę elektromotoryczną, skierowaną od danego metalu do platyny w spojeniu, którego temperatura wynosi 0° .

Wartości wielkości E w miliwoltach ²⁾ podane są w następującej tablicy:

Metal	Au	Ag	Cu	Pd	Zn	Sn	Al	Cd	Ni	Fe	Pb
E	+0,72	+0,71	+0,72	-0,56	+0,75	+0,42	+0,38	+0,85	-1,62	+1,45	+0,4

Na podstawie tej tablicy, korzystając z drugiego prawa, dotyczącego sił termoelektromotorycznych, łatwo obliczyć siłę termoelektromotoryczną innych par, np. miedzi z niklem.

Siła termoelektromotoryczna pary — miedź z niklem — przy temperaturach spojeń 0° i $+100^{\circ}\text{C}$. wynosi:

$$0,72 - (-1,62) = 2,34 \text{ miliwolt.}$$

Do pomiarów wysokich temperatur często stosuje się parę, składającą się z platyny i stopu platyny z rodem (90% Pt i 10% Rh). Według Holborna i Valentinera, jeżeli jedno spojenie takiej pary ma temperaturę 0° a drugie znajduje się w temperaturze t° , to siła termoelektromotoryczna wynosi: E .

Wartości dla E w miliwoltach podane są w tablicy:

t	100°	300°	500°	700°	900°	1100°	1300°	1500°
E	0,6	2,25	4,13	6,17	8,34	10,62	13,0	15,3

Do mierzenia niskich temperatur w granicach od -200° do $+800^{\circ}$ zwykle stosuje się termoparę: miedź, konstantan³⁾ lub żelazo, konstantan. Para miedź, konstantan przy temperaturze pokojowej na 1°C . różnicy temperatur spojeń posiada siłę termoelektromotoryczną 37 mikrowoltów⁴⁾.

¹⁾ Liczby zaczerpnięte z niemieckiego Kalendarza dla Elektrotechników Uppenborna na rok 1925.

²⁾ Miliwolt — tysięczna część wolta.

³⁾ Konstantan jest to stop 60% Cu z 40% Ni.

⁴⁾ Mikrowolt — milionowa część wolta.