STANISŁAW KALINOWSKI

NAUKA FIZYKI

PODRĘCZNIK DLA SZKÓŁ HUMANISTYCZNYCH

TOM I

MECHANIKA. DYNAMICZNE WŁASNOŚCI CIAŁ. CIEPŁO.

WYDANIE TRZECIE

1931
WYDAWNICTWO M. ARCTA W WARSZAWIE

DRUKARNIA ZAKŁADÓW WYDAWNICZYCH
M. ARCT, SP. AKC. W WARSZAWIE
CZERNIAKOWSKA 225

TREŚĆ.

CZĘŚĆ I. O MIERZENIU I JEDNOSTKACH.

CZĘŚĆ II. MECHANIKA.

CZĘŚĆ III. DYNAMICZNE WŁASNOŚCI CIAŁ.

CZĘŚĆ IV. O CIEPLE.

CZĘŚĆ PIERWSZA

O MIERZENIU I JEDNOSTKACH.

1. Mierzenie.

Mając dwa pręty, możemy porównać ich długości i wyznaczyć np., że jeden z nich jest dwa razy dłuższy od drugiego. Podobnie wyznaczyć możemy, że objętość jednej kuli jest tyle a tyle razy większa lub mniejsza od objętości innej. Czy jednak, myśląc o jakich dwu osobach, będziemy mogli powiedzieć, że jedna z nich jest np. dwa razy mądrzejsza albo weselsza od drugiej?

Są rzeczy, które dają się *mierzyć*; nazywamy je *wielkościami*. Mierzenie jakiejkolwiek wielkości polega na porównaniu jej z inną wielkością tego samego rodzaju, obraną za *jednostkę*. Umiemy ustalić jednostkę długości, jednostkę objętości i zapomocą liczby wyrazić w tych jednostkach jakąkolwiek długość lub objętość. W wielu dziedzinach jednostek takich ustalić nie jesteśmy w stanie (przynajmniej teraz); do dziedzin tych nie można zastosować rachunku i nie poddają się one ścisłemu badaniu.

2. Każda jednostka winna posiadać cechę stałości.

Wybór jednostek jest naogół dowolny. Tak np. w różnych krajach i w różnych czasach używano rozmaitych jednostek długości, że wymienimy same ich nazwy: łokieć, stopa, cal, arszyn, yard (czyt. „jard") i t. d. Obierzmy więc sobie dowolnie za jednostkę długości kawałek taśmy gumowej i spróbujmy przy pomocy tej jednostki wyznaczyć np. długość pokoju. Powtarzając raz po raz taki pomiar, będziemy otrzymywali naogół niezgodne wyniki. Dlaczego? Oczywiście, podczas przykładania taśmy rozciągamy ją mimowoli, przytem nie zawsze jednakowo. Czy można w ten sposób dojść do określonego i wartościowego wyniku pomiaru? Niestałość użytej jednostki uniemożliwia to nam.

Przykład ten wyjaśnia, że *każda jednostka winna posiadać cechę stałości.*

Rys. 1.

Uczynienie zadość temu wymaganiu wiąże się z koniecznością uwzględniania różnych okoliczności. Tak np., gdybyśmy, zaniechawszy taśmy gumowej, obrali za dowolną jednostkę długości długość pręcika metalowego, uczynilibyśmy poważny krok naprzód, jednakowoż, ściśle biorąc, nie pozbylibyśmy się źródeł niestałości tej nowej jednostki. Przedewszystkiem pręcik mógłby się giąć; poza tem wziąć należy pod uwagę rzecz, którą wyjaśnia następujące d o ś w i a d c z e n i e: Zawieszona na łańcuszku kula metalowa (rys. 1) w zwykłej pokojowej temperaturze przechodzi swobodnie przez pierścień metalowy, mając średnicę niemal tę samą, co średnica pierścienia. Gdy potrzymamy kulę czas pewien w płomieniu, nie przechodzi już wtedy przez pierścień; *rozszerza się* zatem przy ogrzewaniu. Po ostygnięciu znowu przechodzi swobodnie przez pierścień, kurczy się więc przy oziębianiu. Zachodzące tu zmiany objętości są tak nieznaczne, że gołem okiem tego nie dostrzegamy.

Z doświadczenia tego wyciągamy wniosek, że i pręcik metalowy, którego pragnęlibyśmy użyć za jednostkę długości, może się rozszerzać i kurczyć przy ogrzewaniu i oziębianiu; długość jego zatem, ściśle biorąc, tylko w określonej temperaturze może być przyjęta za jednostkę.

3. Jednostka długości.

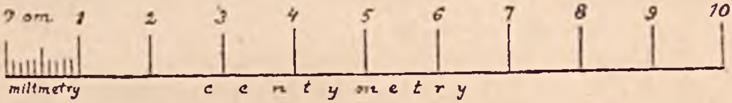
Przeszło sto lat temu ustalono we Francji jednostkę długości, którą następnie przyjęła większość krajów ucywilizowanych. Jednostkę tę, zwaną *metrem*, określa *odległość w temperaturze 0° między dwiema cieniutkiemi kreskami na końcach wzorcowego pręta,* zrobionego ze stopu platyny z irydem i przechowywanego w Biurze Międzynarodowem Miar we Francji. Dla zapobieżenia zginaniu się wzorca nadano mu kształt, który przedstawia rys. 2. Na płaskiem dnie jednego z widocznych tam rowków znajdują się wspomniane kreski.

Rys. 2.

Używa się również jednostek długości większych i mniejszych, utworzonych z metra według zasady dziesiętnej:

1 kilometr $(Km) =$ 1000 metrów
1 hektometr $(Hm) =$ 100 „

1 dekametr *(Dm)* = 10 metrów
metr *(m)*
1 decymetr *(dm)* = 0,1 metra
1 centymetr *(cm)* = 0,01 „
1 milimetr *(mm)* = 0,001 „
1 mikron (μ) = 0,001 milimetra.



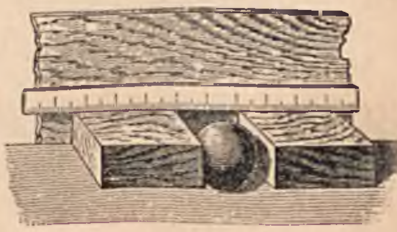
Rys. 3.

W badaniach naukowych za jednostkę długości przyjęty został przez uczonych całego świata *centymetr* (*cm*) (rys. 3).

4. Mierzenie długości.

Najprostszemi przyrządami do mierzenia długości są linjały i taśmy z podziałką na *m, cm, mm.* Szukaną długość wyznaczamy przez *przykładanie* takiej skali do badanego przedmiotu. Niewłaściwe położenie oka przy odczytywaniu skali może się stać źródłem błędu; rys. 4*a* wskazuje, jak oka i skali *nie należy* umieszczać (jaki błąd popełniamy przy jednem i drugiem położeniu oka?) Na rys. 4*b* wskazane jest właściwe umieszczenie skali.

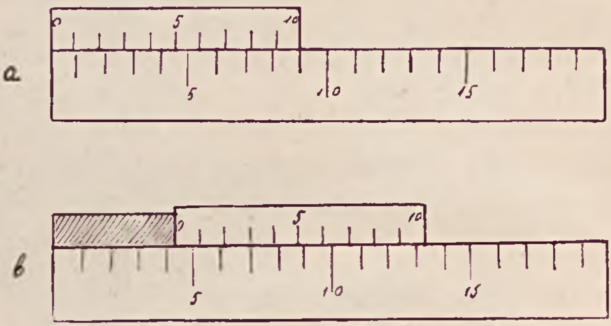
Rys. 4.



Rys. 5.

Rys. 5 wyjaśnia, jak można w prosty sposób, posługując się klockami o kształcie prostopadłościanów, mierzyć długości, gdy bezpośrednie przykładanie skali nie daje się zastosować; w podobny sposób, jak w danym razie mierzymy średnicę kuli, można zmierzyć średnicę walca albo wysokość stożka.

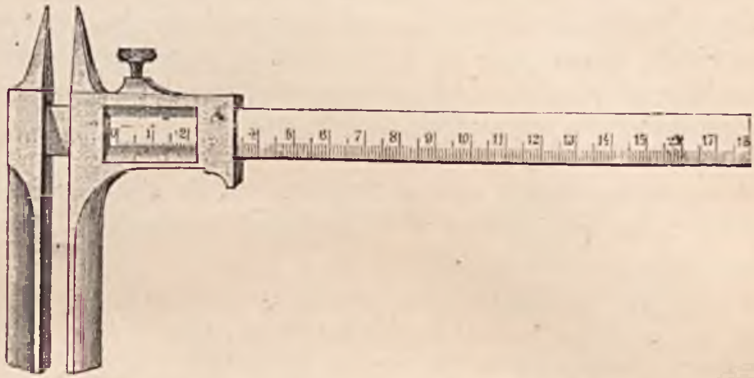
W większości przypadków zdarza się, że mierzona długość nie wynosi całkowitej liczby podziałek skali; przy pewnej wprawie można ocenić „na oko" z dość znacznem przybliżeniem części podziałki. Możemy wszakże dokładność odczytania znacznie ułatwić i powiększyć przez zastosowanie t. zw. *nonjusza*. Jest to krótka skala pomocnicza, której 10 podziałek równa się najczęściej długości 9 podziałek skali, użytej do mierzenia (rys. 6*a*); zatem każda podziałka nonjusza wynosi



Rys. 6.

0,9 podziałki skali czyli jest mniejsza od podziałki skali o 0,1 wartości tej podziałki. Przypuśćmy, iż zmierzyć chcemy długość jakiegoś przedmiotu, np. pręcika lub słupka (rys. 6*b*). Przykładamy go do skali tak, by zerowa kreska skali przypadała na jednym jego końcu; widzimy, że mierzona długość wynosi nieco więcej, niż 4 podziałki skali; należy właśnie ten ułamek podziałki wyznaczyć. Przysuwamy wzdłuż skali do drugiego końca mierzonego słupka nonjusz tak, jak to wskazuje rysunek; kreski nonjusza i skali przypadają w różnych od siebie odległościach, wszakże *trzecia kreska nonjusza* schodzi się z kreską skali. Z rysunku widać, że odległość od czwartej kreski skali do końca mierzonego słupka równa się różnicy długości trzech podziałek skali i trzech podziałek nonjusza, t. j. 0.3 podziałki skali. Zatem mierzona długość wynosi 4,3 tych jednostek, które mamy na skali — numer porządkowy tej kreski nonjusza, która schodzi się z kreską skali, daje liczbę dziesiątych części tej jednostki, którą mamy na skali.

Rys. 7 przedstawia w dwukrotnem mniej więcej zmniejszeniu t. zw. *suwak milimetrowy*. Z linjałem metalowym, zaopatrzonym w podziałkę milimetrową, złączony jest na stałe pod kątem prostym do linjału poprzeczny pręt (na rys. z lewej strony); ściana tego pręta od strony linjału jest jak najdokładniej płaska, prostopadła do długości linjału. Wzdłuż linjału daje się przesuwać szczelnie dopasowany suwak, który można ewentualnie umocować przy pomocy śruby w tem czy innem miejscu. Suwak składa się z ramy, zaopatrzonej od strony poprzeczki nieruchomej w taki sam prostopadły do długości linjału pręt; na ramie zrobiona jest podziałka nonjusza. Gdy przesuwamy suwak do nieruchomej poprzeczki, zerowa kreska nonjusza schodzi się z zerową kreską skali milimetrowej; sprawdzamy wtedy, że 10 podziałek nonjusza = 9 mm. Gdy zaciskamy zlekka między prętem suwaka a prętem nieruchomym linjału mierzony przedmiot, odczytujemy, idąc



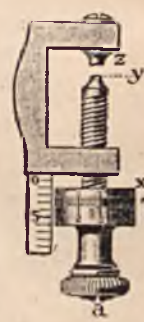
Rys. 7.

za podanemi wyżej wskazówkami, długość, wzgl. grubość przedmiotu. Ostre zakończenia poprzecznych prętów służą do tego, by mierzyć przy pomocy tegoż przyrządu, w sposób łatwy do zrozumienia, wielkości wydrążeń, np. średnice wewnętrzne rur.

Wielkie zastosowanie przy mierzeniu długości, zwłaszcza małych, znajduje *śruba*. Na rys. 8 widzimy śrubę, wkręconą w nakrętkę, której wydrążenie dokładnie pasuje do skrętów śruby. Gdy nakrętka jest nieruchoma, przez pokręcanie główki śruby w jedną lub drugą stronę wkręcamy, wzgl. wykręcamy śrubę, przyczem jej koniec ulega przesunięciu. Jeżeli t. zw. *skok* śruby czyli odległość między 2 sąsiedniemi skrętami, mierzona równolegle do osi śruby, wynosi 1 mm, to przy jednym całkowitym obrocie główki koniec śruby przesuwa się o 1 mm względem pierwotnego położenia; jeżeli wykonamy główką $^1/_2$ albo $^1/_{100}$ całkowitego obrotu, koniec śruby przesunie się o $^1/_2$ mm, względnie o 0,01 mm.

Rys. 8.

Rys. 9 przedstawia t. zw. *mikrometr*, który służy do mierzenia średnic drutów, grubości cienkich płytek i t. p. Składa się on ze śruby,



Rys. 9.

której nakrętka zgięta jest w kształcie litery C. Przy zupełnem wkręceniu śruby płaski jej koniec y opiera się o płasko zakończone wzniesienie z na nakrętce; przytem zerowa kreska podziałki na bębenku T przypada nawprost krawędzi przytwierdzonej do nakrętki płytki z podziałką milimetrową, krawędź zaś bębenka stoi na zerowej podziałce tej skali. Drut lub inny mierzony przedmiot zaciskamy lekko (aby nie zgnieść!) między końcem y śruby a wzniesieniem z; szukaną długość znajdujemy, odczytując na skali milimetrowej całkowitą liczbę milimetrów, ułamek zaś milimetra — na podziałce bębenka. Przeważnie skok śruby w mikrometrze $= {}^1/_2$ mm, obwód zaś bębenka podzielony jest na 50 równych części; pokręcenie zatem bębenka o jedną jego podziałkę odpowiada przesunięciu końca śruby o ${}^1/_{50} \cdot {}^1/_2$ mm czyli o 0,01 mm.

Poszczególne suwaki oraz mikrometry różnią się drugorzędnemi szczegółami; łatwo się jednak w tej rozmaitości zorjentować, skoro się rozumie samą zasadę przyrządu.

Ćwiczenie 1. Weźcie prostopadłościan, walec, kulę, płytkę, drut i wymierzcie te przedmioty w różnych kierunkach według podanych wyżej wskazówek. Każdy pomiar powtórzcie kilka razy (np. mierzcie po parę razy w różnych miejscach średnicę walca, gdyż idealnie kołowego przekroju nie może on posiadać) i znajdźcie wartość *średnią* otrzymanego rezultatu. Porównajcie, który z podanych sposobów mierzenia daje zgodniejsze szeregi liczb. Porównajcie wyniki, przez siebie otrzymane, z wynikami pomiarów waszych kolegów.

Uwaga. Każdy pomiar winien być porządnie zaprotokółowany; np.: średnica walca Nr. 4, przy pomocy suwaka milimetrowego.

Poszczególne odczytania:	42,7 mm
	42,7 „
	42,6 „
	42,7 „
	42,6 „
Wartość średnia =	42,66 mm.

Obliczając wartość średnią, zatrzymajcie się najdalej na tym znaku dziesiętnym, który leży za znakiem, odczytywanym bezpośrednio przy pomiarze; dalsze będą bezwartościowe, jako wyrażające wielkości, których dokładność pomiaru nie sięga.

Wiecie już albo się niebawem dowiecie z geometrji, że we wszystkich kołach, jako figurach do siebie podobnych, obwód jest jednakową liczbę razy większy od średnicy, albo, jak się to mówi, stosunek obwodu do średnicy jest wielkością stałą; przytem, jeżeli obwód oznaczymy przez l, promień koła przez r, zatem średnicę przez $2r$, będziemy mieli

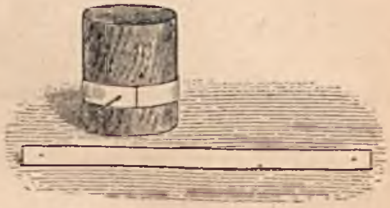
$$\frac{l}{2r} = 3{,}14159\ldots = \pi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Obwód koła tedy obliczamy ze średnicy, wzgl. z promienia według wzoru

$$l = 2\pi r \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Takie dwie wielkości, jak obwód koła i jego promień, które pozostają w stałym do siebie stosunku, jakiekolwiek będą ich poszczególne wartości, nazywają się *wielkościami proporcjonalnemi,* ten zaś stały ich stosunek — *spółczynnikiem proporcjonalności.* Przez spółczynnik proporcjonalności mnożyć należy jedną z tych wielkości, by otrzymać drugą — tak obwód koła otrzymamy, mnożąc wartość jego średnicy przez π lub też wartość promienia przez 2π; w tych razach π, wzgl. 2π jest spółczynnikiem proporcjonalności.

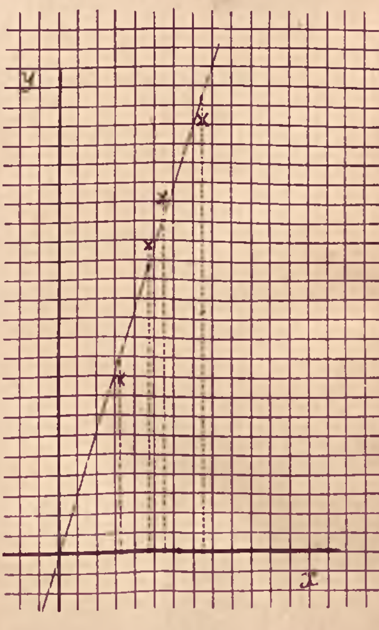
Ćwiczenie 2. Zmierzcie obwody i średnice kilku walców. Do mierzenia obwodów owińcie walce paskami papieru, jak to przedstawia rys. 10, zróbcie nakłucia szpilką i zmierzcie odległości między śladami tych nakłuć na paskach papieru. Znajdźcie dla każdego z wymierzonych kół stosunek obwodu do średnicy, a następnie obliczcie wartość średnią tego stosunku. Porównajcie otrzymaną wartość z wartością wyżej podaną (1), a niewątpliwie będą się różniły. Czem wytłumaczycie tę różnicę?



Rys. 10.

Ćwiczenie 3. Znajdźcie procentową wartość popełnionego w poprzedniem ćwiczeniu błędu.

Ćwiczenie 4. Poprowadźcie na papierze kratkowanym osie spółrzędnych, prostopadłe jedna do drugiej (rys. 11), takie, jakich używaliście zapewne do robienia wykresów. Odmierzcie w kierunku osi x-ów w dowolnie obranej przez siebie skali wartości zmierzonych średnic, a dla każdego z zaznaczonych na osi x-ów punktów w kierunku osi y-ów odpowiednie wartości wymierzonych obwodów. Dla tych samych punktów na osi x-ów odmierzcie w kierunku osi y-ów odpowiednie wartości obwodów, obliczone ze wzoru (2). Przekonajcie się, że ostatni szereg punktów leży na prostej, przechodzącej przez początek spółrzędnych O (jak na rys. 11); natomiast pierwszy szereg nie



Rys. 11.

leży na tej prostej (jak krzyżyki na rys. 11). Z odległości tych punktów od prostej spróbujcie wnioskować o błędach swoich pomiarów, nie zapominając, że mierzyliście i średnice i obwody.

5. Jednostka czasu.

Skutkiem ruchu obrotowego ziemi dokoła osi ciała niebieskie (słońce, księżyc, gwiazdy) wschodzą, zakreślają większe lub mniejsze łuki na sklepieniu niebieskiem i zachodzą. Gdy którekolwiek z tych ciał zajmuje na zakreślanej przez siebie drodze najwyższe względem poziomu położenie, powiadamy, że w tej chwili ono *góruje*. Chwilę górowania słońca nazywamy południem — w tej chwili słońce znajduje się na połowie swej drogi dziennej.

Okres czasu, upływający od jednego południa do następnego w tem samem miejscu, nazywamy *dobą słoneczną*. Skutkiem paru okoliczności, o których tu mówić nie będziemy, okres ten nie jest stały: gdy na naszej (północnej) półkuli mamy zimę, doba słoneczna jest dłuższa niż podczas naszego lata; na wiosnę i w jesieni ma ona wartość pośrednią. Niemniej jednak *wartość średnia* doby słonecznej, obliczona dla całego roku, jest wielkością zupełnie określoną i może być wzięta za podstawę do mierzenia czasu. Owa średnia wartość doby słonecznej nosi nazwę *doby średniej*. Dobę średnią dzielimy na 24 *godziny*, godzinę — na 60 *minut*, minutę — na 60 *sekund*.

Za *jednostkę czasu* w badaniach naukowych przyjęto określoną w powyższy sposób *sekundę średnią (sek)*; stanowi ona $\frac{1}{24\,.\,60\,.\,60} =$

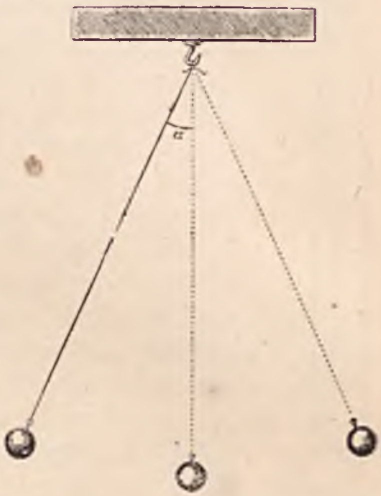
$= \frac{1}{86400}$ doby średniej.

6. Przyrządy do mierzenia czasu.

Powszechnie znanym przyrządem do mierzenia czasu jest zegar. Zegary, któremi się posługujemy w życiu codziennem, dają nam, jak to wypływa z powiedzianego w poprzednim artykule, t. zw. *czas średni*. Istnieją jeszcze zegary słoneczne, które dają *czas słoneczny* (trzy takie zegary, niejednakowo dokładnie zbudowane, znajdują się w parku łazienkowskim w Warszawie). Z powyższego łatwo zrozumieć, że, gdy zegar słoneczny wskazuje nam południe, podług czasu średniego może naogół jeszcze nie być 12-ej godziny, albo już być po 12-ej, i tylko w pewne dni zachodzi zgodność czasów średniego i słonecznego. Największa różnica wynosi około 16 minut. Regulować zatem zegary kieszonkowe podług zegara słonecznego można tylko w takim razie, jeżeli się wie, ile którego dnia minut i sekund należy dodać do czasu słonecznego albo odeń odjąć, aby otrzymać czas średni; do tego celu układa się specjalne tablice.

Do wielu doświadczeń przydatny bywa często *licznik sekundowy* (sportowy), który przedstawia rys. 12. Wygląda on jak zegarek; dłuż-

Rys. 12.

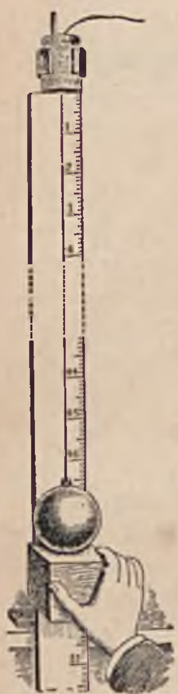


Rys. 13.

sza wskazówka daje sekundy (jak widzimy, podziałka zrobiona jest na $^1/_5$ sek), krótsza zaś minuty. Gdy dłuższa obiega raz dokoła swej tarczy, krótsza przesuwa się o jedną podziałkę. W chwili, gdy rozpoczynamy jaką obserwację, naciskamy główkę licznika (podobnie jak naciskamy ją w krytym zegarku kieszonkowym, gdy chcemy go otworzyć) i wskazówki zaczynają się poruszać; ruch wskazówek trwa dopóty, dopóki nie naciśniemy główki po raz drugi, co czynimy w chwili ukończenia obserwacji. Odczytujemy wówczas na mniejszej tarczy liczbę minut, na większej — liczbę sekund, co razem daje czas trwania obserwacji. Na rys. 12 czytamy w ten sposób: 3 min 49,4 sek. Po skończonem odczytaniu naciskamy główkę ponownie i wskazówki wracają do swych położeń zerowych; licznik znowu gotów jest do użytku. Nakręca się licznik tak samo, jak każdy zegarek kieszonkowy bez kluczyka.

Podstawowy przyrząd do mierzenia czasu stanowi *wahadło*, o którem będzie jeszcze mowa później. Tymczasem poprzestaniemy na wykonaniu doświadczenia z wahadłem najprostszej budowy.

D o ś w i a d c z e n i e. Zawieszamy na cienkiej nitce niewielką kuleczkę metalową; górny koniec nitki albo umocowujemy na haczyku (rys. 13), albo zaciskamy mocno w korku, jak to wyobraża rys. 14. Otrzymujemy w ten sposób owo wahadło najprostszej budowy. Pozostając w spoczynku, wahadło takie kierunkiem nitki daje nam kierunek *pionowy*. Zależnie od długości nitki mieć możemy różnej długości wahadła, przyczem przez długość rozumiemy tu odległość od górnego końca nitki, t. j. miejsca jej umocowania do środka kuleczki. Rys. 14 wyjaśnia, jak, przystawiając skalę milimetrową, zmierzyć możemy długość wahadła; oczywiście, od długości, odczytanej według tego, co mamy na rysunku, odjąć należy promień kuli (o mierzeniu średnicy kuli mowa była wyżej — rys. 5). Jeżeli wychylimy wahadło z położenia spoczynku i puścimy, będzie się ono wahało około tego położenia. Czas, upływający pomiędzy kolejno następującemi po sobie przejściami wahadła przez jego położenie pionowe (np. raz od lewej ręki ku prawej, drugi raz od prawej ku lewej), nazywa się *czasem wahania*. Czas, upływający pomiędzy kolejnemi przejściami wahadła przez jego położenie pionowe z jednej i tej samej strony (np. oba razy od lewej ręki ku prawej), nazywa się *okresem wahań*. Doświadczenie nasze polegać ma na wyznaczeniu czasów, względnie okresów wahań kilku takich wahadeł różnej długości. Do wyznaczeń tych użyjemy opisanego wyżej (rys. 12) licznika sekundowego, puszczając go w ruch (naciskając główkę) w chwili, gdy wahadło, podążając np. od lewej strony ku prawej, przechodzi przez położenie pionowe. Mówimy wtedy „zero“ i poczynamy rachować okresy, mówiąc „raz“, „dwa“ i t. d., gdy wahadło, posuwając się tak samo od lewej ręki ku prawej, przechodzi ponownie przez położenie pionowe. Możemy w ten sposób rachować do 20, 30, 50 i t. d., naciskając główkę licznika w chwili ostatniego obserwowanego przejścia wahadła przez położenie pionowe, zatrzymując w ten sposób licznik i odczytując następnie na nim czas trwania całej obserwacji. Pozostaje potem obliczyć czas, względnie okres wahania *).



Rys. 14.

*) By móc obserwować przejście wahadła przez położenie pionowe, ustawmy pionowo dwie długie szpilki, wetknięte w korki, jedną przed, drugą za wahadłem, przytem tak, by nitka wahadła, będącego w spoczynku, leżała w płaszczyźnie, wyznaczonej przez te szpilki i prostopadłej do płaszczyzny wahań. Trzymając

Z szeregu takich doświadczeń wyciągamy wniosek, że czas wahań wahadła danej długości w danem miejscu *) jest wielkością stałą, że wahania te zachodzą w równych czasach czyli są *izochroniczne,* jeżeli wychylenia wahadła od jego położenia pionowego są niewielkie czyli jeżeli t. zw. *obszerność* wahań jest nieznaczna. Natomiast czasy wahań wahadeł różnej długości w danem miejscu są różne. W ten sposób ułożyć możemy tabelkę w rodzaju następującej, w której oznaczamy przez l długość wahadła, przez t jego czas wahań.

l	t	t^2
28 cm	0,53 sek	0,2809
45 „	0,67 „	0,4489
62 „	0,79 „	0,6241
78 „	0,89 „	0,7921
102 „	1,01 „	1,0201

Pierwsze dwie kolumny tej tabelki bierzemy bezpośrednio z doświadczenia, przyczem między liczbami, wyrażającemi długość wahadła i czas jego wahań, nie dostrzegamy łatwej do spamiętania zależności. Natomiast jeżeli obliczymy kwadraty znalezionych czasów wahań, mieszczące się w trzeciej kolumnie, uderzyć nas musi niemal dokładna proporcjonalność liczb pierwszej i trzeciej kolumny. W ten sposób wykonane przez nas doświadczenie prowadzi do ustalenia, z uwzględnieniem nieuniknionych przytem błędów, następującej zależności:

Kwadraty czasów wahań wahadeł są proporcjonalne do ich długości, albo

Czasy wahań wahadeł są proporcjonalne do pierwiastka kwadratowego z ich długości.

Zależność tę wyrazić możemy następującym wzorem, przypominając sobie, co było powiedziane na str. 7 o wielkościach proporcjonalnych:

$$t = k\sqrt{l}\ ; \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

k jest tu spółczynnikiem proporcjonalności.

---

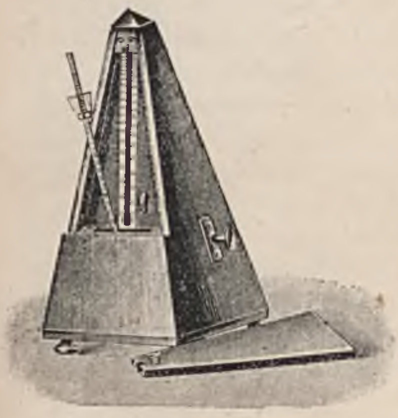
oko w płaszczyźnie szpilek, będziemy mogli przez cały czas doświadczenia dostrzegać te momenty, o które nam chodzi.

*) O zależności czasu wahań wahadła od miejsca obserwacji, t. j. od tego, czy doświadczenie wykonywa się w Warszawie, czy innem miejscu kuli ziemskiej, będzie mowa później.

Ćwiczenie 5. Wyznaczcie na papierze kratkowanym względem danych prostopadłych do siebie osi spółrzędnych (por. rys. 11) szereg punktów, których spółrzędne będą oznaczały długości wahadeł (według osi x-ów) oraz odpowiadające im czasy wahań (według osi y-ów). Powtórzcie ten wykres, biorąc za spółrzędne długości wahadeł oraz kwadraty czasów wahań. Poprowadźcie przez każdy szereg odpowiadających sobie punktów linje ciągłe i zauważcie, że w przypadku drugim punkty te wyznaczają linję prostą. Spotykacie się z tem już po raz drugi (p. ćwicz. 4), że gdy dwa szeregi wielkości pozostają do siebie w stosunku prostej proporcjonalności, odpowiadający im wykres stanowi linję prostą (pamiętajcie o nieuniknionych błędach pomiarów!).

Wynika ze wszystkiego, co tu zostało powiedziane, że możemy tak dobrać długość wahadła, by czas jego wahań w danem miejscu wynosił jedną sekundę średnią — będzie to *wahadło sekundowe* *). Zwykle przy pomiarach czasu nie posługujemy się wahadłami takiemi, jak w naszem doświadczeniu, lecz używamy do tego wahadeł innej, bardziej złożonej budowy; o tem więcej narazie mówić nie będziemy.

Przyrząd, zwany *metronomem* (rys. 15), posiada wahadło w postaci pręta, na którym osadzony jest dający się przesuwać wyżej i niżej ciężarek. Ruch tego wahadła podtrzymywany jest przez nakręconą sprężynę. Przez przesuwanie ciężarka na pręcie wahadła zmieniamy czas jego wahań; w bocznej ścianie przyrządu widzimy klucz do nakręcania sprężyny; liczby, wypisane przy kreskach na przedniej ścianie, przed którą porusza się wahadło, pozwalają nastawić metronom na pożądany czas wahań; gdy np. nastawiamy przesuwany ciężarek tak, by jego górna krawędź przypadała na wysokości kreski, przy której stoi 60, otrzymamy 60 uderzeń na minutę, czyli metronom będzie nam wybijał sekundy; jeżeli nastawimy ciężarek na kreskę 120, będziemy mieli 120 uderzeń na minutę, czyli uderzenia będą następowały po sobie co $^1/_2$ sek. Metronom nie należy do przyrządów bardzo dokładnych, niemniej jednak oddaje nieraz dobre usługi.



Rys. 15 (około $^1/_5$ wielk. nat.)

7. Bezwładność. Masa.

Spróbujmy potoczyć kulę drewnianą, spoczywającą na płaszczyźnie poziomej; uczujemy, że stawia ona pewien opór tej zmianie spo-

*) Długość wahadła sekundowego w Warszawie wynosi 99,42 cm.

czynku na ruch. Spróbujmy uczynić to samo z równej wielkości kulą żelazną, a uczujemy opór większy. Spróbujmy teraz zatrzymać te dwie kule, gdy się toczą z jednakową prędkością, a uczujemy znowu, że stawiają opór tej zmianie ruchu i znowu większy opór okaże kula żelazna.

Wiemy z doświadczenia codziennego, że tocząca się po płaszczyźnie poziomej (np. po podłodze) kula porusza się coraz wolniej, o ile ruchu jej wciąż nie podtrzymujemy (np. przez popychanie), aż wreszcie staje; wiemy także, iż tem dalej toczyć się będzie, im gładsza jest jej powierzchnia oraz im gładsza jest powierzchnia, po której się toczy. Mamy tutaj wpływ *tarcia* — im mniejsze tarcie, tem mniejszym zmianom podlega ruch toczącej się kuli. Domyślamy się, iż gdyby tarcia i wogóle żadnych przeszkód nie było, ruch kuli nie ulegałby żadnym zmianom.

Podobnie jak kula w powyższym przykładzie, zachowują się wszystkie znane nam ciała: każde ciało, o ile jest w spoczynku, stawia opór, jeżeli je chcemy wprawić w ruch; o ile zaś się porusza, opiera się wszelkim zmianom ruchu. Własność tę, wspólną wszystkim znanym nam ciałom, zowiemy *bezwładnością;* opór zaś, stawiany przez nie zmianom spoczynku lub ruchu, nazywamy *oporem bezwładnym.* (Przykłady: człowiek, siedzący w łodzi, pochyla się w kierunku ruchu łodzi w chwili uderzenia jej o brzeg lub o mieliznę; natomiast pochyla się on w kierunku, przeciwnym ruchowi łodzi, gdy ona, pozostając początkowo w spoczynku, nagle się poruszy; wyskakując z poruszającego się prędko wozu, tracimy równowagę — po dotknięciu ziemi stopy nasze przestają się już poruszać, gdy reszta ciała zachowuje ruch, wspólny wozowi oraz wszystkim znajdującym się w nim przedmiotom, i t. p.).

Uważając bezwładność za cechę wspólną wszystkich ciał fizycznych (w przeciwstawieniu do ciał geometrycznych), stwierdzamy jednakowoż, że się pod tym względem ciała różnią w ten sposób, iż moglibyśmy różnice te omówić zdaniem: ciała są w różnym stopniu bezwładne — jedne bardziej, inne mniej; np. w podanym przykładzie powiedzielibyśmy o kuli żelaznej, że jest bardziej bezwładna od drewnianej.

Zamiast mówić o jakiemś ciele, że jest bardziej bezwładne od drugiego, powiadamy, że posiada ono *większą masę.* Mówiąc tedy o pewnem ciele, że ma ono określoną masę, zaznaczamy, iż jest ono w pewnym określonym stopniu bezwładne, t. j. stawia określony opór zmianom jego ruchu.

Ciała można porównywać ze sobą pod względem masy; należy tylko masę jakiegoś ciała obrać za jednostkę i z nią porównywać inne masy.

8. Jednostka masy.

Jednocześnie z ustaleniem jednostki długości (metra) ustalono we Francji jednostkę masy—*kilogram*; jednostka ta, podobnie jak metr, rozpowszechniła się niemal na całej kuli ziemskiej. *Kilogramem nazywa się masa wzorcowej bryły,* zrobionej ze stopu platyny z irydem i przechowywanej w tem samem Biurze Międzynarodowem Miar, co wzorcowy pręt metrowy.

Rys. 16. Wzorzec kilograma z platyny (wielkość naturalna).

Kilogram miał stanowić masę jednego decymetra sześciennego wody dystylowanej w temperaturze 4^0 *C* pod normalnem ciśnieniem atmosferycznem. Gdy jednak po sporządzeniu wzorca sprawdzono, o ile odpowiada projektowi, okazało się, że masa wzorca różni się nieco od masy wody w podanych warunkach.

Oprócz kilograma są w użyciu jednostki większe i mniejsze, powiązane ze sobą zasadą dziesiętną.

1 tonna		=	1000	kilogramów
1 kilogram	*(Kg)*	=	1000	gramów
1 hektogram	*(Hg)*	=	100	„
1 dekagram	*(Dg)*	=	10	„
gram	*(gr)*			
1 decygram	*(dg)*	=	0,1	grama
1 centygram	*(cg)*	=	0,01	„
1 miligram	*(mg)*	=	0,001	„

W badaniach naukowych za jednostkę masy przyjęty został przez uczonych całego świata *gram (gr),* t. j. tysiączna część masy wzorcowego kilograma.

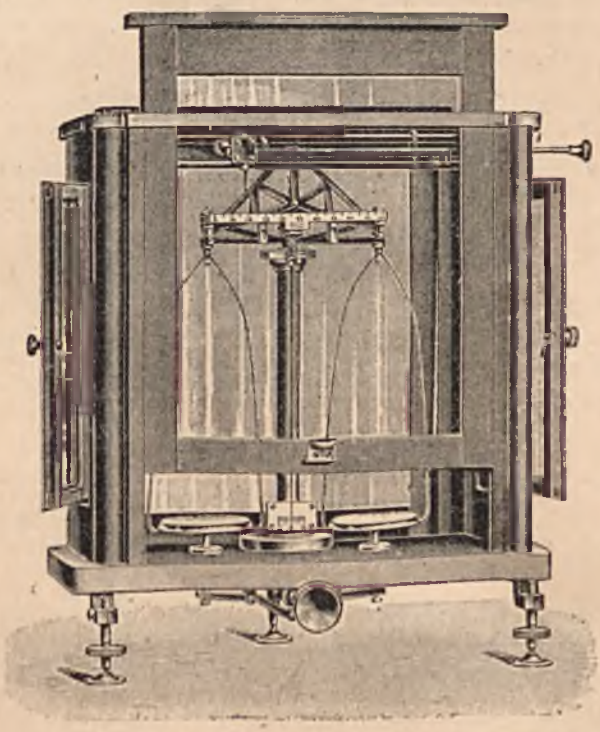
9. Przyrządy do mierzenia mas.

Z kilograma wzorcowego, podobnie jak z metra wzorcowego, porobiono jak najdokładniejsze kopje, które przechowywują się w poszczególnych krajach z wielką starannością.

W praktyce codziennej do mierzenia mas posługujemy się *odważnikami*, których sprawdzanie polega na porównywaniu z kopjami wzorca.

Rys. 17 przedstawia komplet odważników w pudełku. Mamy tam odważniki o różnej masie, tak przytem dobrane, by można z nich było łatwo utworzyć masę pożądaną. Mając np. cztery odważniki: 1) 5 gr, 2) 2 gr, 3) 2 gr, 4) 1 gr, możemy utworzyć z nich każdą całkowitą liczbę gramów w granicach od 0 gr do 10 gr (czwarty odważnik daje nam 1 gr, trzeci 2 gr, trzeci z czwartym — 3 gr, drugi

Rys. 17 ($^3/_{10}$ wielk. nat.).



Rys. 18 ($^1/_5$ wielk. nat.).

z trzecim — 4 gr, pierwszy — 5 gr, pierwszy z czwartym — 6 gr, pierwszy z drugim — 7 gr, pierwszy z drugim i czwartym — 8 gr, pierwszy z drugim i trzecim — 9 gr, wreszcie wszystkie razem — 10 gr). Czasem zamiast jednego odważnika o 2 gr i jednego o 1 gr używa się trzech po 1 gr (tak właśnie jest w komplecie, przedstawionym na rys. 17). Większe i mniejsze odważniki pozostają w takiem samem ustosunkowaniu. Każdy odważnik ma swoje miejsce w pudełku; wszystkie ułożone są podług wartości malejących. Odważniki o masie mniejszej od jednego grama zrobione są z blaszek i mają poodginane rożki, by je łatwo można było brać szczypczykami (co stanie się z masą odważników, gdy się będą pokrywały kurzem, lub gdy dotykać ich będziemy brudnemi palcami?).

Przyrządem, przy którego pomocy mierzymy nieznane masy, porównywając je ze znanemi masami odważników, jest *waga* (rys. 18). Na jednej szalce kładziemy ciało, którego masę chcemy wyznaczyć, na drugiej odważniki, dopóki nie „zrównoważą" ciała. Wtedy odczytujemy masę odważników i, jeżeli waga jest dobra, masa ta równa się masie szukanej. Tymczasem poprzestajemy na tej krótkiej wzmiance, powołując się na potoczną znajomość tej czynności. Uzasadnienie tego pomiaru i bliższe wiadomości o wadze zdobędziemy później (p. art. 50).

10. Jednostki powierzchni i objętości.

Posługując się ustaloną jednostką długości, tworzymy jednostki powierzchni i objętości. Tak np., obierając za jednostkę długości metr, przyjmujemy za jednostkę powierzchni *metr kwadratowy* (m^2), t. j. pole kwadratu, którego bok równa się jednemu metrowi, za jednostkę objętości zaś *metr sześcienny* (m^3), t. j. objętość sześcianu o krawędzi, równej jednemu metrowi. Podobnie, o ile obierzemy za jednostkę długości centymetr, otrzymamy na jednostkę powierzchni *centymetr kwadratowy* (cm^2), na jednostkę zaś objętości *centymetr sześcienny* (cm^3).

Oczywiście

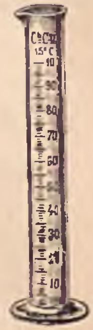
$$1\ m^2 = 100\ dm^2 = 10000 cm^2$$
$$1\ m^3 = 1000\ dm^3 = 1000000 cm^3.$$

Zauważmy, że w tych razach, gdy wypada nam pisać liczby, zakończone wielu zerami, pożytecznie jest posługiwać się *znakiem potęgi*; możemy tedy napisać

$$1\ m^2 = 10^4\ cm^2$$
$$1\ m^3 = 10^6\ cm^3.$$

Pamiętajmy jeszcze, że *litr* prawie równa się 1 $dm^3 = 10^3$ cm^3. (Litr określamy jako objętość 1 Kg wody dystylowanej w 4^0C pod ciśnieniem atmosferycznem. Gdyby wzorzec 1 Kg posiadał dokładnie masę, jaką miał posiadać (por. art. 8), litr byłby dokładnie = 1 dm^3. Wiemy już wszakże, iż tak nie jest. Zatem, trzymając się określenia litra jako objętości 1 Kg wody dyst. w 4^0C, nie można go uważać za = 1 dm^3; różnica ta wszakże jest niewielka).

Rys. 19 przedstawia w znacznem zmniejszeniu cylinder z podziałką na cm^3; ponieważ pojemność naczyń zmienia się wraz ze zmianami temperatury, na cylindrze widzimy zanotowaną temperaturę, w której pojemność jego istotnie odpowiada zaznaczonej na nim skali. Cylindry z podziałką (m e n s u r y) mają wielkie zastosowanie i bywają różnej wielkości.



Rys. 19.

11. Sposoby mierzenia powierzchni i objętości.

Geometrja uczy, jak można znaleźć powierzchnie typowych figur płaskich oraz objętości typowych brył; dokonywamy tego przez wymierzanie na tych figurach lub w tych bryłach pewnych długości, a następnie przez mnożenie znalezionych liczb, które wyrażają te długości. Tak np. dla znalezienia powierzchni prostokąta wymierzamy jego podstawę i wysokość — przypuśćmy, iż długości te są odpowiednio 15 cm i 10 cm; szukana powierzchnia wynosi

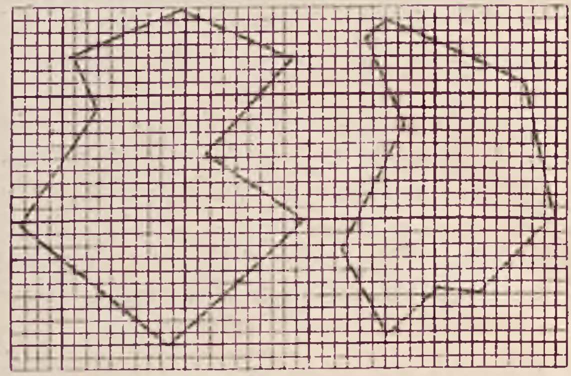
$$15 \text{ cm} \,.\, 10 \text{ cm} = 150 \text{ cm}^2.$$

Podobnie dla znalezienia objętości prostopadłościanu wymierzamy jego krawędzie — dajmy nato, będą one odpowiednio 15 cm, 10 cm i 6 cm; szukana objętość wynosi

$$15 \text{ cm} \,.\, 10 \text{ cm} \,.\, 6 \text{ cm} = 900 \text{ cm}^3.$$

Otrzymujemy tutaj symbole: cm^2 (centymetr kwadratowy), cm^3 (centymetr sześcienny), naśladując mnożenie symboli algebraicznych ($15a \,.\, 10\,a = 150a^2$ albo $15a \,.\, 10a \,.\, 6a = 900a^3$). Nie należy tego rozumieć, że tu naprawdę mnożymy centymetr przez centymetr, byłoby to bowiem pozbawione sensu; symbole cm^2 i cm^3, oznaczając przyjęte przez nas jednostki powierzchni i objętości, wskazują tylko, że dla znalezienia liczb, wyrażających powierzchnie, względ. objętości, trzeba mnożyć jedną przez drugą dwie, wzgl. trzy liczby, wyrażające długości.

Zdarza się, że figura płaska ma taki kształt nieprawidłowy, że nie możemy wyznaczyć jej powierzchni przy pomocy wskazówek geometrji. Możemy sobie wówczas poradzić inaczej. Np. możemy wykreślić ją na papierze kratkowanym, jak to mamy na rys. 20 i, rachując przypadają-



Rys. 20.

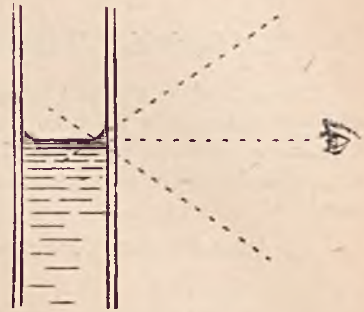
ce na niej kratki, znaleźć szukaną powierzchnię (zazwyczaj używa się do tego kratki milimetrowej; dla uproszczenia roboty niepełne kratki, większe od połowy, liczymy za całe, mniejszych od połowy nie liczymy wcale). Można jeszcze dokonać wyznaczenia powierzchni takiej nieprawidłowej figury przy pomocy ważenia. Wycinamy ją z papieru oraz z tego samego papieru wycinamy kwadrat albo prostokąt, których powierzchnie znajdujemy łatwo przez wymierzenie ich boków. Następnie ważymy obie wycięte figury i przez porównanie znalezionych mas obu kawałków papieru wyznaczamy szukaną powierzchnię.

Ćwiczenie 6. Wykreślcie na papierze kratkowanym kilka figur, których powierzchnie umiecie wyznaczyć według wzorów geometrji (prostokąt, trójkąt, trapez, koło); wyznaczcie ich powierzchnie według tych wzorów oraz rachując kratki; porównajcie otrzymane obu sposobami wyniki, wyrażając w procentach zanotowane różnice.

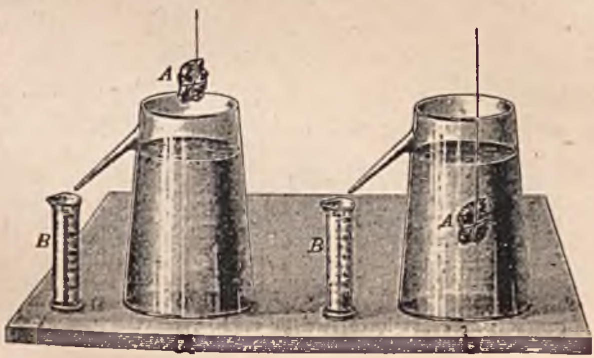
Ćwiczenie 7. Wytnijcie narysowane w poprzedniem ćwiczeniu figury i według podanych przed chwilą wskazówek wyznaczcie ich powierzchnie przy pomocy ważenia; otrzymane wyniki porównajcie z poprzedniemi obliczeniami i różnice wyraźcie w procentach.

Ćwiczenie 8. Na podstawie wyników, otrzymanych w ćwiczeniach 6-em i 7-em, porównajcie dokładność obu zastosowanych tam metod mierzenia powierzchni (liczenie kratek i ważenie).

Podobnie, gdy w pewnych razach znalezienie objętości jakiego ciała według wskazówek geometrji przedstawia trudności, możemy sobie na to inaczej poradzić. Przypuśćmy np., że chcemy znaleźć objętość pewnej ilości śrutu albo żwiru. Bierzemy cylinder z podziałką, jak na rys. 19, wlewamy doń odpowiednią ilość wody do którejkolwiek kreski i po zanotowaniu tej kreski wsypujemy do cylindra daną ilość śrutu lub żwiru; odczytując podziałkę, do której wtedy sięga woda, znajdujemy łatwo szukaną objętość *). Samo przez się, metodę tę stosować można tylko do ciał, które się nie rozpuszczają w wodzie. Jeżeli bryła, której objętość chcemy zmierzyć, nie wchodzi do mensury, można zrobić tak, jak to wyjaśnia rys. 22, używając oprócz mensury większego naczynia z wodą, zaopatrzonego w rurkę boczną. Po nalaniu wody do naczynia powyżej otworu bocznej rurki woda wycieka, dopóki poziom nie ustali się tak, jak



Rys. 21.



Rys. 22.

na rys. 22*a*. Po zanurzeniu mierzonej bryły *A* w wodzie (rys. 22*b*) woda podnosi się w naczyniu i wylewa przez rurkę do mensury, dopóki poziom jej nie przypadnie znowu na wysokości bocznego otworu. Szukaną objętość ciała daje tu, oczywiście, objętość wypchniętej przez ciało wody.

Ćwiczenie 9. Wyznaczcie według wzorów geometrji objętości kilku metalowych brył w postaci sześcianu, walca, kuli, znajdując uprzednio ich wymiary linjowe tak, jak to podane jest w art. 4. Znajdźcie następnie objętości tych samych brył metodą mensury i porównajcie wyniki jednej i drugiej metody, wyrażając otrzymane różnice w procentach.

---

*) Rys. 21 wskazuje, jak należy umieścić oko przy tem odczytywaniu.

Ćwiczenie 10. Wyznaczcie metodą mensury objętość klocka drewnianego dowolnego kształtu. Aby się klocek zanurzył w wodzie, należy go cienką nitką złączyć z bryłą metalową, która tu odegra rolę pomocniczą.

12. Gęstość. Jednostka gęstości. Mierzenie gęstości.

Ćwiczenie 11. Zmierzcie, stosując wyżej podane sposoby, masy i objętości kilku kawałków żelaza, mosiądzu, drzewa, szkła, ołowiu, a także pewnych ilości wody, alkoholu, gliceryny, rtęci. Zestawcie wyniki na tablicy takiej, jaką tu dla przykładu przytaczamy, gdzie m oznacza masę, v zaś objętość poszczególnego ciała.

	m	v	$d=\frac{m}{v}$
Żelazo	42,66 gr	5,4 cm^3	7,9 $\frac{gr}{cm^3}$
„	63,96 „	8,2 „	7,8 „
Mosiądz	100,86 „	12,3 „	8,2 „
„	82,56 „	9,6 „	8,6 „
Drzewo (dębowe) . .	100,48 „	125,6 „	0,8 „
Alkohol	74,0 „	92,5 „	0,8 „
Gliceryna	97,5 „	78,0 „	1,25 „

Tytuł ostatniej kolumny tej tablicy stanowi $d=\frac{m}{v}$; oznacza to *stosunek masy danego ciała do jego objętości* czyli t. zw. *gęstość bezwzględną* lub też krótko *gęstość* tego ciała. Liczby tej kolumny znajdujemy przez dzielenie liczb, zawartych w kolumnie m, przez liczby, zawarte w kolumnie v, np.:

$$\frac{42{,}66\ \mathrm{gr}}{5{,}4\ \mathrm{cm}^3}=7{,}9\ \frac{\mathrm{gr}}{\mathrm{cm}^3}.$$

Wynik odczytujemy tak: 7,9 gramów na centymetr sześcienny, co oznacza, że w kawałku żelaza na każdy jego centymetr sześcienny przypada masa 7,9 gr, czyli że każdy centymentr sześcienny żelaza posiada masę 7,9 gr. Co innego, oczywiście, otrzymujemy dla drzewa, gliceryny i t. d. Dzielenia dokonywamy tu z samemi liczbami: symbole gr i cm^3 traktujemy jak symbole algebraiczne (podobnie napisalibyśmy $\frac{42{,}66\,a}{5{,}4\,b^3}=7{,}9\,\frac{a}{b^3}$). Tak samo postępowaliśmy z symbolem *cm* przy mnożeniu, które prowadziło nas do wyznaczania powierzchni i objętości (art. 11).

Podobnie jak w wyrażeniu, oznaczającem pewną długość, np. 15 *cm* „*15*" oznacza liczbę jednostek długości, zaś „*cm*" samą tę jednostkę; jak w wyrażeniu $7m^2$ „7“ oznacza liczbę jednostek powierzchni, zaś „m^2“ samą jednostkę powierzchni, tak w wyrażeniu 7,9 $\frac{gr}{cm^3}$ „7,9“ oznacza liczbę jednostek gęstości, zaś „$\frac{gr}{cm^3}$“ (czyt. gram na centymetr sześcienny) samą jednostkę gęstości. Gdybyśmy masy mierzyli w Kg, a objętości w m^3, jednostką gęstości byłby odpowiednio $\frac{Kg}{m^3}$ (czytaj: kilogram na metr sześcienny). W pierwszym przypadku za jednostkę przyjmujemy gęstość takiego ciała, którego masa wynosi 1 gr na każdy cm^3 jego objętości; w drugim — za jednostkę obralibyśmy gęstość takiego ciała, którego masa wynosiłaby 1 Kg na każdy m^3 jego objętości.

Na końcu książki czytelnik znajdzie tablicę, w której podane są dokładnie wyznaczone gęstości różnych substancyj. Pamiętać należy, że przy zmianach temperatury objętość ciała ulega zmianie; to samo zatem ciało będzie miało w różnych temperaturach różne objętości, a więc i gęstości; dlatego w tablicy gęstości widzimy zaznaczone temperatury, dla których podane są odpowiednie wartości. Jeżeli chodzi o gazy, możemy je względnie łatwo zgęszczać i rozrzedzać, czyli — jak się mówi — mieć je pod różnemi ciśnieniami; zatem gęstość gazu będzie określona tylko w określonej temperaturze i określonem ciśnieniu, co również w tablicy jest zaznaczone.

Ze wzoru na gęstość

$$d = \frac{m}{v} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

otrzymujemy

$$m = dv. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Według wzoru (2), znając gęstość danej substancji, znajdziemy masę dowolnej bryły z tej substancji, skoro wiadoma będzie objętość bryły; d jest tu *spółczynnikiem proporcjonalności* tak samo, jak jest nim 2π we wzorze na obwód koła $l = 2\pi r$ (art. 4).

Znajdźmy dla przykładu masę kawałka czystego ołowiu $\left(d = 11{,}37 \frac{gr}{cm^3}\right)$, jeżeli objętość tego kawałka wynosi 8,5 cm^3:

$$m = 11{,}37 \frac{gr}{cm^3} \cdot 8{,}5\ cm^3 = 96{,}645\ gr;$$

mamy tu w liczniku i mianowniku „cm^3“; opuszczamy ten symbol, jakgdyby dzieląc przez ów czynnik licznik i mianownik; podobnego „skracania“ dokonywamy przy mnożeniu wyrazów algebraicznych, np.

$$11{,}37 \frac{a}{b^3} \cdot 8{,}5 b^3 = 96{,}645 a.$$

Do powyższego musimy dodać pewną uwagę. Mówiąc dotychczas o gęstości, mieliśmy na myśli wyłącznie t. zw. ciała *jednorodne*. Tylko do ciała jednorodnego stosuje się twierdzenie o proporcjonalności masy do objętości — dzieląc takie ciało na części i wyznaczając gęstość wskazanym sposobem dla każdej części, otrzymamy wyniki zgodne, różniące się nieco skutkiem nieuniknionych błędów przy pomiarach. Weźmy jednak jakie ciało porowate, np. pumeks, albo takie jak piasek, ziemia, cegła. Wyznaczywszy gęstość takiego ciała z danej masy i objętości, dzielmy je na części i wyznaczajmy gęstość każdej części; przekonamy się, iż wyniki będą się różniły więcej, niżby to można było objaśnić błędami obserwacji. Tutaj naprawdę poszczególne części ciała mają różne gęstości; powiemy też, iż ciała te są *niejednorodne*.

13. Gęstość względna.

Obierając gęstość jakiegoś określonego ciała w określonych warunkach fizycznych za jednostkę, możemy porównywać z nią gęstości innych ciał; otrzymamy liczby, wskazujące, *ile razy* gęstość tego czy innego ciała jest większa od gęstości, obranej dowolnie za jednostkę — będą to zatem liczby *oderwane*, a nie mianowane, jak w przypadku gęstości bezwzględnej. Liczby te będą wskazywały t. zw. *gęstość względną* ciał. Za jednostkę obieramy zazwyczaj (nie zawsze!) gęstość wody dystylowanej w temperaturze 4^0 *C*.

Przypuśćmy, iż masa jakiegoś ciała jest *m*, objętość zaś *v*; gęstość jego zatem $d = \frac{m}{v}$; przypuśćmy dalej, iż masa wody dystylowanej w 4^0 *C* w tej samej objętości *v* jest m_1, zatem gęstość wody dystylowanej w tej temperaturze $d_1 = \frac{m_1}{v}$. Dla znalezienia gęstości względnej danego ciała należy podzielić *d* przez d_1 (wszak chodzi o znalezienie, ile razy *d* jest większe od d_1), mamy więc

$$D = \frac{d}{d_1} = \frac{m}{v} : \frac{m_1}{v} = \frac{m}{m_1},$$

t. j. gęstość względną ciała otrzymamy, wyznaczając jego masę oraz masę wody dystylowanej w 4^0 *C* w objętości ciała i dzieląc pierwszą wielkość przez drugą.

Ćwiczenie 12. Zważcie pewną ilość alkoholu w mensurze i znajdźcie jego masę, potrącając masę samej mensury. Następnie po usunięciu alkoholu i osuszeniu mensury nalejcie do tej samej czystej mensury wody dystylowanej tak, by sięgała do tej samej kreski, do której przedtem sięgał alkohol, i wyznaczcie masę wody *). Uczyńcie to samo z innemi cieczami i wypiszcie wyniki w tablicy według następującego wzoru:

	Masa badanej cieczy	Masa wody dyst. w tej samej objęt.	Gęstość względna
Alkohol . . .	17,6 gr	22 gr	0,8
Gliceryna . . .	23,8 „	13 „	1,25

Ćwiczenie 13. Metodą, wskazaną na rys. 22, znajdźcie masę wody w objętości kawałka mosiądzu (żelaza, ołowiu), a po zważeniu tego kawałka mosiądzu (żelaza, ołowiu) znajdźcie jego gęstość względną.

W celu otrzymania dokładniejszych wyników używamy do pomiaru gęstości względnej nie cylindra z podziałką, lecz t. zw. *piknometru* (rys. 23) — buteleczki szklanej, którą wypełniamy całkowicie cieczą, a dla zapobieżenia parowaniu cieczy zamykamy szyjkę szlifowanym koreczkiem szklanym. Piknometr, jak widzimy z rysunku, zaopatrzony jest w termometr (poco?).

Rys. 23.

W braku takiego piknometru możecie sobie sami zrobić mniej dokładny z niewielkiej buteleczki, zamykanej korkiem, w którym uprzednio przez środek w kierunku jego wysokości przetkniecie rozżarzonym drutem wąski kanał. Wypełniacie badaną cieczą całą buteleczkę wraz z szyjką, poczem ostrożnie zatykacie korkiem, przez którego kanał wylewa się zbyteczna ilość cieczy; po osuszeniu bibułką powierzchni buteleczki i korka przystępujecie do właściwego pomiaru (uważać należy, by zawsze korek wchodził do tego samego miejsca szyjki! dlaczego? czy mogą przytem pozostawać pod korkiem pęcherzyki powietrza?).

Ćwiczenie 14. Zważcie piknometr pusty. Wypełnijcie piknometr badaną cieczą (np. alkoholem) i zważcie. Po wylaniu cieczy, wymyciu i wysuszeniu piknometru napełnijcie go wodą dystylowaną i zważcie. Zaprotokółujcie pomiar i wyznaczcie gęstość badanej cieczy w sposób następujący:

Masa piknometru z badaną cieczą . . . . . .
Masa piknometru pustego . . . .

Masa badanej cieczy . .

Masa piknometru z wodą dystylowaną . . . . .
Masa piknometru pustego . . . .

Masa wody dyst. objęt. badanej cieczy . . . . .

Gęstość względna cieczy

*) W takich niezbyt dokładnych pomiarach, w których się nie uwzględnia temperatury, możecie przyjąć dla uproszczenia, że masa jednego centymetra sześciennego wody równa się jednemu gramowi, co — jak już wiecie — ściśle nie jest (p. art. 10).

Jeżeli używacie piknometru z termometrem, znajdźcie gęstość cieczy w danej temperaturze, uwzględniając, że woda dystylowana nie ma tu naogół temperatury 4^0 (na końcu książki znajdziecie tablicę, podającą gęstość wody dystylowanej w różnych temperaturach).

Ćwiczenie 15. Zważcie piknometr pusty. Wypełnijcie piknometr wodą dystylowaną i zważcie. Odkorkujcie piknometr i, nie wylewając wody, wsypcie do piknometru pewną ilość śrutu, który uprzednio zważyliście; część wody wyleje się, pozostała w szyjce zbywająca jej ilość usunięta zostanie przy ponownem zakorkowywaniu. Zważcie piknometr ze śrutem i wodą. Zaprotokółujcie i znajdźcie gęstość względną ołowiu w sposób następujący:

Masa użytego w doświadczeniu ołowiu (śrutu) . . .
Masa piknometru, wypełnionego całkowicie wodą + masa śrutu . . . .
Masa piknometru, wypełnionego śrutem i wodą . . .

Masa wody w objętości śrutu . .

Gęstość względna ołowiu . .

Jeżeli używacie piknometru z termometrem, uwzględnijcie temperaturę wody.

Liczby, wyrażające gęstość względną różnych substancyj, różnią się cokolwiek od liczb, wyrażających gęstość bezwzględną tychże substancyj. Nic dziwnego. Gdyby wzorcowy kilogram był ściśle wykonany podług pierwotnego projektu (art. 8), t. j. gdyby masa 1 dm^3 wody dystylowanej w 4^0 *C* była dokładnie równa = 1 Kg, wówczas 1 gr wody dystylowanej w tejże temperaturze miałby dokładnie objętość = 1 cm^3, zatem gęstość bezwzględna wody dystylowanej w 4^0 *C* byłaby

$$\frac{1\ \mathrm{gr}}{1\ \mathrm{cm}^3} = 1\ \frac{\mathrm{gr}}{\mathrm{cm}^3},$$

czyli wyrażałaby się *jedynką,* którą to wartość zakładamy dowolnie przy wyznaczaniu gęstości względnej. W takim razie wartości liczbowe gęstości bezwzględnych i względnych dla poszczególnych ciał nie różniłyby się wcale. W rzeczywistości jednak Kg nie oznacza masy 1 dm^3 wody dystylowanej w 4^0 *C*. Tem się tłumaczy niezupełna zgodność liczb, wyrażających gęstość względną i bezwzględną.

14. Jednostki zasadnicze i pochodne.

Ponieważ jednostki powierzchni i objętości tworzymy, posługując się ustaloną uprzednio jednostką długości; ponieważ — że się tak wyrazimy — jednostki te „pochodzą“ od jednostki długości, możemy je przeto nazwać *jednostkami pochodnemi,* jednostkę zaś długości, od której one pochodzą, nazwiemy *jednostką zasadniczą.* Obierając za jednostkę zasadniczą *cm*, będziemy mieli jednostki pochodne cm^2, cm^3: gdybyśmy obrali za jednostkę zasadniczą *m*, jednostkami pochodnemi byłyby m^2, m^3.

Podobnie jednostkę gęstości tworzymy, posługując się uprzednio ustalonemi jednostkami masy i długości; jednostka więc masy *(gr)* i jednostka długości (*cm*) są tu jednostkami zasadniczemi, a jednostka gęstości $\left(\frac{gr}{cm^3}\right)$ — jednostką pochodną.

Fizyk ma do czynienia z bardzo różnemi wielkościami; do mierzenia ich musi posiadać odpowiednie jednostki. Okazuje się jednak, że wystarczy obrać *trzy jednostki zasadnicze,* a reszta będzie pochodnemi od tych zasadniczych. Za trzy jednostki zasadnicze obrano: *jednostkę długości, jednostkę masy* i *jednostkę czasu,* a więc — stosownie do powiedzianego w artykułach 3-im, 5-ym, 8-ym — *centymetr, gram, sekundę.*

Układ miar, w którym wszystkie jednostki sprowadzają się do trzech zasadniczych (długości, masy i czasu), nazywa się układem *bezwzględnym;* układ bezwzględny, w którym za jednostki zasadnicze przyjęto *1 cm, 1 gr i 1 sek,* nazywa się krótko układem *CGS.*

Wzór, wyrażający zależność którejkolwiek jednostki pochodnej od jednostek zasadniczych, nazywa się *wymiarem* tej jednostki. Oznaczmy przez $[L]$ jednostkę długości, przez $[M]$ jednostkę masy, przez $[T]$ jednostkę czasu; wówczas łatwo zrozumieć na podstawie tego, co było powiedziane, że wymiarem jednostki powierzchni jest $[L^2]$, wymiarem jednostki objętości jest $[L^3]$, wymiarem jednostki gęstości jest $\left[\frac{M}{L^3}\right]$. W układzie *CGS* wymiary wszystkich tych jednostek w porządku przytoczonym są odpowiednio: [cm], [gr], [sek], [cm²], [cm³], $\left[\frac{\mathrm{gr}}{\mathrm{cm}^3}\right]$.

Zadania.

1. Z jaką dokładnością moglibyśmy mierzyć długość przy pomocy skali centymetrowej, posługując się nonjuszem, którego 20 podziałek posiadałyby długość = 19 cm?

2. Jak należałoby posługiwać się nonjuszem, którego 10 podziałek równałoby się 11 podziałkom skali zasadniczej. Rozwiązać zadanie, wykreślając skalę, nonjusz i mierzoną długość na wzór rys. 6?

3. Śruba mikrometru ma skok = 2 mm; jakie przesunięcie końca śruby odpowiada pokręceniu główki o 20°?

4. Jak sprawdzić można metronom przy pomocy licznika sekundowego?

5. Znaleźć objętość kloca dębowego, którego masa wynosi 24,7 Kg, biorąc na gęstość wartość z tablicy gęstości.

6. Jaka jest masa sześcianu mosiężnego o krawędzi 1,2 dm, jeżeli gęstość mosiądzu = 8,35 $\frac{gr}{cm^3}$?

7. Do pewnego doświadczenia użyto kuli ołowianej o masie 5775,2 Kg. Znaleźć średnicę kuli, posługując się tablicą gęstości.

8. Masa ziemi, jak wyznaczono, wynosi $5,7 \cdot 10^{27}$ gr. Znaleźć gęstość średnią (dlaczego średnią?) ziemi. *).

---

*) Przy ustalaniu *metra*, jako jednostki długości, projektowano obrać na tę długość $\frac{1}{40000000}$ południka paryskiego. Wykonany wzorzec okazał się nieco krótszy, tak, że obwód południka paryskiego wynosi ok. 40008000 m. Zakładając dla uproszczenia, iż ziemia jest kulą, czytelnik znajdzie stąd wartość przybliżoną promienia ziemi.

CZĘŚĆ DRUGA.

MECHANIKA.

Rozdział 1. O ruchu postępowym.

15. Spoczynek i ruch.

Możemy mówić o określonem położeniu pewnego ciała wtedy tylko, kiedy oprócz tego ciała są jeszcze inne, względem których określamy to położenie (przez odpowiednie wymierzenie odległości); jeżeli położenie danego ciała względem tych innych ciał pozostaje niezmienne, powiadamy, że ciało jest w spoczynku; jeżeli położenie to ulega zmianom, mówimy, że ciało się porusza.

Wyobraźmy sobie podróżnika w poruszającym się (względem drzew, słupów telegraficznych i t. p.) pociągu; jeżeli człowiek ten chodzi w wagonie, porusza się względem poszczególnych części wagonu (ścian, okien, wentylatora...), które, pozostając względem siebie w spoczynku, są w ruchu względem tych wszystkich ciał, względem których porusza się cały pociąg. Stację kolei żelaznej gotowiśmy zawsze nazwać przedmiotem nieruchomym, gdyż myślimy zazwyczaj o jej niezmiennem położeniu względem innych gmachów, drzew, parkanu i t. d.; uprzytomniając jednak sobie ruch ziemi dokoła osi i dokoła słońca, będziemy musieli powiedzieć, że i stacja jest w ruchu.

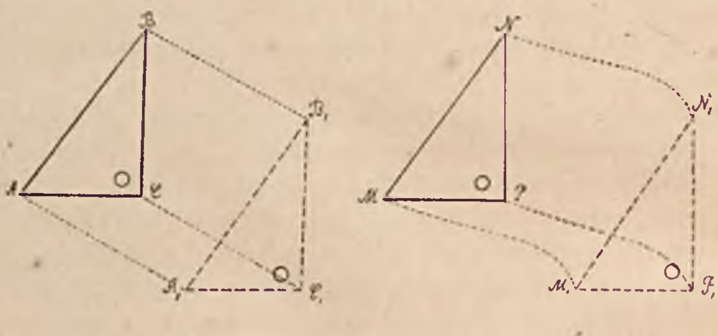
Zatem *o jednem i tem samem ciele powiedzieć możemy, że jest w ruchu lub spoczynku, zależnie od tego, względem jakich ciał rozważamy jego położenie.* W mowie potocznej często nie wyszczególniamy, względem czego oznaczamy położenie ciał, o których mowa, a czynimy tak, gdyż łatwo się zwykle można tego domyślić. Tak np. zdania „pociąg stoi“ lub „pociąg się porusza“ są zrozumiałe dlatego, że przyzwyczajeni jesteśmy wszyscy myśleć o tym przedmiocie jednakowo. W tych jednak przypadkach, gdy zajść może nieporozumienie, skróceń podobnych w mowie czynić nie należy.

Przypuśćmy, że rozważamy tylko dwa ciała A i B i określamy położenie ciała A przez jego odległość od ciała B. O ile w odległości tej nie zachodzi żadna zmiana, powiadamy, że A jest w spoczynku, w przeciwnym razie — że się porusza; o ruchu ciała B przytem wcale nie myślimy, uważając je za nieruchome. Ale i odwrotnie, jeżeli odległość między A i B ulega zmianie, moglibyśmy powiedzieć, że A jest nieruchome, zaś B względem A się porusza. Jakiego z tych dwu sposobów mówienia użyjemy, zależy od naszej woli — kierujemy się tem, co jest dla nas dogodniejsze.

Widzimy więc, że *pojęcie ruchu jest względne;* taki czy inny opis tego zjawiska zależy w znacznej mierze od obranego przez nas punktu widzenia.

16. Ruch postępowy i obrotowy.

Ruchy ciał bywają tak rozmaite, że wszystkich opisać nie bylibyśmy w stanie; rozpatrując atoli rzecz tę uważnie, przekonywamy się, iż wszystkie możliwe ruchy dają się sprowadzić do *dwu zasadniczych typów: ruchu postępowego i ruchu obrotowego.*

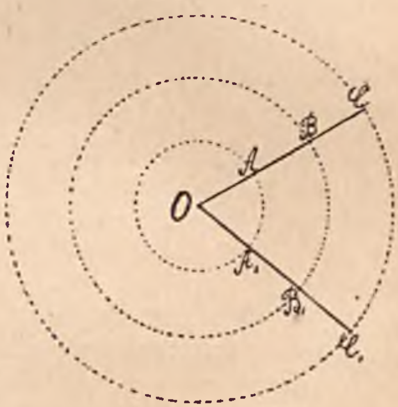


Rys. 24.

Jeżeli wszystkie punkty ciała poruszają się w sposób zupełnie jednakowy, powiadamy, że dane ciało porusza się ruchem *postępowym.* Przesuńmy np. ekierkę po powierzchni nieruchomej tablicy tak, by, jak na rys 24*a*, każdy z jej wierzchołków (a podobnie każdy inny punkt ekierki) zakreślił na tablicy równe odcinki proste AA_1, BB_1, CC_1. Albo przesuńmy tę ekierkę tak, by każdy z wierzchołków zakreślił, jak na rys. 24*b*, zupełnie jednakowe odcinki krzywe MM_1, NN_1, PP_1. W obu tych przypadkach będziemy mieli przykłady ruchu postępowego (ekierki względem tablicy).

Zwróćmy uwagę na którąkolwiek krawędź ekierki, np. AB (rys. 24*a*) albo MN (rys. 24*b*); dostrzegamy z łatwością, że przy opisanym ruchu kolejne położenia tej krawędzi (AB i A_1B_1, MN i M_1N_1) pozostają względem siebie równoległemi; podobnież równoległemi względem siebie są przy tym ruchu kolejne położenia pozostałych krawędzi i wogóle każdej linji prostej, którą pomyślimy sobie przechodzącą w określony sposób przez ekierkę. Możemy więc w ten sposób określić ruch postępowy ciała, że w kolejnych jego położeniach d o w o l n a p r o s t a, k t ó r ą w m y ś l i p r o w a d z i m y w j a k i ś o k r e ś l o n y s p o s ó b p r z e z c i a ł o, p o z o s t a j e w z g l ę d e m s i e b i e r ó w n o l e g ł ą.

Linja ciągła, którą tworzą kolejne miejsca poruszającego się punktu (np. wierzchołka A ekierki na rys. 24*a*), nazywa się *torem* punktu; określony odcinek toru, przebyty przez poruszający się punkt (np. AA_1 na rys. 24*a*, MM_1 na rys. 24*b*), nazywa się *drogą* punktu. Przy ruchu postępowym ciała wszystkie jego punkty zakreślają jednakowe tory; drogi, przebyte przez wszystkie punkty, są zawsze równe. Skoro zatem znamy ruch jednego punktu ciała, poruszającego się ruchem postępowym, znamy przez to samo ruchy wszystkich jego punktów, czyli możemy powiedzieć, iż ruch całego ciała jest nam znany. Przez drogę, przebytą przez ciało, rozumiemy tu drogę, przebytą przez jeden punkt ciała, zazwyczaj odpowiednio wybrany.



Rys. 25.

Wirujący bąk, poruszające się koło rozpędowe machiny parowej służyć mogą za przykłady ruchu *obrotowego*. Przy ruchu obrotowym mamy w każdej chwili szereg punktów w ciele, nie biorących udziału w tym ruchu i leżących na jednej linji prostej, zwanej *osią obrotu*. Torami wszystkich punktów ciała, nie leżących na osi, są w tym razie koła; drogi, przebywane tu jednocześnie przez punkty, położone w różnych odległościach od osi (AA_1, BB_1, CC_1 na rys. 25), nie są równe, a tem większe, im większa jest ich odległość od osi.

Każdy ruch jest albo postępowy, albo obrotowy, albo wreszcie jest kombinacją obu tych ruchów (np. ruch koła toczącego się wozu).

Odkładając na później omówienie ruchu obrotowego, zapoznamy się teraz z ruchem postępowym.

17. Ruch prostolinjowy i krzywolinjowy.

Jeżeli torami punktów ciała, poruszającego się ruchem *postępowym*, są linje proste, wówczas ruch ciała nazywamy *prostolinjowym*; jeżeli zaś są niemi linje krzywe, wówczas zowiemy go *krzywolinjowym* (w szczególności kołowym, eliptycznym i t. p.).

18. Ruch jednostajny i zmienny.

Znajomość toru i drogi punktu nie wystarcza jeszcze, jeżeli chcemy powiedzieć, że ruch tego punktu jest nam w zupełności znany. Jedną i tę samą drogę poruszający się punkt może przebywać w najrozmaitszy sposób — na przebycie poszczególnych części tej drogi mogą być zużyte najrozmaitsze czasy.

Jeżeli w równych, dowolnie obranych czasach punkt przebywa drogi równe, powiadamy, że się porusza ruchem *jednostajnym,* albo, że ruch jego jest *jednostajny.*

Dlaczego mówimy „w równych dowolnie obranych czasach“, a nie poprostu „w równych czasach“? Łatwo to zrozumieć. Przypuśćmy np., że punkt porusza się po torze prostolinjowym (rys. 26) tak, że na przebycie równych dróg *AB, BC, CD* używa równych czasów, np. po jednej sekundzie. Z tego jeszcze nie wynika, że ruch punktu jest jednostajny, gdyż na przebycie, dajmy na to, drogi *AB* punkt może użyć 1 sek, poruszając się w rozmaity sposób — np. zatrzymując się w którymkolwiek punkcie tej drogi na pewien ułamek sekundy, a przebiegając ją całą w ciągu pozostałej części sekundy, albo zatrzymując się kilka razy, albo jeszcze inaczej, poruszając się na podobieństwo pociągu, wyruszającego z jednej stacji i zatrzymującego się na drugiej. Jeżeli jednak ruch punktu jest taki, że w ciągu każdej sekundy punkt przebywa drogę $= AB$, w ciągu każdej dziesiątej części sekundy — drogę $= \frac{AB}{10}$ w ciągu każdej setnej sekundy — drogę $= \frac{AB}{100}$ i t. d., słowem, jeżeli we wszelkich *dowolnie obranych* równych czasach drogi, przebywane przez punkt, są równe, wtedy i t y l k o w t e d y powiemy, że ruch jego jest jednostajny.

Rys. 26.

Oczywiście, przy ruchu jednostajnym punkt przebywa drogi dwa, trzy, n razy większe w czasach, odpowiednio dwa, trzy, n razy większych. Możemy więc określić ruch jednostajny punktu jako taki, w którym *droga punktu jest proporcjonalna do czasu.*

Wszelki ruch punktu, gdy pomiędzy drogą a czasem nie zachodzi stosunek prostej proporcjonalności, nazywamy *niejednostajnym* albo *zmiennym.*

Ruch postępowy ciała nazywamy jednostajnym albo zmiennym zależnie od tego, czy ruch któregokolwiek punktu tego ciała (a przez to i każdego z jego punktów) jest jednostajny czy zmienny.

19. Prędkość w ruchu jednostajnym.

W ruchu jednostajnym droga jest proporcjonalna do czasu, a więc droga i czas pozostają tu w pewnym stałym stosunku (Część I, art. 4). Ten *stały stosunek drogi przebytej do czasu* nazywamy *prędkością* w danym *ruchu jednostajnym.*

Dla znalezienia wymienionego stosunku podzielić należy drogę przez czas, podobnie jak w art. 4 dzieliliśmy obwód koła przez jego średnicę, albo w art. 12 — masę przez objętość. Przypuśćmy np., iż punkt przechodzi ruchem jednostajnym drogę 25 cm w ciągu 5 sek; na prędkość otrzymujemy przez dzielenie

$$\frac{25 \text{ cm}}{5 \text{ sek}} = 5 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$$

i mówimy, że prędkość wynosi w tym razie *pięć centymetrów na sekundę.* I tu, jak przy wyznaczaniu gęstości (art. 12), dzielenie wykonywamy podobnie, jakgdybyśmy mieli do czynienia z symbolami algebraicznemi

$$\left(\text{np. } \frac{25a}{5b} = 5\frac{a}{b}\right).$$

Jeżeli droga 10 km zostaje przebyta ruchem jednostajnym w ciągu 0,25 godz, prędkość wynosi

$$\frac{10 \text{Km}}{0{,}25 \text{ godz}} = 40 \frac{\text{Km}}{\text{godz}}$$

— wyraźnie *czterdzieści kilometrów na godzinę.*

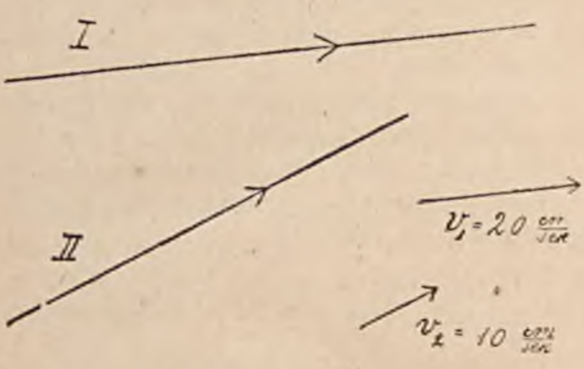
W wyrażeniach, oznaczających prędkości: $5 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$, $40 \frac{\text{Km}}{\text{godz}}$ „5“, „40“ oznaczają liczby jednostek prędkości, zaś „$\frac{\text{cm}}{\text{sek}}$“, „$\frac{\text{Km}}{\text{godz}}$“ — same jednostki prędkości, za każdym razem użyte do jej zmierzenia.

Jednostka więc prędkości, podobnie jak jednostka powierzchni i objętości, nie jest zasadniczą, lecz *pochodną*: utworzona jest z jednostki długości i jednostki czasu, jako iloraz pierwszej przez drugą. W układzie *CGS* przyjmujemy, oczywiście, na jednostkę prędkości $\frac{cm}{sek.}$

20. Prędkość jest wielkością kierunkową.

O ruchu nie możemy myśleć inaczej, jak tylko, że zachodzi zawsze w jakimś określonym kierunku; podobnie z pojęciem prędkości wiążemy nierozerwalnie pojęcie kierunku, uważając, że *prędkość ma ten kierunek, w którym zachodzi ruch.*

Rys. 27 przedstawia dwa tory prostolinjowe I i II dwu punktów, poruszających się ruchem jednostajnym w kierunkach, wskazanych przez strzałki; przypuśćmy, iż pierwszy punkt posiada prędkość $= 20 \frac{cm}{sek}$, prędkość drugiego niech wynosi $10 \frac{cm}{sek}$; wówczas te dwie prędkości przedstawić możemy przy pomocy odcinków v_1 i v_2 — kierunki ich są zgodne odpowiednio z kierunkami ruchów, długości ich mają się jak 2 : 1, w tym bowiem stosunku pozostają same prędkości. Takie wielkości, w których pojęciu tkwi nierozerwalnie pojęcie kierunku, nazywamy *wielkościami kierunkowemi albo wektorami;* te zaś wielkości, z któremi nie wiąże się wcale wyobrażenie kierunku, nazywają się *wielkościami skalowemi* albo krótko *skalarami.* Prędkość jest zatem wektorem; za przykład skalaru służyć może masa, gęstość, czas. Każdy wektor przedstawić możemy zapomocą odcinka odpowiedniej długości i właściwego kierunku, jak to było przed chwilą wyjaśnione.



Rys. 27.

21. Równanie ruchu jednostajnego.

Linja prosta na rys. 28 przedstawia tor punktu, poruszającego się ruchem jednostajnym; obieramy na tym torze punkt stały *O*, względem którego będziemy oznaczali położenie poruszającego się punktu; zmienną odległość poruszającego się punktu od punktu stałego *O* będziemy oznaczali przez *l*, uważając ją za dodatnią (+), jeżeli punkt ruchomy znajduje się na prawo od *O*,

Rys. 28.

oraz za ujemną (—), jeżeli znajduje się on na lewo od O. Kierunek ruchu, a zatem i kierunek prędkości uważać będziemy za dodatni, jeżeli ruch zachodzi od strony lewej ku prawej, za ujemny zaś, gdy ruch się odbywa w stronę przeciwną od prawej ku lewej. Przypuśćmy, iż w momencie początkowym, od którego zaczynamy rachować czas, poruszający się punkt znajduje się w A; zaznaczmy tę początkową odległość przez l_0 ($= OA$). Przypuśćmy, iż ruch zachodzi w kierunku dodatnim i po upływie czasu t od momentu początkowego punkt znajduje się w B, t. j. w czasie t zostaje przebyta droga $AB = s$; oznaczmy odległość OB przez l (odległość ta będzie różna dla różnych czasów); zatem $s = l - l_0$.

Jeżeli punkt przebywa ruchem jednostajnym drogę s w czasie t, to prędkość tego ruchu otrzymamy, dzieląc s przez t:

$$\frac{s}{t} = v; \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

prędkość v będzie tu zmierzona w jednostkach, pochodnych od jednostek długości i czasu, w których zmierzone są s i t.

Zamiast wzoru (1) możemy napisać

$$s = vt \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Przypominając sobie, co było powiedziane w art. 4, powiemy, iż prędkość jest *spółczynnikiem proporcjonalności*, przez który pomnożyć należy t dla otrzymania s. Wzór (2) pozwala zatem znaleźć drogę, przebytą ruchem jednostajnym w każdym czasie, skoro prędkość tego ruchu jest znana.

Ponieważ $s = l - l_0$, przeto piszemy zamiast (2)

$$l - l_0 = vt$$

albo

$$l = l_0 + vt \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

Wzór (3) pozwala przy znanej odległości początkowej poruszającego się punktu od punktu stałego oraz znanej prędkości znaleźć na danym torze odległość poruszającego się punktu od stałego, t. j. znaleźć jego położenie dla dowolnego czasu t. W ten sposób we wzorze (3) zawarte jest wszystko, co można powiedzieć o danym ruchu jednostajnym; co więcej, wzór ten stosuje się do każdego ruchu jednostajnego, jeżeli za każdym razem będziemy doń podstawiali na l_0 i v, t. j. na początkową odległość i prędkość wielkości odpowiednie. Skutkiem tego wzór (3) nosi nazwę *równania ruchu jednostajnego*.

Przykłady: 1) Znaleźć drogę, przebytą przez punkt ruchem jednostajnym w czasie $t = 4$ sek, jeżeli prędkość punktu wynosi $v = 15 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$. Podług wzoru (2) mamy

$$s = 15 \frac{\text{cm}}{\text{sek}} \cdot 4 \text{ sek} = 60 \text{ cm} \quad \ldots \ldots \quad (4)$$

Podkreślamy znowu, że z symbolami, oznaczającemi jednostki, postępujemy jak z symbolami algebraicznemi — tak samo napisalibyśmy $15 \frac{a}{b} \cdot 4b = 60a$ („skracamy" tu przez b, podobnie jak we wzorze (4) przez „sek"). Rezultat otrzymany jest poprawny: wszak szukamy wartości drogi, t. j. pewnej długości i otrzymujemy wielkość, zmierzoną w centymetrach.

2) Odległość początkowa poruszającego się punktu od stałego na danym torze $l_0 = 25$ cm; prędkość punktu $v = -8 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$ (ruch odbywa się od strony dodatnich odległości ku ujemnym); znaleźć położenie punktu na torze (t. j. odległość od punktu stałego) w czasie $t = 4$ sek. Stosując wzór ogólny (3), piszemy

$$l = 25 \text{ cm} - 8 \frac{\text{cm}}{\text{sek}} \cdot 4 \text{ sek} = 25 \text{ cm} - 32 \text{ cm} = -7 \text{ cm};$$

zatem w czasie oznaczonym punkt znajduje się w odległości 7 cm od punktu stałego po stronie odległości ujemnych.

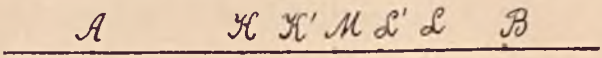
3) Równanie ruchu jednostajnego jest $l = 16t - 4{,}5$; jaka jest odległość początkowa poruszającego się punktu od stałego na danym torze, oraz ile wynosi prędkość, jeżeli za jednostkę długości przyjęty jest *cm*, za jednostkę zaś czasu *sek*? Porównywając ze wzorem (3), widzimy, że w tym razie $l_0 = -4{,}5$ cm (w początkowym momencie punkt znajduje się po stronie odległości ujemnych), prędkość zaś $v = 16 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$ (prędkość jest dodatnia, t. j. ruch skierowany od strony ujemnych odległości ku dodatnim).

4) Napisać równanie ruchu, wiedząc, że odległość początkowa poruszającego się punktu od stałego na danym torze wynosi 20 cm, oraz że ruch odbywa się od strony dodatnich odległości ku ujemnym z prędkością stałą $6 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$? W tym razie $l_0 = 20$ cm, zaś $v = -6 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$; wzorując się na ogólnem równaniu ruchu jednostajnego (3), piszemy

$$l = 20 - 6t.$$

22. Ruch prostolinjowy zmienny. Prędkość średnia i rzeczywista.

Ruch, w którym droga przebyta nie jest proporcjonalna do czasu, nazywa się *niejednostajnym* lub *zmiennym*. Przypuśćmy, iż droga $AB = s$ (rys. 29) zostaje przebyta przez punkt ruchem zmiennym w cią-



Rys. 29.

gu czasu t; czas, w którym ten punkt przechodzi tu drogi dwa, trzy, pięć razy mniejsze, nie jest w tym razie odpowiednio dwa, trzy, pięć razy mniejszy; stosunek drogi do czasu nie jest tu wielkością stałą, jak w ruchu jednostajnym. Niemniej posługujemy się i tutaj tym stosunkiem $\frac{s}{t}$, nazywając go *prędkością średnią* w danym czasie lub na danej drodze. Jest rzeczą oczywistą, że gdyby punkt poruszał się z tą prędkością średnią ruchem jednostajnym, przebyłby w tym samym czasie t tę samą drogę s. Zatem prędkością średnią ruchu zmiennego w pewnym czasie nazywamy taką prędkość, z którą zostałaby przebyta ruchem jednostajnym w tym samym czasie ta sama droga, którą w rzeczywistości przechodzi punkt ruchem niejednostajnym.

Co jednak mamy rozumieć w tym razie przez *prędkość rzeczywistą* punktu (lub ciała) w danej chwili lub w danym punkcie drogi? Np. co mamy rozumieć przez prędkość rzeczywistą poruszającego się ruchem zmiennym punktu w punkcie M (rys. 29)? Przypuśćmy, iż mały odcinek KL, na którym leży punkt M, zostaje przebyty przez punkt ruchem, jemu właściwym, w czasie τ; w takim razie iloraz $\frac{KL}{\tau}$ jest prędkością średnią punktu na danym odcinku KL. Weźmy punkty graniczne odcinka bliżej punktu M, np. weźmy odcinek $K'L'$, który punkt przebywa w mniejszym czasie τ_1; w takim razie iloraz $\frac{K'L'}{\tau_1}$ daje nam prędkość średnią punktu na odcinku $K'L'$. Zbliżając stopniowo graniczne punkty odcinka do punktu M, będziemy mieli coraz mniejsze drogi, przebywane przez punkt w czasie coraz mniejszym; dla każdej z tych dróg wyznaczyć możemy wartość prędkości średniej. Im mniejszy odcinek wybierzemy, im graniczne punkty odcinka będą leżały bliżej punktu M, tem — powiemy — prędkość średnia na tym odcinku będzie bliższa prędkości rzeczywistej w punkcie M. Prędkością zatem rzeczywistą w danym punkcie M jest ta granica, ku której dążą wartości średniej prędkości punktu na odcinkach, mieszczących na sobie dany punkt, w miarę stopniowego zmniejszania się tych odcinków i zbliżania się ich punktów końcowych do danego punktu *). A więc prędkość, czy to średnia czy rzeczywista, jest zawsze stosunkiem drogi przebytej do czasu.

23. Ruch przyśpieszony i opóźniony.

Podczas gdy w ruchu jednostajnym prędkość poruszającego się punktu lub ciała jest w każdej chwili ta sama, w ruchu zmiennym prędkość (mówimy o prędkości rzeczywistej) ulega wciąż zmianom, np. wzrasta lub maleje. Ruch zmienny z prędkością rosnącą nazywa się ruchem *przyśpieszonym,* z prędkością malejącą — *opóźnionym.* Pociąg, podchodzący do stacji, porusza się ruchem opóźnionym, odchodzący ze stacji — przyśpieszonym.

24. Ruch prostolinjowy jednostajnie zmienny.

Przypuśćmy, iż po torze prostolinjowym (rys. 30) porusza się punkt ruchem przyśpieszonym. Przypuśćmy, iż w punkcie A prędkość punktu jest v_0, po upływie zaś czasu t w punkcie B prędkość jego wynosi v. Dla znalezienia, o ile prędkość wzrasta w tym czasie t, odejmujemy od pręd-

Rys. 30.

kości końcowej v prędkość początkową v_0; różnica ta $v—v_0$ nazywa się *przyrostem* prędkości.

W razie ruchu opóźnionego prędkość ulegałaby zmniejszeniu; niemniej jednak i w tym razie różnicę między prędkością końcową a początkową nazwalibyśmy przyrostem prędkości; przyrost ten wszakże byłby wówczas ujemny.

Zdarzyć się może, iż ruch zmienny jest tego rodzaju, że w równych dowolnych czasach przyrosty prędkości są równe, albo, co na jedno wychodzi, że przyrosty prędkości są proporcjonalne do czasu. Poza tem mogą być takie ruchy zmienne, w których tej proporcjonalności niema.

Ruch zmienny, w którym przyrosty prędkości są proporcjonalne do czasu, nazywa się ruchem jednostajnie zmiennym. Oczywiście, mogą być ruchy jednostajnie przyśpieszone lub jednostajnie opóźnione.

*) Za jeden z tych punktów granicznych można obrać sam punkt M, biorąc punkt drugi coraz bliżej pierwszego.

25. Przyśpieszenie w ruchu jednostajnie zmiennym. Jednostka przyśpieszenia.

Jeżeli przyrosty prędkości są proporcjonalne do czasu, to stosunek tych przyrostów do odpowiednich czasów jest wielkością stałą. Ten *stosunek przyrostu prędkości do czasu,* w którym przyrost zachodzi, nazywa się *przyśpieszeniem* danego ruchu jednostajnie zmiennego.

Przyśpieszenie będziemy oznaczali ogólnie literą w. Zatem

$$\frac{v-v_0}{t} = w \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ (1)$$

Weźmy przykład. Przypuśćmy, iż w przypadku podobnego ruchu, jak na rys. 30, $v_0 = 15 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$, $v = 30 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$, zaś $t = 3$ sek. W czasie więc 3 sek zachodzi przyrost prędkości

$$30 \frac{\text{cm}}{\text{sek}} - 15 \frac{\text{cm}}{\text{sek}} = 15 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}.$$

W czasie 6 sekund przyrost ten byłby dwa razy większy, t. j. $30 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$, w czasie 1 sekundy odpowiednio 3 razy mniejszy i t. d. Znajdźmy przyśpieszenie danego ruchu; w tym celu dzielimy przyrost prędkości przez odpowiedni czas i otrzymujemy

$$w = \frac{15 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}}{3 \text{ sek}} = 5 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2} \text{ albo } w = \frac{30 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}}{6 \text{ sek}} = 5 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$$

albo

$$w = \frac{5 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}}{1 \text{ sek}} = 5 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}.$$

Oczywiście, wystarczy jednego z tych działań, inne bowiem dają wynik ten sam.

Zauważmy znowu, że, podobnie jak to mieliśmy już kilkakrotnie, działań nad symbolami, oznaczającemi jednostki — w tym razie $\frac{\text{cm}}{\text{sek}}$ i sek — dokonywamy tak, jakgdyby to były symbole algebraiczne (tak samo napisalibyśmy $\frac{15 \frac{a}{b}}{3\ b} = 5 \frac{a}{b^2}$).

W otrzymanym wyniku „$5 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$“ (czyt. „pięć centymetrów na sekundę do kwadratu“) liczba „5“ oznacza liczbę jednostek przyśpieszenia, zaś „$\frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$“ — nazwę tej nowej jednostki. Wyrażenie $5 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$ rozumiemy w ten sposób jako stosunek przyrostu prędkości do czasu, że w danym razie przyrost prędkości $5\,\frac{\text{cm}}{\text{sek}}$ przypada na każdą sekundę. Gdybyśmy mieli ruch z przyśpieszeniem równem jednostce, t. j. $1\,\frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$, znaczyłoby to, iż prędkość w tym razie wzrasta o jednostkę prędkości, t. j. o $1\,\frac{\text{cm}}{\text{sek}}$ na każdą sekundę (odpowiednio $2\,\frac{\text{cm}}{\text{sek}}$ na każde 2 sek, $^1/_2\,\frac{\text{cm}}{\text{sek}}$ na każde $^1/_2$ sek i t. d. — słowem, liczby, wyrażające tu przyrosty prędkości i czasy, byłyby jednakowe).

Wogóle, mierząc prędkość ruchu jednostajnie zmiennego w jakichkolwiek jednostkach prędkości $\left(\frac{L}{T}\right)$ oraz czas w tych jednostkach, które wchodzą w skład użytej jednostki prędkości (T), dzielimy dla znalezienia przyśpieszenia tego ruchu przyrost prędkości, zmierzony w jednostkach prędkości, przez odpowiedni czas; jako *wymiar* zatem przyśpieszenia otrzymujemy

$$\frac{\text{wymiar prędkości}}{\text{wymiar czasu}} = \frac{\left[\frac{L}{T}\right]}{[T]} = \left[\frac{L}{T^2}\right].$$

Jednostka przyśpieszenia $\frac{cm}{sek^2}$, którą otrzymaliśmy w powyższym przykładzie, jest jednostką szczególną, należącą do układu *CGS*.

W razie ruchu jednostajnie opóźnionego, ponieważ przyrost prędkości jest tu ujemny, stosunek tego przyrostu do czasu jest również ujemny, czyli przyśpieszenie w ruchu jednostajnie opóźnionym jest ujemne.

Przy ruchu prostolinjowym przyśpieszonym dla otrzymania prędkości późniejszej trzeba do prędkości wcześniejszej dodać prędkość tak samo skierowaną, przez co otrzymujemy późniejszą prędkość większą; przy ruchu prostolinjowym opóźnionym do prędkości wcześniejszej dodajemy prędkość, skierowaną w stronę przeciwną, skutkiem czego otrzymujemy późniejszą prędkość mniejszą. Inaczej mówiąc, w ruchu prostolinjowym przyśpieszonym przyrost prędkości ma ten sam kierunek co prędkość, w opóźnionym — przeciwny.

W tem znaczeniu mówimy, że w ruchu prostolinjowym przyśpieszonym przyśpieszenie skierowane jest tak samo jak prędkość, w ruchu zaś opóźnionym kierunek przyśpieszenia jest wręcz przeciwny, niż kierunek prędkości. *Przyśpieszenie zatem jest wielkością kierunkową (wektorem); za kierunek przyśpieszenia uważamy kierunek przyrostu prędkości.*

26. Równanie ruchu jednostajnie zmiennego.

Ze wzoru (1) w art. 25 otrzymujemy

$$v - v_0 = wt, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (1)$$

t. j. dla danego ruchu jednostajnie zmiennego, przy znanem przyśpieszeniu tego ruchu, dla znalezienia przyrostu prędkości w jakimś określonym czasie należy pomnożyć ten czas przez dane przyśpieszenie w; przyśpieszenie więc w jest tu tym stałym spółczynnikiem, przez który należy mnożyć czas dla znalezienia odpowiedniego przyrostu prędkości.

Wzór (1) możemy napisać w innej jeszcze postaci, a mianowicie

$$v = v_0 + wt \quad \ldots \ldots \ldots \quad (2)$$

Wzór (2), niezmiernie często używany, pozwala znaleźć prędkość ruchu jednostajnie zmiennego w jakimkolwiek czasie, jeżeli znane jest przyśpieszenie oraz wartość prędkości początkowej, t. j. wartość prędkości w chwili, od której czas liczymy; wzór (2) jest *równaniem prędkości* ruchu jednostajnie zmiennego.

Przypuśćmy, iż $v_0 = 25 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$, przyśpieszenie $w = 9 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$; znaleźć trzeba prędkość ruchu po upływie 3,5 sek od momentu początkowego. Otrzymujemy z (2) przez podstawienie

$$v = 25 \frac{\text{cm}}{\text{sek}} + 9 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2} \cdot 3{,}5 \text{ sek} = 25 \frac{\text{cm}}{\text{sek}} + 31{,}5 \frac{\text{cm}}{\text{sek}} = 56{,}5 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}.$$

Drogę, przebytą ruchem jednostajnie zmiennym, znaleźć można w sposób następujący. Przypuśćmy, iż punkt porusza się ruchem jednostajnie przyśpieszonym po linji prostej (rys. 31); w punkcie A prędkość jego wynosi v_0, po upływie zaś czasu t w punkcie B prędkość jego jest v. Ponieważ prędkość tu wzrasta jednostajnie, przeto prędkość średnia punktu na drodze AB równa się średniej z prędkości początkowej v_0 i końcowej v, t. j. wynosi $\frac{v_0 + v}{2}$, a zatem (p. określenie prędkości średniej w art. 22)

$$AB = \frac{v_0 + v}{2} \cdot t;$$

jeżeli przyśpieszenie ruchu jest w, to, jak już wiemy,

$$v = v_0 + wt;$$

podstawiając, otrzymujemy

$$AB = \frac{2v_0 + wt}{2} \cdot t = v_0 t + \frac{wt^2}{2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Rozumowanie pozostaje, oczywiście, bez zmiany w razie ruchu jednostajnie opóźnionego — z tą różnicą, że wtedy przyśpieszenie jest ujemne. Otrzymalibyśmy wtedy na drogę przebytą wzór

$$v_0 t - \frac{wt^2}{2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Przykład. Prędkość początkowa punktu $v_0 = 30 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$, przyśpieszenie $w = 20 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$; znaleźć drogę, przebytą przez punkt ruchem jednostajnie przyśpieszonym w czasie $t = 10$ sek. Znajdujemy zgodnie ze wzorem (3)

$$s = 30 \frac{\text{cm}}{\text{sek}} \cdot 10 \text{ sek} + \frac{20 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2} \cdot 100 \text{ sek}^2}{2} =$$

$$= 300 \text{ cm} + 1000 \text{ cm} = 1300 \text{ cm}.$$

(tyle razy objaśnialiśmy działania nad symbolami, oznaczającemi jednostki, że już powtarzać tych objaśnień dalej nie będziemy).

Napiszmy teraz równanie ruchu jednostajnie zmiennego, t. j. takie równanie, które pozwala wyznaczyć na danym torze dla dowolnego czasu położenie poruszającego się tym ruchem punktu (ciała) przez podanie odpowiadającej temu czasowi odległości poruszającego się punktu (ciała) od punktu stałego na torze.

Na rys. 31 za stały punkt obrany jest punkt O; oznaczmy odległość początkową OA poruszającego się punktu przez l_0; droga AB, przebyta przez punkt w jakimś czasie t, jak widzieliśmy, wynosi $AB = v_0 t + \frac{wt^2}{2}$. Przeto odległość $l = OB$ poruszającego się punktu od stałego w jakimkolwiek czasie t jest

$$l = l_0 + v_0 t + \frac{wt^2}{2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Jest to właśnie szukane równanie ruchu jednostajnie zmiennego. Gdyby początkowa prędkość skierowana była nie w stronę dodatnią, a ujemną, należałoby uważać v_0 za ujemne; podobnie l_0 byłoby ujemne, gdyby w początkowym momencie punkt znajdował się nie na prawo, a na lewo od O; odpowiednio i w należy rozumieć jako dodatnie lub ujemne, zależnie od warunków danych. Słowem, wzór (5) jest najogólniejszą formą równania ruchu jednostajnie zmiennego.

Rys. 31.

W przypadku szczególnym może być $l_0 = 0$ (początkowe położenie punktu obiera się za punkt stały — droga przebyta równa się odległości od punktu stałego); w tym razie otrzymujemy równanie krótsze

$$l = v_0 t + \frac{wt^2}{2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Może się wreszcie zdarzyć, że i prędkość początkowa $v_0 = 0$; równanie staje się jeszcze krótsze

$$l = \frac{wt^2}{2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

W tym ostatnim przypadku, jak widzimy, *droga przebyta jest proporcjonalna do kwadratu czasu* (w czasie 2, 3, ... razy większym droga przebyta jest 4, 9,... razy większa); połowa przyśpieszenia $\left(\frac{w}{2}\right)$ jest tym stałym spółczynnikiem, przez który mnożyć należy kwadrat czasu dla znalezienia odpowiadającej temu czasowi drogi. Ta proporcjonalność drogi do kwadratu czasu jest charakterystyczna dla ruchu jednostajnie przyśpieszonego, rozpoczynającego się z prędkością początkową, równą zeru.

27. Swobodne spadanie ciał.

D o ś w i a d c z e n i e I. Weźcie w jedną rękę kamyk albo kawałek metalu, w drugą arkusz papieru; trzymając oba te przedmioty tak, by przypadały możliwie w jednakowej odległości od podłogi, puśćcie je jednocześnie, by swobodnie spadały. Usłyszycie natychmiast niemal uderzenie kamienia czy metalu o podłogę, podczas gdy arkusz papieru, kołysząc się i zataczając, później nieco spocznie na podłodze. Powtórzywszy to doświadczenie kilkakrotnie i stwierdziwszy za każdym razem opóźnienie arkusza papieru względem bryłki, wypuszczanej z drugiej ręki, zróbcie z arkusza papieru gałkę, ściskając ją jak najmocniej, i znowu wykonajcie to samo doświadczenie. Zauważycie, że kamień (kawał metalu) i gałka z papieru, puszczone jednocześnie z tej samej wysokości ponad podłogą, jednocześnie dosięgają podłogi, przyczem gałka papierowa już się nie kołysze i nie zatacza przy spadaniu, jak to czynił przedtem arkusz papieru.

Doświadczenie II. Weźcie krążek metalowy (monetę metalową) oraz krążek z papieru o średnicy cokolwiek mniejszej od średnicy krążka metalowego. Trzymając krążek metalowy w jednej ręce, a papierowy w drugiej, w jednakowej odległości od podłogi, puśćcie oba te przedmioty jednocześnie, by spadały. Zauważycie opóźnienie w spadaniu krążka papierowego. Połóżcie teraz krążek papierowy na metalowy i, trzymając oba krążki ich powierzchniami równolegle do powierzchni podłogi, puśćcie je, by spadały. Spadną razem i dopiero po uderzeniu krążka metalowego o podłogę spadnie zeń spoczywający na nim i razem z nim spadający krążek papierowy.

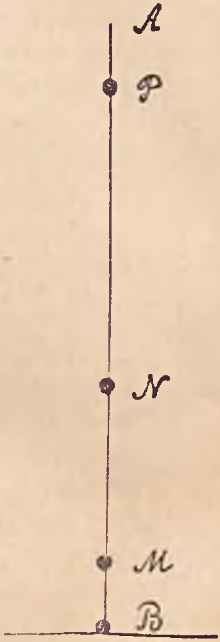
Z obu tych prostych doświadczeń wyciągamy wniosek, że, obserwując spadanie ciał, uwzględniać należy, iż zjawisko to zachodzi w powietrzu. Stawiając ruchowi tych ciał opór, powietrze wpływa przez to na ruch. O ile opór ten zmniejszamy (robiąc z arkusza papieru gałkę, a przez to zmniejszając powierzchnię poruszającego się w powietrzu ciała), albo usuwamy (kładąc krążek papieru na krążek metalowy i pozostawiając jedynie krążkowi metalowemu zwalczanie oporu powietrza), obserwujemy co innego, niż poprzednio. Co więcej, z doświadczeń tych domyślać się możemy, że o ileby spadanie ciał zachodziło bez owego oporu powietrza, nie dostrzegalibyśmy tych różnic w spadaniu, które właśnie dostrzegamy w powietrzu. W celu sprawdzenia, czy wniosek ten jest słuszny, robimy jeszcze jedno doświadczenie.

Doświadczenie III. W rurze szklanej, dającej się szczelnie zamykać (rys. 32), umieszczamy kilka różnych ciał, t. zw. „lżejszych“ i „cięższych“, np. kawałek metalu, skrawek papieru, piórko. Przechylając rurę, pozwalamy tym ciałom zsunąć się na jeden jej koniec i nagłym ruchem ustawiamy rurę pionowo tym końcem do góry, gdzie mieszczą się wszystkie wymienione ciała; wtedy one spadają i zauważyć łatwo, że najpierw dosięga dolnego końca rury kawałek metalu, potem piórko, najpóźniej zaś papierek. Następnie przy pomocy pompy usuwamy powietrze z rury i zamykamy ją szczelnie kurkiem; nie usuniemy powietrza zupełnie, czyli nie otrzymamy w rurze doskonałej „próżni“; niemniej niewielka ilość pozostałego w rurze powietrza nie wpływa już dostrzegalnie na poruszające się w niem ciała. Powtarzając teraz doświadczenie, stwierdzamy, że wszystkie ciała, mieszczące się w rurze, spadają jednakowo. Gdy następnie wpuścimy powietrze do rury, znowu najprędzej spadać będzie kawałek metalu, wolniej piórko, jeszcze wolniej papierek.


Rys. 32.

Doświadczenie to, którego pomysł zawdzięczamy Newtonowi *), utwierdza nas w słuszności wniosku, że, *o ile usuwamy opór powietrza, wszystkie ciała w jednem i tem samem miejscu ziemi spadają jednakowo.*

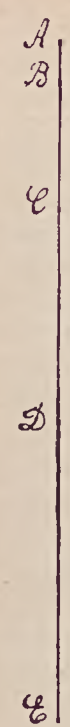
Jakiż jest ruch ciał swobodnie spadających? Pobieżna nawet obserwacja wskazuje, że nie jest to ruch jednostajny, że jest to ruch przyspieszony. Spróbujmy sprawdzić, czy nie jest to ruch jednostajnie przyśpieszony? Gdyby tak było, dałby się do tego ruchu zastosować wzór (7) art. 26, wyrażający tę charakterystyczną cechę ruchu jednostajnie przyśpieszonego, rozpoczynającego się z prędkością, równą zeru, że drogi, nim przebyte, są proporcjonalne do kwadratów, czasu, t. j., że np. droga, przebyta w dwu, trzech i t. d. sekundach, jest cztery, dziewięć i t. d. razy większa od drogi, przebytej w jednej sekundzie. W celu przybliżonego sprawdzenia takiego przypuszczenia, możemy zrobić następujące d o ś w i a d c z e n i e (IV): Umocowujemy na cienkiej, ale mocnej nitce kilka bryłek ołowianych (np. kulek, zaopatrzonych w uszka albo haczyki) tak, jak to przedstawia rys. 33, aby *M* przypadała np. w odległości 40 cm od *B*, *N* w odległości 160 cm (a więc cztery razy dalej) od *B*, wreszcie *P* w odległości 360 cm (a więc dziewięć razy dalej) od *B*; oczywiście, tedy odległość od *M* do *N* wynosi 120 cm, a więc jest trzy razy większa, odległość zaś od *N* do *P* wynosi 200 cm, czyli jest pięć razy większa, niż odległość od *B* do *M* (40 cm). Stanąwszy na odpowiedniem wzniesieniu, trzymajmy koniec *A* nitki tak, by bryłka *B* dotykała zaledwie podłogi, cała zaś nitka pozostawała napięta. Puściwszy w pewnym momencie trzymany koniec nitki, usłyszymy trzy kolejne uderzenia o podłogę bryłek *M*, *N* i *P* **). Łatwo jest bezpośrednio uchem postrzec, że uderzenia te zachodzą w równych odstępach czasu; można



Rys. 33.

*) Izaak Newton (1642 — 1727), uczony angielski, jeden z największych genjuszy, jakich kiedykolwiek wydała ludzkość. Z jego wielkiem imieniem spotykać się będziemy w fizyce niejednokrotnie.

**) Uderzając o podłogę, bryłki odskakują i dają wtórne uderzenia, które zakłócają obserwację; dlatego najlepiej brać kulki ołowiane, gdyż względnie najmniej odskakują.



Rys. 34.

jednak zrobić to dokładniej, dobierając odpowiedni czas uderzeń metronomu i puszczając trzymany w ręce koniec *A* nitki w momencie uderzenia metronomu—wówczas trzy uderzenia *M*, *N* i *P* o podłogę schodzą się z kolejnemi uderzeniami metronomu. Tu zatem w pewnym czasie (odczytanym na metronomie) spada ciało *M*, przebiegając drogę *MB*; w czasie dwa razy większym spada ciało *N*, przebiegając drogę *cztery* razy większą *NB*; w czasie zaś 3 razy większym spada ciało *P*, przebiegając drogę 9 razy większą. Powtarzając doświadczenie kilkakrotnie i zmieniając (zależnie od tego, na jakiej wysokości trzymać możemy koniec *A*) pierwszą odległość *MB* oraz odpowiednio następne, otrzymamy wyniki takie same, zgodne ze zrobionem przypuszczeniem, że ruch ciał swobodnie spadających jest ruchem jednostajnie przyśpieszonym.

Pierwszym, kto zbadał dokładnie przy pomocy doświadczeń zjawisko spadania ciał, był znakomity myśliciel włoski Galileusz (Galileo Galilei; 1564—1642).

Poświęćmy jeszcze chwil parę rozpatrzeniu wyników ostatnich doświadczeń. Wszystkie ciała, uwiązane na nitce, poczynają spadać w chwili, gdy puszczamy koniec *A* nitki, i w ciągu czasu, zawartego między dwoma kolejnemi uderzeniami metronomu, przebiegają drogę $= MB$, przyczem *M* dosięga ziemi; w ciągu następnego takiego samego czasu ciało drugie i trzecie przebiegają drogę $= NM$, która jest 3 razy większa od *MB*, przyczem teraz i ciało *N* dosięga ziemi; pozostające jeszcze ponad podłogą ciało *P* w następnym takim samym czasie przebywa drogę $= PN$, która jest 5 razy większa od *MB*, i ostatnie zkolei dosięga podłogi. Zatem drogi, przebywane przez ciała swobodnie spadające w równych, kolejno po sobie następujących czasach, mają się do siebie, jak 1 : 3 : 5 i t. d., t. j. jak szereg liczb nieparzystych. Rys. 34 przedstawia właśnie tor ciała, swobodnie spadającego; punkty *A*, *B*, *C*, *D*, *E* wyobrażają kolejne położenie ciała w równych odstępach czasu ($BC = 3 \times AB$; $CD = 5 \times AB$; $DE = 7 \times AB$, czyli $AC = 4 \times AB$; $AD = 9 \times AB$; $AE = 16 \times AB$).

Drogę, przebytą przez ciało, poruszające się ruchem jednostajnie przyśpieszonym, wyrażamy wzorem $s = \frac{wt^2}{2}$, gdzie w oznacza przyśpieszenie. Ruch ciał, swobodnie spadających, możemy zatem przedstawić przy pomocy tego właśnie wzoru. Przyjęto oznaczać przyśpieszenie, z którem poruszają się ciała, swobodnie spadające, przez g. Jeżeli przytem oznaczymy przez h wysokość, z której ciało spada w ciągu czasu t, to otrzymamy wzór

$$h = \frac{gt^2}{2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Zdawałoby się, że zmierzywszy w powyższem doświadczeniu przy pomocy metronomu czas, w którym kulki *M, N, P* przebiegają ich drogi *MB, NB, PB,* możemy przy pomocy wzoru (1) znaleźć wartość przyśpieszenia g. Liczby jednak, tą drogą znalezione, dadzą tylko wyobrażenie o tem, jaki jest rząd tej wielkości (polecamy to czytelnikom uczynić); dokładnego wyniku nie otrzymamy, gdyż pomiary te nie mogą być dostatecznie ścisłe *). O właściwej metodzie mierzenia g będziemy mówili później; tutaj tylko podamy, że jest to wielkość różna nieco w różnych miejscach ziemi. U nas będziemy przyjmowali, co wogóle odpowiada miejscowościom Europy środkowej,

$$g = 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Należy to w ten sposób rozumieć, opierając się na podanem wyżej określeniu przyśpieszenia (str. 37 — 38), że prędkość ciała, swobodnie spadającego, wzrasta o 981 $\frac{\text{cm}}{\text{sek}}$ w ciągu każdej sekundy.

28. Rzut pionowy ciał do góry.

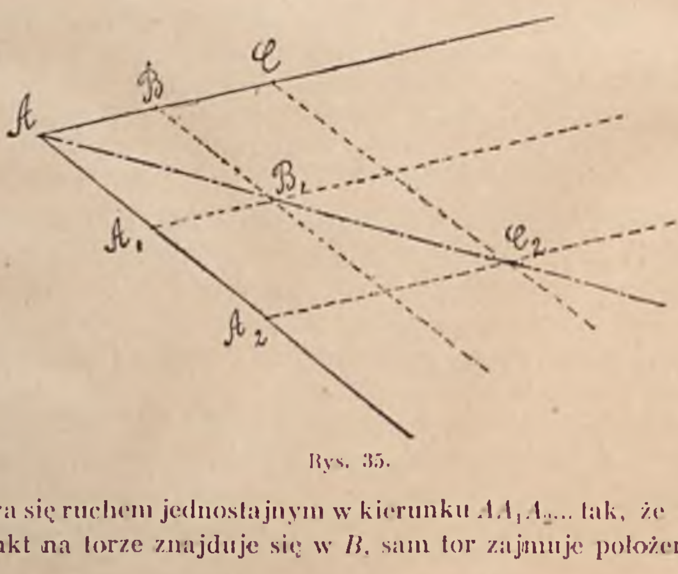
Ciało, rzucone pionowo do góry, wznosi się ruchem opóźnionym. Prędkość jego stopniowo maleje, staje się równą zeru, co odpowiada chwili osiągnięcia przez rzucone ciało najwyższego położenia, poczem zmienia kierunek i stopniowo wzrasta. Podczas gdy przy spadaniu ciała prędkość jego się zwiększa o 981 $\frac{\text{cm}}{\text{sek}}$ w ciągu każdej sekundy, przy wznoszeniu się do góry prędkość ciała o tyleż w ciągu każdej sekundy maleje. Przy spadaniu ciała prędkość jego otrzymuje, jak się wyrażamy, przyrosty dodatnie, przy wznoszeniu się — ujemne. Przy spadaniu tedy kierunek przyśpieszenia zgodny jest z kierunkiem prędkości, przy wznoszeniu się wręcz przeciwny; przyśpieszenie skierowane jest zawsze pionowo z góry na dół. Ruch ciała, rzuconego pionowo do góry, odbywa się w szczegółach wręcz odwrotnie, niż ruch ciała spadającego. Rys. 34, przy którego pomocy wyobrażaliśmy drogę ciała, swo-

*) Trudno przedewszystkiem ocenić dokładnie zgodność uderzeń kulek o podłogę i uderzeń metronomu.

bodnie spadającego, wyobrażać może również drogę ciała, rzuconego z punktu E pionowo do góry; w tym razie kolejno ED, DC, CB i BA wyobrażają drogi, przebywane w równych, po sobie następujących czasach; gdy ciało to osiągnie najwyższe położenie A, będzie potem w tych samych czasach przebiegało, spadając, drogi AB, BC, CD i DE. Czas trwania tedy wznoszenia się ciała, rzuconego pionowo do góry, jest równy czasowi swobodnego spadania z tej samej wysokości. Możecie się o tem przekonać w p r z y b l i ż e n i u, robiąc d o ś w i a d c z e n i e następujące (V): Niech jeden z was, stojąc wpobliżu ściany domu, rzuca piłkę pionowo do góry, by dosięgała okna lub balkonu 2-go albo jeszcze wyższego piętra (po kilku próbach nietrudno jest — zwłaszcza dla wprawnego gracza w piłkę — raz po raz rzucać piłkę na tę samą niemal wysokość). Drugi niech przy pomocy licznika sekundowego (rys. 12) wyznacza czas wznoszenia się piłki. Następnie niech piłka zostanie kilka razy z rzędu puszczona swobodnie z tego okna lub balkonu, do którego dolatywała, by teraz spadała z tej samej wysokości, na którą się uprzednio wznosiła, i niech znowu zostanie wyznaczony przy pomocy licznika sekundowego czas spadania. W ten sposób, z uwzględnieniem nieuniknionych błędów tej niezbyt ścisłej obserwacji, przekonacie się o słuszności powiedzianego wyżej.

29. Składanie czyli dodawanie ruchów jednostajnych.

Przypuśćmy, że punkt porusza się ruchem jednostajnym po torze prostolinjowym ABC (rys. 35). Przypuśćmy, iż jednocześnie sam tor



Rys. 35.

przesuwa się ruchem jednostajnym w kierunku AA_1A_2... tak, że w chwili, gdy punkt na torze znajduje się w B, sam tor zajmuje położenie A_1B_1;

w chwili, gdy punkt na torze znajduje się w C $(BC = AB)$, tor zajmuje położenie A_2C_2 $(A_1A_2 = AA_1)$ i t. d. Przykładu podobnej kombinacji ruchów może nam dostarczyć człowiek, idący wpoprzek wagonu, podczas gdy wagon toczy się po relsach.

Oczywiście, na płaszczyźnie, po której przesuwa się tor i na której, jak przypuszczamy, są jakieś nieruchome znaki, umożliwiające zaobserwowanie kolejnych położeń poruszającego się punktu, punkt ten zajmie położenia inne, niż te, któreby zajmował, poruszając się po torze nieruchomym. Ponieważ w chwili, gdy punkt doszedłby przy nieruchomym torze do B, sam tor zajmuje położenie A_1B_1, przeto rzeczywistem położeniem punktu na płaszczyźnie, po której tor się porusza, jest B_1; podobnie, ponieważ w chwili, gdy punkt doszedłby na torze nieruchomym do C, sam tor zajmuje położenie A_2C_2, przeto rzeczywistem położeniem punktu jest C_2 i t. d. Łatwo zrozumieć tedy, że w rezultacie tej kombinacji dwu ruchów jednostajnych prostolinjowych (punktu na torze i samego toru — ruch toru nazywamy prostolinjowym, gdyż każdy punkt toru zakreśla linję prostą $AA_1A_2...$, BB_1 ...) otrzymujemy ruch prostolinjowy i jednostajny w kierunku $AB_1C_2...$ W rzeczy samej założyliśmy $AB = BC$, $AA_1 = A_1A_2$, przeto

$$\frac{A_1B_1}{AA_1} = \frac{A_2C_2}{AA_2} \quad ; \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \qquad (1)$$

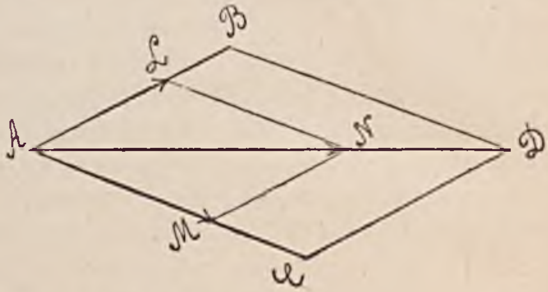
stosunek ten zachodzić może tylko w takim razie, jeżeli punkty A, B_1 i C_2 leżą na jednej prostej; a ponieważ czas, w którym są przebywane te drogi (AB, AA_1), wzięliśmy dowolny, przeto stosunek, który wyraża wzór (1), jest słuszny dla każdej pary takich punktów jak B_1 i C_2; wszystkie te punkty leżą na jednej prostej. Z tych samych założeń wynika dalej, że $AB_1 = B_1C_2$, t. j. że drogi, przebyte przez punkt na jego rzeczywistym torze, są równe w równych czasach, a ponieważ te równe czasy są wzięte dowolnie (wszak zamiast drogi AB, przebywanej w obranym czasie przez punkt na jego torze, moglibyśmy obrać drogę n razy większą lub n razy mniejszą i odpowiednio zostałby wybrany n razy większy lub mniejszy czas), przeto ruch punktu na torze AB_1C_2 jest jednostajny.

Wobec tego, iż w rozpatrywanym tutaj przykładzie ruch punktu po linji prostej AB_1C_2 uwarunkowany jest przez ruch punktu po torze ABC i ruch samego toru w kierunku AA_1A_2, powiadamy, że ruch po AB_1C_2 jest ruchem *wypadkowym* dwu ruchów *składowych* po ABC i AA_1A_2.

Rozumowanie powyższe doprowadza nas do następującego wniosku: dwa składowe przesunięcia punktu ruchem jednostajnym po linjach prostych, przypadających pod jakimkolwiek do siebie kątem, dają przesunięcie wypadkowe, równe *przekątnej równoległoboku,* zbudowanego na przesunięciach składowych. W przypadku szczególnym, gdyby przesunięcia składowe miały kierunki do siebie prostopadłe, przesunięcie wypadkowe byłoby *przekątną prostokąta,* zbudowanego w ten sam sposób.

30. Składanie czyli dodawanie prędkości.

Rys. 36 przedstawia (podobnie jak rys. 35) tworzenie się z dwu składowych ruchów prostolinjowych i jednostajnych wypadkowego ruchu prostolinjowego i jednostajnego. W pewnym czasie t drogi, przebyte przez punkt w jego ruchach składowych, są odpowiednio AB i AC; przesunięciem wypadkowem punktu w tym samym czasie jest AD — przekątna równoległoboku, zbudowanego na AB i AC.



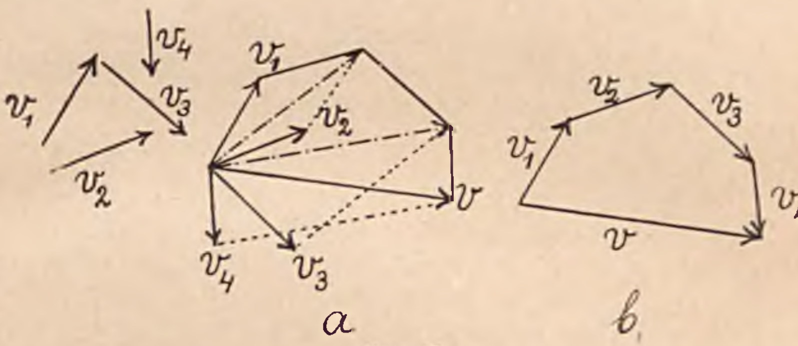
Rys. 36.

Dla znalezienia prędkości punktu w jego ruchach składowych należy podzielić odpowiednie drogi przez czas. Zatem prędkość jednego z tych ruchów składowych albo jedna, jak się mówi, *prędkość składowa* jest $v_1 = \frac{\overline{AB}}{t}$, druga prędkość składowa wynosi $v_2 = \frac{\overline{AC}}{t}$; prędkość ruchu wypadkowego po przekątnej albo, jak się mówi, *prędkość wypadkowa* jest $v = \frac{\overline{AD}}{t}$. Prędkości, jako wektory, przedstawiamy zapomocą odcinków prostych, skierowanych w stronę ruchu i mających długości proporcjonalne do wartości prędkości. Możemy więc te prędkości v_1, v_2 i v przedstawić na naszym rysunku zapomocą odcinków *AL, AM, AN.* Otrzymana figura ALNM jest podobna do *ABDC* — wszak wszystkie części linjowe tej figury *ALNM* są w jednym i tym samym stosunku do odpowiednich części figury *ABDC,* a mianowicie w stosunku 1 : t. Przeto *ALNM* jest równoległobokiem, którego boki stanowią prędkości składowe v_1 i v_2, przekątną zaś — prędkość wypadkowa v.

Wyciągamy więc wniosek, że, o ile nam dane są dwie prędkości składowe punktu, *prędkość wypadkową otrzymamy jako przekątną równoległoboku, zbudowanego na prędkościach składowych.*

Zdarza się, iż pewien ruch otrzymuje się jako wypadkowy nie dwu, lecz większej liczby składowych. Jak można w takim razie znaleźć prędkość wypadkową?

Przypuśćmy, że na rys. 37 *a* mamy przedstawione cztery prędkości składowe v_1, v_2, v_3, v_4 (rozpatrujemy przypadek, w którym wszystkie składowe ruchy zachodzą w jednej płaszczyźnie; np. możemy to sobie tak wyobrazić: zaostrzony koniec ołówka posuwa się po papierze wzdłuż krawędzi linjału ruchem jednostajnym z prędkością v_1; linjał jednocześnie posuwa się po papierze również ruchem prostolinjowym jednostajnym z prędkością v_2; w tym samym czasie arkusz papieru, o którym mowa, porusza się ruchem prostolinjowym jednostajnym z prędkością v_3 po powierzchni stołu, podczas gdy stół przesuwamy po podłodze ru-

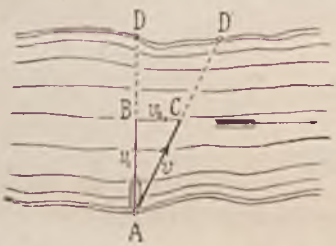


Rys. 37.

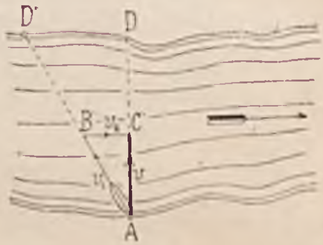
chem prostolinjowym jednostajnym z prędkością v_4; znaleźć trzeba prędkość wypadkowego ruchu końca ołówka względem przedmiotów nieruchomych w pokoju). Rozwiązujemy zadanie w następujący sposób. Przedewszystkiem zastępujemy dwie pierwsze prędkości v_1 i v_2 przez ich wypadkową, t. j. przez przekątną równoległoboku, zbudowanego na v_1 i v_2. Teraz szukamy wypadkowej tej wypadkowej i składowej v_3, wykreślając nowy równoległobok; znajdujemy już więc wypadkową trzech prędkości v_1, v_2 i v_3. Wreszcie szukamy w taki sam sposób wypadkowej tej nowej wypadkowej i pozostałej składowej v_4; ostatnia przekątna v będzie, oczywiście, wypadkową wszystkich prędkości v_1, v_2, v_3, v_4.

Możemy czynność tę znacznie uprościć. Jeżeli z jakiegokolwiek punktu poprowadzimy odcinek, wyobrażający v_1 (t. j. równy i tak samo skierowany jak v_1); z końca jego odcinek, wyobrażający drugą składową v_2; z końca tego odcinka znów odcinek, przedstawiający trzecią składową v_3, i wreszcie z końca ostatniego odcinek, wyobrażający v_4, to, łącząc początek wykreślonej figury z końcem ostatniego odcinka, otrzymamy odcinek, który wielkością swą i kierunkiem (wskazanym na rysunku strzałką) daje wypadkową prędkość. Rys. 37*b* przedstawia właśnie oddzielnie ten uproszczony sposób kreślenia, gdzie nie mamy całego szeregu równoległoboków i ich przekątnych. Prędkość wypadkowa zatem otrzymuje się jako *zamykający bok wielokąta,* zbudowanego kolejno z danych prędkości składowych; kierunek tej wypadkowej bierze się od tegoż punktu, od którego rozpoczynaliśmy kreślenie. W przypadku dwu prędkości składowych prędkość wypadkowa dana będzie przez *bok zamykający trójkąta.*

Przykład. Rys. 38 wyobraża rzekę i przepływającą przez nią łódź. *AB* przedstawia prędkość łodzi, *BC* — prędkość wody w rzece; *AC* wskazuje co do wielkości i kierunku prędkość wypadkową łodzi względem brzegów.



Rys. 38.



Rys. 39.

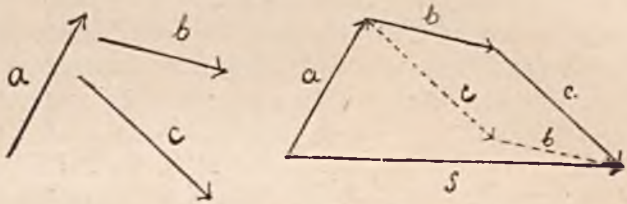
Gdy osoba, kierująca czółnem, pragnie z *A* przepłynąć do *D* (rys. 39), nie może tam wprost skierowywać łodzi, gdyż prąd wody zniesie ją wdół rzeki. Rys. 39 wyjaśnia, iż łódź należy kierować ku *D'*, jeżeli chcemy wylądować w *D*.

31. Dodawanie geometryczne.

Gdy dodać chcemy kilka liczb, znajdujemy najpierw sumę dwu jakichkolwiek z danych liczb, do tej sumy dodajemy trzecią liczbę, do nowej sumy czwartą i t. d.

Sposób, przy którego pomocy szukaliśmy wypadkowej kilku prędkości składowych, ogromnie przypomina nam dodawanie: najpierw znaleźliśmy wypadkową dwu składowych prędkości — jakgdyby dodaliśmy te dwie składowe i zastąpiliśmy je przez ich sumę; do tej wypadkowej dodaliśmy trzecią składową i znaleźliśmy nową wypadkową — nową sumę i t. d. Wobec tego czynność taką, jak szukanie wypadkowej prędkości, nazywamy *dodawaniem geometrycznem* — różnicę względem dodawania algebraicznego, w szczególności arytmetycznego, stanowi tutaj to, że składnikami są wektory, nie zaś skalary, jak np. w przypadku dodawania liczb; że uwzględniać w danym razie musimy kierunki tych składników.

W nauce fizyki spotkamy się jeszcze z różnemi wielkościami kierunkowemi. Będziemy jednak na przyszłość pamiętali, iż wektory *jednoznaczne* można *dodawać geometrycznie*, podobnie jak można dodawać *jednoznaczne* skalary (czy można dodać 25 cm i 14 sek?). Jeżeli wogóle danych jest kilka jednoznacznych wektorów *a, b, c...* (rys. 40), ich *sumą geometryczną* będzie *zamykający bok s wielokąta*, zbudowanego na danych wektorach składowych, jak to było wyjaśnione w poprzednim artykule i jak to widać z rysunku. Początkiem wektora wypadkowego jest zawsze ten punkt, od którego zaczynamy kreślenie wielokąta.



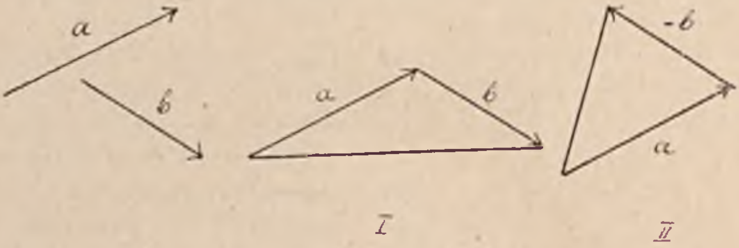
Rys. 40.

W przypadku szczególnym, gdy wielokąt wektorów sam się zamyka, wektor wypadkowy równa się zeru. Podobnie przy dodawaniu algebraicznem otrzymujemy czasem sumę, równą zeru (5 złotych kapitału + 5 złotych długu).

Przy dodawaniu skalarów suma nie ulega zmianie, jeżeli zmieniamy porządek dodawania; łatwo możemy się przekonać, że suma geometryczna kilku wektorów również nie zależy od tego, w jakim porządku dodajemy te wektory; na rys. 40 kropkami zaznaczono, że jeżeli do *a* najpierw dodamy *c*, a potem *b*, zamykający bok wielokąta, a więc sumę geometryczną otrzymamy tę samą (*s*).

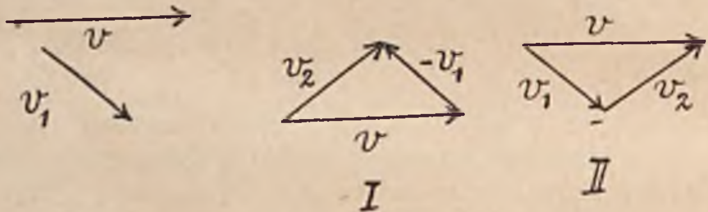
32. Odejmowanie geometryczne. Rozkładanie prędkości.

Chcąc dodać dwa wektory *a* i *b*, rysujemy jeden z nich, a z końca tego kreślimy drugi; zamykający bok *AC* trójkąta jest wynikiem dodawania — sumą geometryczną (rys. 41, I). Chcąc odjąć od wektora *a* wektor *b*, rysujemy wektor *a*, zaś z końca jego prowadzimy wektor równy b co do wielkości, lecz *skierowany odwrotnie* (rys. 41, II), t. j. dodajemy wektor $-b$ (minus b!); zamykający bok trójkąta jest wynikiem odejmowania — *różnicą geometryczną*.



Rys. 41.

Mając kilka składników, zawsze znaleźć możemy ich sumę. Rozwiązanie odwrotnego zadania, t. j. znalezienie składników, gdy suma jest wiadoma, możliwe jest tylko przy dostatecznej liczbie warunków. Np., jeżeli wiadoma jest suma dwu składników oraz jeden z nich, możliwe jest znalezienie drugiego. Natomiast, jeżeli znamy sumę trzech składników oraz jeden tylko z nich, znalezienie dwu pozostałych jest zadaniem nieokreślonem.

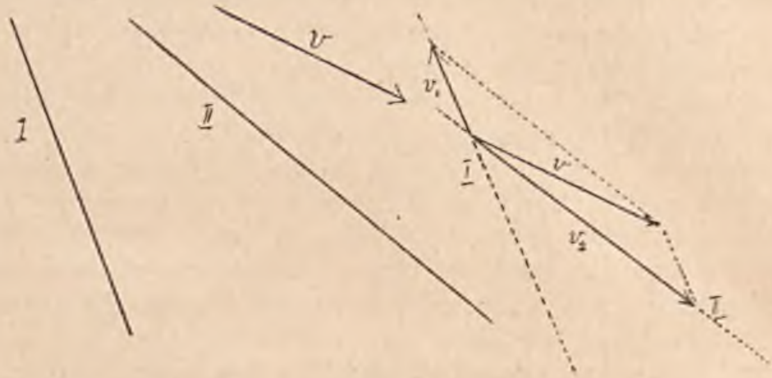


Rys. 42.

Mając prędkość wypadkową (mówiąc ogólniej — wektor wypadkowy), znaleźć możemy w pewnych razach prędkości składowe (wektory składowe). Czynność tę nazywamy *rozkładaniem* prędkości wypadkowej (wektora wypadkowego) na składowe.

Przypuśćmy, iż v (rys. 42) jest prędkością wypadkową (wektorem wypadkowym) dwu prędkości (wektorów) składowych, z których jedna (jeden) jest v_1; drugą prędkość składową (wektor składowy) v_2 znajdziemy, odejmując geometrycznie v_1 od v (rys. 42, I); łatwo się przekonywamy, że sumą geometryczną v_1 i v_2 jest istotnie v (rys. 42, II).

Zdarza się, iż mając prędkość wypadkową (wektor wypadkowy) dwu składowych, nie znamy ani jednej ze składowych, ale zato znamy kierunki (I, II) obu składowych (rys. 43). Chcąc znaleźć te składowe, robimy, jak następuje: rysujemy wypadkową prędkość (wypadkowy wektor) v i prowadzimy z początkowego punktu tego odcinka



Rys. 43.

oraz z końcowego proste równoległe do (I) i (II); otrzymujemy w ten sposób równoległobok, którego przekątną jest dana prędkość wypadkowa (wektor wypadkowy); boki v_1 i v_2 wykreślonego równoległoboku są oczywiście szukanemi składowemi.

33. Zsuwanie się ciał po równi pochyłej.

Deska, pochylona o pewien kąt względem poziomu, tworzy t. zw. *równię pochyłą.* Umieszczone na niej ciało zsuwa się, przyczem ruchowi temu przeszkadza tarcie tem mniejsze, im gładsze są powierzchnie deski oraz umieszczonego na niej ciała. Jeżeli, wyżłobiwszy w desce rowek, wygładzimy i wypolerujemy jak najdokładniej jego powierzchnię, a następnie przy pochyłem względem poziomu położeniu deski umieścimy w rowku kulkę stalową, będzie się ona staczała. Ruch kulki będzie tu jednocześnie postępowy i obrotowy, a więc bardziej złożony, niż zsuwanie się; niemniej możemy i w tej postaci badać ruch ciała na równi pochyłej,ześrodkowując uwagę jedynie na ruchu postępowym kulki.

D o ś w i a d c z e n i e. Dobrze wypolerowaną drewnianą deskę (ok. 1,5 metra długości) z rowkiem ustawiamy na stole tak, by tworzyła kąt ok. 10° z poziomem, a do niżej położonego jej końca przystawiamy deseczkę, w którą mogłaby uderzać staczająca się w rowku kulka. Uruchomiamy metronom, by wybijał nam ułamki sekundy i, trzymając ręką kulkę u górnego końca rowka, puszczamy ją w chwili uderzenia metronomu, poczynając rachować od tej chwili: „zero“, „raz“, „dwa“

i t. d. uderzenia metronomu. Naogół uderzenie kulki o deseczkę, mieszczącą się u dolnego końca rowka, nie schodzi się z uderzeniem metronomu. Przesuwając ciężarek, regulujący bicie metronomu, z łatwością osiągamy, że uderzenie o deseczkę zachodzi np. na „sześć", t. j., że cała droga po równi pochyłej zostaje przebyta w ciągu sześciu obranych w doświadczeniu jednostek czasu.

Nie zmieniając teraz czasu bicia metronomu, powtarzamy doświadczenie, puszczając kulkę z niżej położonego miejsca rowka, by droga, przebiegana przez kulkę, była 4, wzgl. 9 razy mniejsza, niż początkowo, gdy kulka przebiegała całą długość deski. Przekonywamy się, że teraz uderzenie kulki o deseczkę zachodzi na „trzy", wzgl. na „dwa", czyli że w dwa razy krótszym czasie staczająca się w rowku kulka przebiega drogę *cztery* razy mniejszą, w czasie *trzy* razy mniejszym — drogę *dziewięć* razy mniejszą.

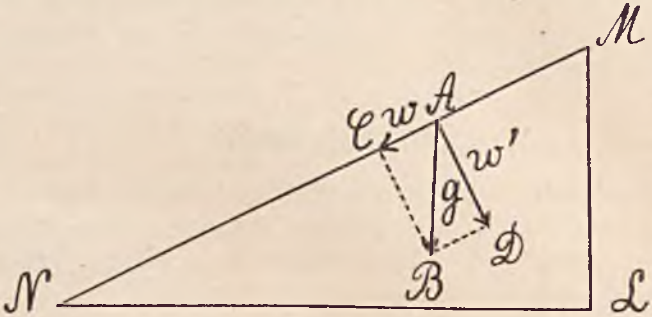
Zmieniamy teraz pochylenie deski, by kąt, tworzony przez nią z poziomem, był większy, niż poprzednio, i powtarzamy doświadczenie, regulując odpowiednio metronom. Przekonywamy się, iż teraz zjawisko przebiega prędzej, jednak stosunek dróg i czasów pozostaje ten sam.

Z doświadczeń tych wyciągamy wniosek, że z pominięciem tarcia oraz nieuniknionych błędów i niedokładności obserwacji *), uważać możemy ruch ciała, staczającego się czy zsuwającego po równi pochyłej, za *jednostajnie przyśpieszony* (por. art. 27). Przyśpieszenie tego ruchu wzrasta w miarę, jak coraz bardziej pochylamy równię względem poziomu. Gdybyśmy wreszcie równię ustawili pionowo, otrzymalibyśmy swobodne spadanie ciała. Wspomniany wyżej uczony włoski Galileusz, badając ruch swobodnie spadających ciał, wykonywał między innemi i podobne doświadczenia z równią pochyłą, widząc w ruchu ciał, zsuwających się po równi pochyłej, zjawisko tego samego typu, tylko ilościowo różne od ruchu ciał swobodnie spadających, oraz znajdując w tem potwierdzenie, że ruch ciał swobodnie spadających jest ruchem jednostajnie przyśpieszonym.

Pragnąc dokładniej zdać sprawę z obserwowanego zjawiska, możemy rozumować, jak następuje, zaniedbując nieuniknione w rzeczywistości tarcie. Przypuśćmy, iż ciało A mieści się na równi, pochyłej względem poziomu o kąt α (rys. 44). Gdyby ciało A było swobodne, t. j. gdyby równia pochyła nie ograniczała swobody jego ruchu, spadałoby z przyśpieszeniem g; w kierunku jednak pionowym ruch unie-

*) Zgodność uderzeń kulki o deseczkę i uderzeń metronomu może być pozorną skutkiem tego, iż nie jesteśmy w stanie postrzec słuchowo niewielkich opóźnień jednego uderzenia względem drugiego.

możliwiony jest przez równię, natomiast ruch jest możliwy tylko w kierunku równi. Przyśpieszenie g, jak każdy wektor, rozłożyć możemy na dwa *składowe* przyśpieszenia — jedno w kierunku równi, drugie w kierunku prostopadłym do równi; podług wskazówek art. 32, gdzie



Rys. 44.

rozważaliśmy rozkładanie prędkości, otrzymamy dwa składowe przyśpieszenia w i w'; nas obchodzi tylko pierwsze składowe przyśpieszenie w, przypada ono bowiem w tym kierunku, w którym ruch ciała jest możliwy. Istnienie przy danem pochyleniu równi stałego przyśpieszenia w kierunku równi powoduje ruch jednostajnie przyśpieszony zsuwającego się ciała (podobnie jak przyśpieszenie g powoduje ruch jednostajnie przyśpieszony ciała, swobodnie spadającego).

Przyśpieszenie w tego ruchu po równi jest, oczywiście, mniejsze, niż g; z podobieństwa trójkątów ABC i MNL wynika

$$\frac{w}{g} = \frac{ML}{MN},$$

skąd

$$w = \frac{ML}{MN} \cdot g; \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

zatem przyśpieszenie w jest tyle razy mniejsze od g, ile razy ML jest mniejsze od MN, albo — jak się mówi — ile razy *wysokość* równi jest mniejsza od jej *długości*; im mniejsza więc będzie wysokość równi w porównaniu z długością (odpowiednio mniejsze będzie wtedy pochylenie równi, a więc kąt α), tem mniejsza będzie wartość w w porównaniu z g.

Ponieważ

$$\frac{ML}{MN} = \sin\alpha,$$

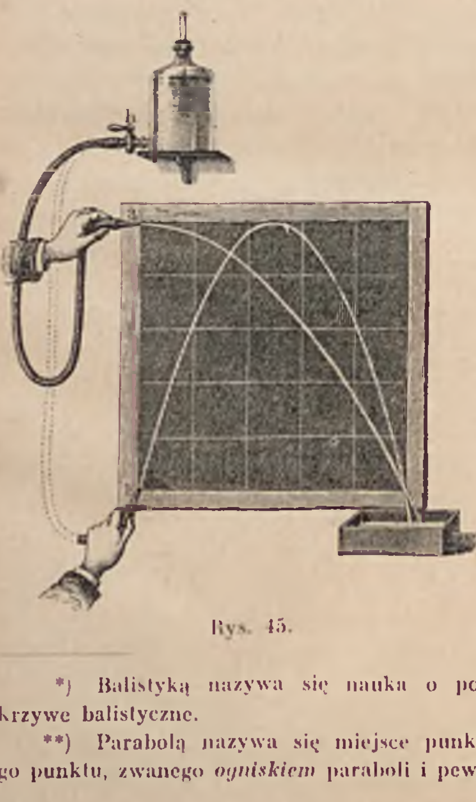
przeto

$$w = g \sin\alpha \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Czytelnik mógłby sądzić, że mierząc czas t, w którym zostaje przebyta po równi przez zsuwające się ciało droga l, daje się ze wzoru $l = \frac{wt^2}{2}$ znaleźć w, a po zmierzeniu wysokości i długości równi obliczyć według wzoru (1) g. Byłoby to jednak nieścisłe ze względu na tarcie, które pominęliśmy w rozumowaniu. To też tą drogą przyśpieszenia g nie wyznaczamy.

34. Rzut ukośny.

Jeżeli rzucamy kamień jakkolwiek ukośnie względem poziomu, torem, po którym się kamień porusza, jest pewna linja krzywa. Strumień wody, wytryskający z rury, połączonej z wodociągiem albo z odpowiednio urządzonem i umieszczonem naczyniem (rys. 45), może być uważany za szereg pocisków, rzuconych jeden za drugim w ten sam sposób i zlewających się w pewną całość. Kształt strumienia daje nam zatem wyobrażenie o kształcie torów, zakreślanych przez ciała, rzucane ukośnie względem poziomu. Krzywe te noszą nazwę *krzywych balistycznych* *); są one, zależnie od okoliczności, zbliżone mniej lub więcej do krzywej, zwanej *parabolą* **).



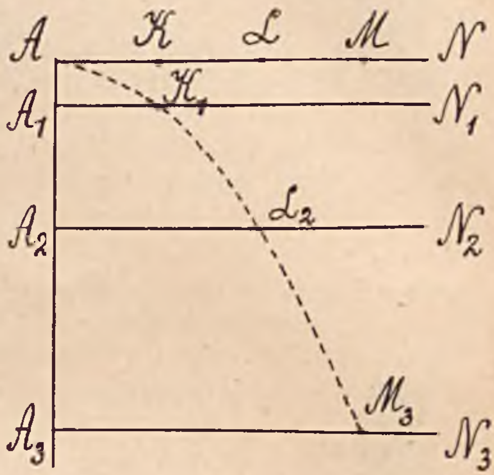
Rys. 45.

Chcąc zdać sobie sprawę z tego ruchu, przypuśćmy najpierw, iż z miejsca A (rys. 46), położonego na pewnej wysokości ponad powierzchnią ziemi, rzucamy ciało, nadając mu pewną prędkość v_0 w kierunku poziomym. Gdyby ciało rzucone nie spadało na ziemię, jak to czyni każde ciało, niczem nie podparte, poruszałoby się skutkiem bezwładności z niezmienną prędkością v_0 w nadanym kierunku po torze prostolinjowym AN (popo-

*) Balistyką nazywa się nauka o pociskach; pociski armatnie zakreślają krzywe balistyczne.

**) Parabolą nazywa się miejsce punktów jednakowo odległych od pewnego punktu, zwanego *ogniskiem* paraboli i pewnej prostej, zwanej *kierownicą*.

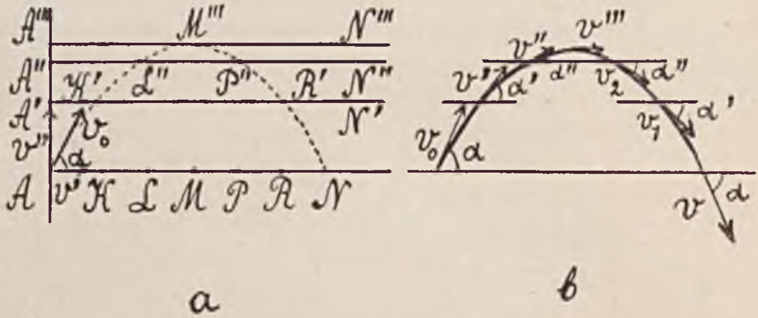
ru powietrza nie uwzględniamy dla uproszczenia zagadnienia). Z drugiej strony, gdybyśmy puścili swobodnie ciało z A, spadałoby, poruszając się po torze AB. Nadanie ciału poziomej prędkości początkowej v_0 da łącznie z nieuniknionem zjawiskiem spadania ruch wypadkowy ciała, utworzony z dwu ruchów składowych: jednostajnego w kierunku AN i jednostajnie przyśpieszonego w kierunku AB. Dla znalezienia ruchu wypadkowego możemy rozważać tę rzecz tak, jakgdyby ciało poruszało się ruchem jednostajnym po torze AN, podczas gdy sam tor opada ku ziemi ruchem jednostajnie przyśpieszonym.



Rys. 46.

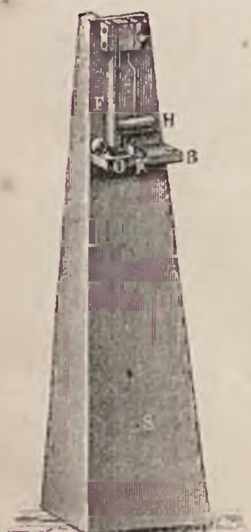
Przypuśćmy, iż w ciągu każdej z następujących po sobie jednostek czasu ciało przebywa na torze AN równe drogi AK, KL, LM..., podczas gdy w tych samych czasach tor AN, spadając, przebiega drogi AA_1, A_1A_2 ($= 3AA_1$), A_2A_3 ($= 5AA_1$)... i przyjmuje kolejno położenia A_1N_1, A_2N_2, A_3N_3... Po upływie jednostki czasu od początku ruchu ciało na torze AN znajduje się w K, ponieważ zaś w tym samym czasie tor zajmuje położenie A_1N_1, przeto rzeczywistem położeniem ciała rzuconego jest K_1; podobnie rozumiemy, iż po upływie dwu jednostek czasu od początku ruchu rzeczywistem położeniem ciała rzuconego jest L_2; po upływie 3-ch jednostek czasu — M_3 i t. d. Wyznaczając położenia ciała rzuconego dla innych jeszcze czasów i łącząc znalezione punkty linją ciągłą, otrzymamy krzywą, która jest torem poruszającego się ciała. Jak wykazuje odpowiednie rozumowanie matematyczne, krzywa ta jest w rozpatrywanym przypadku idealnym *parabolą*. W rzeczywistości opór, który ruchowi stawia powietrze, powoduje, że krzywa ta jest tylko mniej lub więcej zbliżona do paraboli.

Jeżeli prędkość początkowa, którą nadajemy ciału, tworzy z poziomem pewien kąt α, jak na rys. 47a, wówczas możemy ją rozłożyć na dwie składowe: v' w kierunku poziomym i v'' w kierunku pionowym; rola składowej prędkości poziomej v' jest tu taka sama, jak w poprzedniem zagadnieniu; prędkość pionowa v'', o ileby sama tylko była udzielona ciału, uwarunkowałaby jego wznoszenie się i następnie opadanie. Dla znalezienia toru ciała, rzuconego w ten sposób, użyjemy rozumowania takiego samego, jak wyżej, a mianowicie, że ciało porusza się ruchem jednostajnym po torze poziomym AN, przechodząc w równych czasach drogi równe AK, KL, LM..., podczas gdy sam tor,



Rys. 47.

jakgdyby rzucony do góry, wznosi się najpierw ruchem jednostajnie opóźnionym, przechodząc kolejno w tych samych czasach drogi AA', $A'A''$, $A''A'''$, potem zaś opada ruchem jednostajnie przyśpieszonym, przechodząc w takichże czasach drogi $A'''A''$, $A''A'$, $A'A$ (tor więc przyjmuje kolejno położenia: AN, $A'N'$, $A''N''$, $A'''N'''$, $A''N''$, $A'N'$, AN). Po wyjaśnieniach, danych poprzednio, rozumiemy, jak się wyznaczają kolejne położenia rzeczywiste ciała (K' L'' M''' P'' R' N) oraz jak kreśli się cały tor, którym znowu jest parabola (linja kropkowana na rysunku).



Rys. 48.

W przypadku ruchu *krzywolinjowego*, jaki rozpatrujemy obecnie, kierunek ruchu, a więc i kierunek prędkości ulega ustawicznej zmianie. Kierunek ten w poszczególnych punktach toru daje *styczna* w tym punkcie do toru. Rys. 47*b* wyobraża oddzielnie tor ciała rzuconego z zaznaczeniem prędkości ciała w poszczególnych punktach toru. W punkcie M''', który jest wierzchołkiem paraboli, a zarazem punktem zwrotnym ruchu (ciało przestaje się wznosić, a zaczyna opadać), prędkość ciała ma kierunek poziomy (rozpatrzone poprzednie zadanie, jak widzimy, odpowiada drugiej połowie rozpatrywanego teraz).

Rys. 48 przedstawia przyrząd, z którym daje się wykonać ciekawe doświadczenie, wykazujące słuszność naszego sposobu traktowania rzutu poziomego lub ukośnego. Oto przez uderzenie młotkiem H sprężyny

F nadajemy w kierunku poziomym pewną prędkość kuleczce drewnianej, spoczywającej na deseczce poziomej B; kulka ta zakreśla wtedy krzywą balistyczną; jednocześnie w chwili tego uderzenia druga taka sama kulka, leżąca obok ponad otworkiem O w deseczce B i przyciskana sprężyną F do poprzeczki K, zostaje zluźniona i poczyna swobodnie spadać z tej samej wysokości. Po chwili słyszymy jednocześnie uderzenia obu kulek o podłogę — obie zatem kulki przebywają swe drogi w równych czasach. Właśnie jest to zgodne z tem, cośmy wyżej mówili — pierwsza kulka, poruszając się w kierunku poziomym, jednocześnie spada; druga spada również; ruch obu zatem trwa dopóty, dopóki w kierunku pionowym nie przebędą tej samej drogi, równej wysokości początkowego położenia kulek nad podłogą. Prędkość, nadana pierwszej kulce w kierunku poziomym, wpływa tylko na dalekość rzutu, nie ma natomiast żadnego wpływu na spadanie.

Zadania.

9. Punkt przebywa ruchem jednostajnym drogę 42 cm w ciągu 8 sek. Znaleźć prędkość punktu w $\frac{\text{cm}}{\text{sek}}$ i $\frac{\text{m}}{\text{min}}$; napisać równanie ruchu, biorąc za punkt stały początkowe położenie punktu ruchomego na torze.

10. Pociąg przechodzi w godzinę drogę 30 Km między dwiema stacjami, na których staje. Jaka jest prędkość średnia pociągu? ile razy prędkość rzeczywista pociągu na tej drodze równać się może tej prędkości średniej?

11. Narysować wykres równania ruchu z zad. 9.

12. Na danym torze prostolinjowym poruszają się dwa punkty; równania ruchu są: $l = 12 + 8{,}5t$ oraz $l = 39 - 6t$; wyznaczyć metodą rachunkową i wykreślną, kiedy punkty się spotykają.

13. Równania ruchu dwu punktów, poruszających się na danym torze prostolinjowym, są: $l = 5 + 4t$ i $l = 2 - 6t$; czy punkty mogą się spotkać?

14. Gdybyśmy doświadczenie II, podane w art. 27, wykonali, kładąc krążek metalowy na papierowym, postąpilibyśmy niewłaściwie. Dlaczego?

15. Punkt porusza się po torze prostolinjowym w ten sposób, iż w czasie równym 1, 2, 3, 4, 5, 6, i t. d. jedn. czasu przypada odpowiednio w odległości $^1/_8$, $^1/_2$, $4^1/_8$, 2, $3^1/_8$, $4^1/_2$ i t. d. jedn. długości od stałego punktu na torze. Jaki jest ruch punktu?

16. Rzucamy ciało z wysokości 40 m ponad ziemią, nadając mu prędkość 14 $\frac{\text{m}}{\text{sek}}$, skierowaną pionowo wdół; ułożyć równanie ruchu i znaleźć, w jakim czasie ciało doleci do ziemi? opór powietrza zaniedbujemy oraz zakładamy $g = 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$.

17. Ułożyć równanie ruchu ciała, rzuconego pionowo do góry z prędkością początkową 15 $\frac{\text{m}}{\text{sek}}$ $\left(g = 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}\right)$.

18. Jaką prędkość nadać trzeba ciału, rzuconemu pionowo do góry, by się wzniosło do wysokości 32 m, jeżeli opór powietrza zaniedbujemy, zaś $g = 981 \frac{cm}{sek^2}$?

19. Rozłożyć wektor (prędkość) na dwa składowe, z których jeden jest dwa razy większy od drugiego.

20. Jak mogą być skierowane cztery równej wielkości wektory, by ich suma geometryczna równała się zeru? ile mamy możliwych rozwiązań tego zadania?

21. Jaką prędkość nadać należy kuli, by się mogła wtoczyć w górę na sam szczyt po równi pochyłej, nachylonej pod kątem 30^0 względem poziomu, przebiegając drogę 120 cm? ($g = 981 \frac{cm}{sek^2}$; tarcie zaniedbujemy).

22. Dwa pociągi mijają się, biegnąc po torach równoległych; jeden idzie z prędkością $30 \frac{Km}{godz}$, drugi z prędkością $45 \frac{Km}{godz}$; z jaką prędkością poruszają się pociągi jeden względem drugiego, jeżeli podążają oba w jedną stronę, oraz w strony przeciwne?

23. Dwa pociągi, z których każdy ma długość 72 m, idą z jednakową prędkością po torach równoległych w kierunkach przeciwnych i mijają się w ciągu 7 sek. Jaka jest prędkość pociągów?

24. Człowiek idzie po pokładzie statku z prędkością $90 \frac{cm}{sek}$, kierując się ku północy; statek unoszony jest przez prąd wody z prędkością $8 \frac{Km}{godz}$ w kierunku południowo-wschodnim pod kątem 10^0 względem południa, przez wiatr zaś z prędkością $10 \frac{Km}{godz}$ w kierunku południowym; motor nadaje statkowi prędkość $15 \frac{Km}{godz}$ w stronę północno-zachodnią pod kątem 40^0 względem północy. Jaka jest prędkość wypadkowa podróżnego względem brzegów?

Rozdział II. O sile.

35. Newtona zasady ruchu. Pojęcie siły.

Pojęcie siły obce nam nie jest; nasuwa nam je świadomość pewnych naszych stanów mięśniowych. Gdy jednak chcemy posługiwać się pojęciem siły w nauce ścisłej, jaką jest nauka fizyki, winniśmy je powiązać z innemi pojęciami, usuwając możliwość wszelkich nieporozumień.

Takie dokładne omówienie pojęcia siły znajdujemy w tak zw. trzech zasadach ruchu, które autor ich — Newton, wielki uczony angielski, o którym już wspominaliśmy, nazwał „aksjomatami albo prawami ruchu" („axiomata sive leges motus").

Zasada 1. Każde ciało pozostaje w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym po linji prostej, o ile nie pozostaje pod działaniem siły.

Zasadę tę moglibyśmy nazwać *zasadą bezwładności*: wyraża ona w krótkości to, cośmy powiedzieli o bezwładności w art. 7 (Część I). W powyższej formule dostrzec możemy jednak coś więcej. Wydaje się nam oczywistem, że, o ile ciało jest zupełnie pozostawione sobie, o ile nie podlega żadnym działaniom, nie może też zajść żadna zmiana w jego ruchu — porusza się więc wciąż z tą samą prędkością w tym samym kierunku, w przypadku zaś szczególnym, gdy prędkość ta jest równa zeru, pozostaje w spoczynku. Lecz przypuśćmy, iż ciało, które pozostawało w spoczynku, zaczyna się poruszać; albo ciało, które poruszało się z określoną prędkością, zaczyna poruszać się prędzej lub wolniej, lub też zmienia kierunek ruchu, słowem, zachodzi *zmiana* w ruchu ciała, a oglądamy się wówczas za czemś, czemubyśmy mogli tę zmianę przypisać. I zauważmy sobie, że dopóki wogóle w czemkolwiek nie dostrzegamy żadnej zmiany, nie budzi się w nas pytanie „dlaczego?"; pytanie to jednak nasuwa się nam natychmiast, gdy taką zmianę stwierdzamy.

Idziemy jednak dalej. Zmiana, która może zajść w ruchu ciała, polega albo na tem, że ciało zaczyna posiadać pewną prędkość, gdy początkowo jej nie miało, czyli początkowa prędkość, równa zeru, otrzymuje pewien przyrost; albo że prędkość ciała staje się większa lub mniejsza, czyli że znowu prędkość otrzymuje pewien przyrost (dodatni lub ujemny); albo że oprócz zmiany wartości, lub bez tej zmiany kierunek prędkości ulega zmianie, co znowu zgodnie z art. 30 i 31 świadczy, że zachodzi przyrost geometryczny prędkości. Słowem, zmianę w ruchu danego ciała tworzy *taki czy inny przyrost jego prędkości*, zachodzący, oczywiście, w tym czy innym czasie; skoro zaś tak jest, to *ruch odbywa się z pewnem przyśpieszeniem.*

Oto więc do jakiego wniosku dochodzimy: *dopóki na ciało nie działa żadna siła, w ruchu ciała niema przyśpieszenia (prędkość ciała jest stała, w szczególności zero); gdy jednak ruch ciała zachodzi z przyśpieszeniem, powiadamy, iż na ciało działa siła, nadająca mu to przyśpieszenie;* widzimy zatem, że *pojęcie przyśpieszenia wiąże się nierozerwalnie z pojęciem siły.*

Zasada II. Przyjmujemy, iż dwie równe siły, działające na dwie równe masy, nadają tym masom równe przyśpieszenia. Natomiast, gdy dwie różne masy poruszają się z równemi przyśpieszeniami, nie uważamy, iż dzieje się to pod działaniem sił równych; przeciwnie powiadamy, iż w tym razie na większą masę działa większa siła, a — co więcej — uważamy, iż siła ta jest tyle razy większa, ile razy większa jest masa. Słowem, gdy różne masy poruszają się z równemi przyśpieszeniami, przyjmujemy, iż dzieje się to pod działaniem sił proporcjonalnych do tych mas.

Przypuśćmy dalej, że dwie równe masy poruszają się z przyśpieszeniami różnemi. Czy będziemy mogli powiedzieć, iż dzieje się to pod działaniem sił równych? Nie. Idąc drogą najprostszą w rozumowaniu, powiemy, iż na tę masę, która posiada większe przyśpieszenie, działa siła większa, a — co więcej — tyle razy większa, ile razy większe jest nadawane przez nią przyśpieszenie. Słowem, gdy dwie równe masy poruszają się z różnemi przyśpieszeniami, przyjmujemy, iż dzieje się to pod działaniem sił, proporcjonalnych do tych przyśpieszeń.

Ze wszystkiego tego wynika, iż, jeżeli siła f nadaje masie m przyśpieszenie w, to wielkość tej siły uważamy za proporcjonalną zarówno do masy m, na którą siła działa, jak do przyśpieszenia w, które ona tej masie nadaje (im większa jest masa, oraz im większe jest nadawane jej przyśpieszenie, tem większa jest działająca siła). Proporcjonalność tę wyrażamy wzorem

$$f = kmw, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

gdzie k jest spółczynnikiem proporcjonalności.

Posługując się ustalonemi już jednostkami masy i przyśpieszenia, *umówmy się za jednostkę siły uważać taką siłę, która jednostce masy nadaje jednostkę przyśpieszenia.* Zakładając, że f, m i w równają się odpowiednio jednostkom, otrzymamy ze wzoru (1)

$$1 = k \cdot 1 \cdot 1,$$

czyli przy powyższem określeniu jednostki siły spółczynnik proporcjonalności k równa się jedynce ($k = 1$), a więc zamiast wzoru (1) otrzymujemy

$$f = mw, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

co mówi, iż przy tak obranej jednostce *siła mierzy się iloczynem z masy przez przyśpieszenie, które ona tej masie nadaje.*

Za jednostkę masy obraliśmy *gr*, za jednostkę przyśpieszenia $\frac{cm}{sek^2}$. *Jednostkę siły, która masie jednego grama nadaje przyśpieszenie jednego centymetra na sekundę do kwadratu, nazywamy dyną:*

$$Dyna = 1\ gr \cdot 1\ \frac{cm}{sek^2} = 1\ \frac{gr \cdot cm}{sek^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Obliczmy dla przykładu, jaka jest wartość siły, nadającej masie 20 gr przyśpieszenie 15 $\frac{\mathrm{cm}}{\mathrm{sek}^2}$; piszemy zgodnie ze wzorem (2)

$$f = 20\ \mathrm{gr} \cdot 15\ \frac{\mathrm{cm}}{\mathrm{sek}^2} = 300\ \frac{\mathrm{gr} \cdot \mathrm{cm}}{\mathrm{sek}^2} = 300\ \mathrm{dyn}.$$

W dynie poznajemy nową jednostkę pochodną, zależną od wszystkich trzech jednostek zasadniczych. Po wyjaśnieniach, danych już kilkakrotnie o wymiarach, powinno być zrozumiale, iż wymiarem siły jest w przyjętym przez nas układzie bezwzględnym

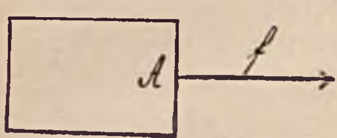
$$\left[\frac{ML}{T^2}\right], \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

czemu w układzie *CGS* odpowiada

$$\left[\frac{gr \cdot cm}{sek^2}\right] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Z pojęciem siły wiąże się nierozerwalnie pojęcie kierunku, w którym ona działa; za kierunek ten uważamy kierunek nadawanego przez siłę przyśpieszenia. *Siła* zatem *jest wielkością kierunkową, wektorem*. Możemy więc siły przedstawiać w znany sposób przy pomocy odcinków prostych.

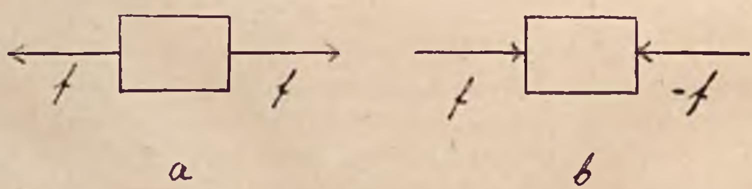
O sile, działającej na ciało, mówimy zawsze, iż posiada ona określone miejsce działania: ten czy inny punkt ciała, taką czy inną część powierzchni ciała. Gdy np. popychamy ciało palcem, miejscem działania siły jest powierzchnia zetknięcia się palca z ciałem; gdy ciągniemy ciało przy pomocy sznura, miejscem działania jest odpowiednio część powierzchni ciała, pozostająca w połączeniu ze sznurem. W rozumowaniach naszych często dla uproszczenia zakładamy, iż miejscem działania siły jest jeden punkt danego ciała, jakkolwiek świadomi jesteśmy, iż chodzi tu jedynie o matematyczne ujęcie; np. w przytoczonym przykładzie ciągnienia ciała przy pomocy sznura mówimy krótko, iż siła f działa na ciało w punkcie A i rysujemy to, jak na rys. 49.



Rys. 49.

Jeżeli siła jest wielkością kierunkową, możemy stosować do sił te działania geometryczne, którym podlegają wogóle wektory: możemy siły dodawać geometrycznie, szukając wypadkowej siły dwu lub kilku składowych, możemy je odejmować geometrycznie, rozkładać.

O dodawaniu sił oraz ich rozkładaniu mówić będziemy niżej; tutaj zatrzymamy się chwilę na przykładzie szczególnym. Przypuśćmy, iż na ciało działają (rys. 50) dwie siły równe i skierowane w strony wręcz przeciwne. Jakie jest działanie wypadkowe tych dwu sił? Odpowiemy odrazu, że siły te zmiany ruchu ciała, jako całości, nie powodują, że się te siły *równoważą*: wszak jedna siła nadaje ciału przyśpieszenie w jedną stronę, podczas gdy druga nadaje przyśpieszenie tej samej wielkości w stronę wręcz przeciwną, — wypadkowe więc przyśpieszenie = 0. Czy wynika z tego, iż działanie sił jest żadne? Bynajmniej; powiemy, iż ciało zostaje rozciągnięte (rys. 50a) albo zgniecione (rys. 50b), poszczególne jego części zmieniają położenie względem siebie, albo, jak się mówi, ciało zostaje *odkształcone*. Jeżeli zatem na ciało



Rys. 50.

działa jedna siła, objawem tego działania jest jedynie przyśpieszenie; gdy natomiast sił, działających na dane ciało, jest więcej niż jedna, objawem tego działania bywa albo wypadkowe przyśpieszenie, albo odkształcenie ciała.

We wzorze (2) zawarta jest treść drugiej zasady Newtona, podającej nam sposób mierzenia sił. W dosłownem brzmieniu zasada ta jest następująca:

Zmiana ruchu jest proporcjonalna do siły poruszającej i zachodzi w kierunku działania siły.

Wzór (2) z łatwością przekształcić możemy na inny, odpowiadający oryginalnej formule Newtona, a przytem z pewnych jeszcze względów zasługujący na poznanie.

Przypuśćmy, iż pod działaniem siły f zachodzi w czasie t zmiana prędkości z wartości v_1 na wartość v_2 (bez zmiany kierunku); zatem przyrost prędkości w podanym czasie wynosi $v_2 - v_1$, a przyśpieszenie zgodnie z określeniem

$$w = \frac{v_2 - v_1}{t};$$

podstawmy na w do wzoru (2) tę wartość; otrzymamy

$$f = m\,\frac{v_2 - v_1}{t},$$

skąd

$$ft = mv_2 - mv_1. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Iloczyn z masy przez jej prędkość nazywamy *pędem* tej masy; iloczyn z siły przez czas jej działania nazywamy *popędem* siły. Wzór (6) odczytujemy w następujący sposób: *popęd siły równa się przyrostowi pędu tej masy, na którą siła działa.* Iloczyn dwu czynników może pozostawać niezmienny, gdy czynniki te ulegają zmianom — trzeba tylko, by jeden z czynników w tym samym stosunku wzrastał, w jakim drugi się zmniejsza. Iloczyn ft pozostanie ten sam, jeżeli siła będzie dwa razy większa, ale czas działania jej dwa razy mniejszy, albo siła będzie sto razy mniejsza, lecz czas działania jej odpowiednio sto razy większy. Widzimy więc, że jedna i ta sama zmiana pędu masy może zajść pod działaniem różnych sił, czynnych w różnych odpowiednio czasach.

Jeżeli „zmianę ruchu“ danej masy będziemy rozumieli jako zmianę pędu tej masy, to wzór (6) mówi właśnie, iż zmiana ruchu (w pewnym określonym czasie) jest proporcjonalna do siły działającej, co właśnie wyraża oryginalna formuła Newtona.

D o ś w i a d c z e n i e. Do kuli żelaznej przymocowujemy cienką nitkę; kładziemy kulę na stole, drugi koniec nitki trzymamy w ręku (po paru próbach nitkę zawsze dobierzemy tak, by odpowiadała celowi); powolnym ruchem unieść możemy na tej nitce uwiązaną kulę; jeżeli jednak, gdy kula spoczywa na stole, zechcemy unieść kulę ruchem gwałtownym, nitka się urwię, a kula nie ruszy się nawet z miejsca. Pragnąc w tym drugim przypadku zmienić pęd kuli w krótkim względnie czasie, winniśmy użyć odpowiednio większej siły; uciekając się jednak do pośrednictwa nitki dla przeniesienia działania naszych mięśni, nie możemy tego uczynić dla każdej wartości siły, stawia temu bowiem kres wytrzymałość nitki.

Zasada III. K a ż d e m u d z i a ł a n i u t o w a r z y s z y z a w s z e r ó w n e, w s t r o n ę w r ę c z p r z e c i w n ą s k i e r o w a n e p r z e c i w d z i a ł a n i e.

Gdy ciśniemy ręką o ścianę, ręka nasza doznaje takiego samego ciśnienia ze strony ściany; gdy rurka kauczukowa, rozciągnięta przez dwie osoby, ciągnie pierwszą z tych osób ku drugiej, ciągnie również taką samą siłą drugą osobę ku pierwszej; gdy, rozpatrując zjawisko spadania kamienia na ziemię, mówimy, że „ziemia przyciąga kamień“, winniśmy uzupełnić to przez powiedzenie, iż „i kamień siłą równą przyciąga ziemię“, czyli, że ciała te „przyciągają się nawzajem“ i t. d.

Zastanówmy się nad tem, jakie jest właściwe znaczenie tej trzeciej zasady; w czem ona uzupełnia to, co zawarte jest w dwu pierwszych zasadach?

A więc, zasada pierwsza informuje nas o tem, co świadczy niewątpliwie o działaniu siły na dane ciało: świadectwem tem jest przyśpieszenie — jeżeli ruch danego ciała zachodzi z przyśpieszeniem, ciało to podlega działaniu siły (twierdzenia tego odwrócić nie można: nie możemy powiedzieć, że skoro niema przyśpieszenia, niema też działania sił; gdy bowiem ciało podlega działaniu więcej niż jednej siły, może nie być przyśpieszenia — p. np. rys. 50).

Druga zasada poucza nas, jak możemy siłę zmierzyć: mierzymy ją iloczynem z masy, na którą siła działa, przez nadawane tej masie przyśpieszenie; kierunek siły dany jest przez kierunek przyśpieszenia.

Co nam daje zasada trzecia? A oto informuje nas ona o *źródle* działającej siły. Wystawmy sobie, że dane ciało jest jednem, jedynem we wszechświecie; czy moglibyśmy wówczas wyobrazić sobie, że *coś* działa na to ciało? Byłoby to niemożliwe. Jeżeli jednak oprócz danego ciała jest jeszcze choć jedno, sprawa zmienia postać: powiemy, iż źródłem działania na nasze ciało jest właśnie tamto drugie, które — przypuśćmy — przyciąga je lub odpycha. Słowem, gotowi jesteśmy uważać za całkiem zrozumiałe, iż źródłem działania na dane ciało może być tylko inne ciało, jakkolwiek istoty tego działania możemy nie znać. Co więcej, nie możemy tego rozumieć inaczej, jak tylko tak, że ciała te działają nawzajem na siebie — czyli, skoro na pierwsze ciało działa pewna siła, uwarunkowana przez drugie ciało, to na drugie ciało działa tej samej wartości w stronę wręcz przeciwną skierowana siła, uwarunkowana przez ciało pierwsze.

36. Siła ciężkości.

Ciało, swobodnie spadające, porusza się z przyśpieszeniem g; przypisujemy to działaniu *siły ciężkości*. Siła ciężkości, działająca na dane ciało, albo — krócej — *ciężar* danego ciała mierzy się, oczywiście, w jednostkach siły, t. j. w dynach (podobnie jak długość mierzy się w jednostkach długości, masa w jednostkach masy, powierzchnia w jednostkach powierzchni i t. d.).

Przypuśćmy, iż w danem miejscu przyśpieszenie $g = 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$; ile wynosi w tem miejscu ciężar ciała o masie 25 gr, t. j. siła, nadająca masie 25 gr przyśpieszenie $981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$? Zgodnie z zasadniczym wzorem (2) art. 35 ($f = mw$) piszemy

$$f = 25 \text{ gr} \,.\, 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2} = 24525 \frac{\text{gr}\,.\,\text{cm}}{\text{sek}^2} = 24525 \text{ dyn.}$$

Ciężar tego samego ciała jest inny w innem miejscu, gdzie przyśpieszenie ciał swobodnie spadających ma inną wartość, np. $g = 980{,}2 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$; odpowiednio znajdziemy

$$f' = 25 \text{ gr} \,.\, 980{,}2 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2} = 24505 \frac{\text{gr}\,.\,\text{cm}}{\text{sek}^2} = 24505 \text{ dyn.}$$

Znajdźmy, czemu się równa ciężar 1 grama oraz ciężar 1 mg w tem miejscu, gdzie $g = 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$; oczywiście, tam

$$\text{ciężar 1 grama} = 1 \text{ gr} \,.\, 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2} = 981 \text{ dyn,}$$

$$\text{ciężar 1 mg} = 0{,}001 \text{ gr} \,.\, 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2} = 0{,}981 \text{ dyn.}$$

Pozwala to nam zdać sobie sprawę z wielkości obranej przez nas za jednostkę siły: dyna jest $\frac{1}{981}$ ciężaru jednego grama w tem miejscu, gdzie $g = 981 \frac{cm}{sek^2}$; ciężar zaś 1 miligrama w tem miejscu, jak widzimy, wynosi cokolwiek mniej niż 1 dynę. Możemy więc spamiętać sobie, iż dyna jest siłą cokolwiek większą od ciężaru jednego miligrama. Jest to więc jednostka mała, a ponieważ wypada nam nieraz mierzyć siły znacznej wielkości, więc dla uniknięcia zbyt wielkich liczb, posługujemy się czasem jednostką większą, t. zw. *megadyną:*

$$\text{megadyna} = 10^6 \text{ dyn.} \qquad (1)$$

Wogóle więc ciężar jakiejkolwiek masy m w tem miejscu, gdzie przyśpieszenie ciał swobodnie spadających jest g, wynosi

$$f = mg; \qquad (2)$$

w przypadkach poszczególnych należy podstawić na m i g ich wartości.

Doświadczenie uczy nas, jak już wiemy (art. 27), że w danem miejscu, o ile usuniemy zakłócający wpływ powietrza, wszystkie ciała spadają jednakowo, t. j. z tem samem przyśpieszeniem. Zatem ciężary różnych ciał *w danem miejscu* pozostają do siebie w tym samym stosunku, co ich masy: masom 2, 3 i t. d. razy większym siły 2, 3 i t. d. razy większe nadają to samo przyśpieszenie. Natomiast w różnych miejscach ziemi ciężar jednego i tego samego ciała jest naogół różny. Dla przykładu podajemy, ile wynosi ciężar 1 grama w różnych miejscach ziemi:

Greenwich . .	981.26 dyn.	Paryż	980.96 dyn.
Kamieniec Pod.	980.88 „	Warszawa . .	981.22 „
Kraków . . .	981.07 „	Wiedeń . . .	980.88 „
Lwów	980.93 „	Wilno	981.44 „

O tem, w jaki sposób tłumaczymy sobie tę różnicę ciężarów jednego i tego samego ciała w różnych miejscach, a więc różne wartości przyśpieszenia g w tych miejscach, mówić narazie nie będziemy.

37. Dynamometr. Waga sprężynowa.

Zawieśmy na sprężynie ciało (rys. 51); pod działaniem ciężaru ciała sprężyna się wydłuży. Zawieśmy na tej samej sprężynie inne ciało o innej masie; jeżeli masa ta będzie większa od masy pierwszego ciała, to i ciężar jej będzie w danem miejscu w tym samym stosunku większy — wydłużenie sprężyny będzie większe. Po zdjęciu zawieszonego ciała sprężyna powróci do swej pierwotnej długości (o ile wydłużenie sprężyny nie było zbyt wielkie; w przeciwnym bowiem razie po usunięciu ciała sprężyna pozostanie nieco wydłużona i powoli wracać będzie do długości początkowej).

Rys. 51.

Zamiast rozciągać sprężynę, możemy ją uciskać, powodując tem „skrócenie“ w miejsce „wydłużenia“ (rys. 52). Przytwierdźmy, jak to widać na rysunkach, do ruchomych końców sprężyn wskazówki, któreby się mogły przesuwać wzdłuż podziałki; pozwoli to nam zaznaczać dogodnie odkształcenia sprężyny. Taka jest właśnie budowa dynamometrów i wag sprężynowych.

Zawieśmy na sporządzonym tak przyrządzie ciało o znanej masie m; ciężar tego ciała wynosi mg (jeżeli $m = 15$ gr, w danem zaś miejscu, np. w Warszawie, $g = 981{,}2 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$, to $mg = 14718$ dyn); zanotujmy podziałkę, na której zatrzymuje się wtedy wskazówka. Zawieśmy inne ciało o znanej masie m_1; ciężar tego ciała jest m_1g (jeżeli $m_1 = 25$ gr, to $m_1g = 24530$ dyn); zanotujmy znowu podziałkę, na której zatrzymuje się wskazówka. Postępując tak dalej, cechujemy nasz przyrząd, t. j. wyznaczamy wartości sił, odpowiadające przesunięciom wskazówki do tej czy innej podziałki; wycechowany przyrząd taki służyć może do mierzenia sił i nazywa się *dynamometrem* (δύναμις — czyt. dunamis — „siła“ po grecku).

Rys. 52.

Na podziałce wag sprężynowych odczytujemy kilogramy oraz ułamki kilograma. Po wyjaśnieniach, danych już poprzednio, czytelnik powinien rozumieć, jaka jest właściwie rola tych wag sprężynowych. Przypuśćmy, iż cechować będziemy dynamometr, zawieszając na nim 1 Kg, 2 Kg, 3 Kg i t. d. i znacząc temi znakami (1, 2...) odpowiednie podziałki, przy których przytem będzie się zatrzymywać wskazówka. Jeżeli po wycechowaniu zawiesimy na dynamometrze ciało o nieznanej masie i np. wywoła ono takie wydłużenie, iż wskazówka pokaże nam „2“, powiemy, iż ciężar tego ciała jest taki sam, jak ciężar dwu kilogramów w tem miejscu, a ponieważ w tem samem miejscu ciężary ciał są proporcjonalne do ich mas, przeto i nieznana masa tego ciała równa się dwu kilogramom. Przypuśćmy jednak, że wycechowany w ten sposób dynamometr przewieziemy do innego miejsca, gdzie g jest inne, a więc i ciężar dwu kilogramów jest inny niż w pierwszem miejscu. Czy ciało o masie dwu kilogramów wywoła tam takie samo wydłużenie sprężyny i wskazówka znów nam pokaże „2“? W żadnym razie — zależnie od tego, czy g jest tam większe, czy mniejsze niż w pierwszem miejscu, wskazówka wykaże więcej lub mniej niż dwa — wyciągniemy zatem błędny wniosek co do masy ciała zawieszonego. Posługiwanie się przeto wagą sprężynową do wyznaczania mas z bezpośredniego odczytywania skali możliwe jest tylko w tem miejscu, gdzie waga została wycechowana, oraz w tych miejscach, co do których wiemy, że g jest takie samo.

Oczywiście, można uniknąć tego źródła błędu i wyznaczyć szukaną masę z pomocą wagi sprężynowej, posługując się przytem odważnikami. Zawieśmy ciało o nieznanej masie i zanotujmy, do której podziałki przesuwa się wskazówka. Zawieszajmy następnie na tej samej wadze odważniki dopóty, dopóki wskazówka znów nie stanie na tem samem miejscu. Teraz mamy prawo rozumować w następujący sposób: skoro wydłużenia sprężyny są jednakowe, przeto i siły, powodujące te wydłużenia, są równe, a więc ciężar danego ciała jest równy ciężarowi zawieszonych odważników; ponieważ jednak w tem samem miejscu ciężar każdego ciała jest proporcjonalny do jego masy, przeto i masa danego ciała równa się masie tych odważników, a więc wynosi tyle gramów, ile wskazują odważniki. Podkreślamy z naciskiem, że takie *porównanie z odważnikami pozwala nam tylko wyznaczyć masę danego ciała, nie dając żadnej wskazówki co do jego ciężaru; do znajomości bowiem ciężaru niezbędna jest znajomość g.*

Gdybyśmy chcieli posługiwać się wagą sprężynową jako dynamometrem, powinnibyśmy byli dokonany pomiar formułować w następujących słowach: „zmierzona siła równa się ciężarowi tylu a tylu kilogramów (odczytujemy to na skali) w tem miejscu, gdzie dynamometr został sporządzony“. Rozumiemy tedy, jak mało warte jest z punktu widzenia wymagań ścisłości takie cechowanie dynamometrów. Natomiast dynamometr, wycechowany tak, jak opisaliśmy wyżej, w dynach lub megadynach, znajdzie wszędzie jednakowe zastosowanie, podając odrazu zmierzoną siłę we właściwych jednostkach.

38. Składanie i rozkładanie sił. Równowaga sił.

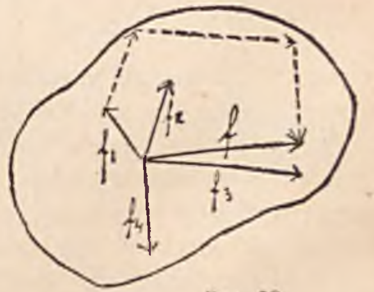
Na niezbyt szerokich rzekach często dokonywa się holowania naładowanych łodzi w ten sposób, iż do łodzi przywiązuje się dwa sznury, z których jeden ciągnie człowiek, idący jednym brzegiem, drugi zaś — człowiek, idący brzegiem drugim. Łódź nie porusza się ani w kierunku jednej z działających na nią sił, ani w kierunku drugiej, tylko w pewnym kierunku *wypadkowym* wzdłuż rzeki. Dwie siły działają tu razem tak, jakby działała jedna — ich *wypadkowa*.

Doświadczenie I. Uwiązawszy do nóżki stołu lub krzesła dwa sznury lub więcej i ciągnąc jednocześnie za każdy określoną siłą w kierunku poziomym tak, by tworzyły ze sobą pewien kąt, względnie kąty, łatwo możecie sprawdzić otrzymanie działania *wypadkowego* kilku naraz działających na ciało sił.

Dając określenie siły w art. 35, podkreśliliśmy, iż jest ona wielkością kierunkową czyli wektorem, że zatem siły można składać i rozkładać, podobnie jak inne wektory, np. prędkości.

Odwołując się do wskazań art. 30 i 31, powiemy, iż w przypadku działania na ciało w jednym punkcie dwu sił, znaleźć można wypadkową, wykreślając te siły jako odcinki odpowiedniej długości i odpowiedniego kierunku i szukając czy to przekątnej równoległoboku, zbudowanego na tych odcinkach, czy to zamykającego boku trójkąta, którego dwa boki tworzą te odcinki. W przypadku większej liczby sił, działających na ciało w jednym jego punkcie, szukalibyśmy wypadkowej, jako zamykającego boku zbudowanego na wyobrażających te siły odcinkach wielokąta (rys. 53; siła f jest tam wypadkową czterech sił f_1, f_2, f_3, f_4).

W przypadku, gdy wypadkowa siła równa się zeru, powiadamy, że działające na ciało siły *równoważą się* — nie nadają one wówczas ciału przyśpieszenia. Przypadek takiej równowagi mamy w doświadczeniu z przyrządem następującym.



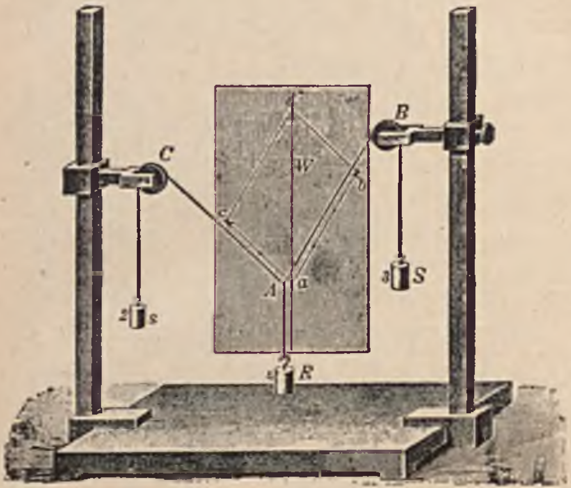
Rys. 53.

Doświadczenie II. Ciężary ciał s i S (rys. 54), zawieszonych na nitkach, które przechodzą przez bloczki, mają się do siebie, jak 2 : 3; odpowiednio odcinki ac i ab, wyobrażające te siły na przystawionym kawałku tektury, pozostają w tym samym stosunku. Przekątna ad wyobraża wypadkową tych dwu sił. Działanie jej równoważy ciężar ciała R, który odpowiednio oznaczony jest liczbą 4*).

*) W doświadczeniu tem, jak również w następnych ćwiczeniach, należy używać odważników większych; na bloczkach nie unikniemy nigdy tarcia, które zakłóca zjawisko (przesuńmy nieco sznurki przez delikatne pociągnięcie któregokolwiek ciężarka, gdy się już ustali równowaga, a stwierdzimy znowu równowagę, jakkolwiek winno już jej nie być); im większe siły wchodzą tu w grę, tem mniejszy jest ów zakłócający wpływ tarcia.

Ćwiczenie 16. Wykreślcie na tekturze dowolny równoległobok i poprowadźcie przekątną. Na sznurkach przyrządu, jak w doświadczeniu powyższem (rys. 54), zawieście odważniki o masach, a zatem i ciężarach, proporcjonalnych do długości przekątnej i boków. Sprawdźcie, czy po ustaleniu równowagi wykreślony na tekturze równoległobok bokami swemi i przekątną schodzi się z kierunkami sił składowych i wypadkowej.

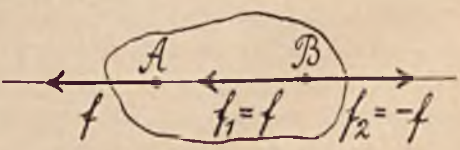
Ćwiczenie 17. Powtórzcie ćwiczenie poprzednie z tą różnicą, iż dane będą zgóry wartości dwu składowych i kąt między niemi; albo dane będą siła wypadkowa, jedna ze składowych oraz kąt między niemi; albo dane będą siła wypadkowa oraz kąty, które tworzy jej kierunek z kierunkami składowych.



Rys. 54.

W przypadku działania na ciało kilku sił w różnych jego punktach, a przytem, gdy ciało możemy uważać za t. zw. *doskonale sztywne* t. j. nie poddające się żadnym odkształceniom, jak: rozciąganie, zgniatanie, zginanie i t. p. (takich ciał w rzeczywistości nie znamy; chodzić może jedynie o pewne przybliżenie), wprowadzamy twierdzenie pomocnicze, że *miejsce działania siły w ciele doskonale sztywnem można przenieść dowolnie w kierunku tego działania bez żadnej zmiany działania.*

Przypuśćmy, iż na ciało doskonale sztywne działa w punkcie A siła f (rys. 55); wyobraźmy sobie, że punkt B, leżący na prostej, wyznaczającej kierunek siły f, stał się miejscem działania dwu sił f_1 i f_2, z których wartość każdej równa się wartości f, oraz z których f_1 działa w kierunku, zgodnym z kierunkiem siły f, f_2 zaś działa w stronę wręcz przeciwną. Dodanie sił f_1 i f_2 w niczem nie zmieni ruchu ciała, ponieważ siły te, jako równe i w strony wręcz przeciwne skierowane, będą znosiły nawzajem swe działania, albo — jak mówią — będą się równoważyły; pozostanie więc tylko działanie siły f. Lecz na trzy siły f, f_1 i f_2 można spojrzeć jeszcze inaczej: można mianowicie uważać, że to siły f i f_2 równoważą się, nie dając żadnej zmia-

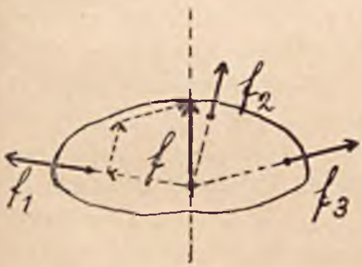


Rys. 55.

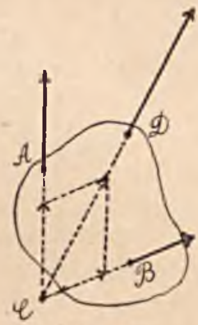
ny w ruchu ciała (odkształcać ciała nie mogą wobec założenia, iż jest ono doskonale sztywne), zmiany zaś ruchu powoduje tylko działanie siły f_1. Możemy więc albo odrzucić jako nie mające żadnego wpływu na ruch siły f_1 i f_2 i pozostanie tylko siła f, albo odrzucić jako nie mające wpływu siły f i f_2, a pozostanie siła f_1, równa sile f, o innem miejscu działania, leżącem wszakże na kierunku siły f. Uzasadnia to w zupełności wypowiedziane twierdzenie.

Opierając się na niem, rozpatrzyć możemy przypadek, gdy na ciało doskonale sztywne w różnych jego punktach działa kilka sił, których kierunki przecinają się w jednym punkcie (siły f_1, f_2, f_3 na rys. 56). Przenosimy miejsca działań wszystkich sił w ów punkt przecięcia i znajdujemy, jak wyżej, wypadkową. Za miejsce działania wypadkowej obrać możemy którykolwiek punkt ciała, leżący na prostej, wyznaczającej kierunek tej wypadkowej.

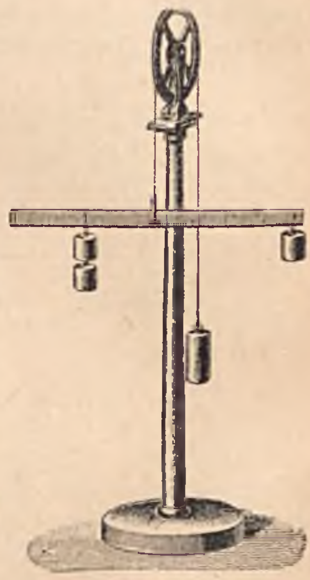
Zdarzyć się może, iż punkt przecięcia sił, działających na ciało, leży poza granicami ciała; możemy pomimo to przenieść w ten punkt miejsca działań wszystkich sił, *jakgdyby* ten punkt wiązał się jakoś z ciałem — czynność ta będzie miała znaczenie wyłącznie matematyczne; po znalezieniu wypadkowej, możemy przenieść jej miejsce działania w którykolwiek punkt wewnątrz ciała na prostej, wyznaczającej jej kierunek. Przypadek ten mamy na rys. 57, gdzie za miejsce działania wypadkowej f dwu sił składowych, których miejscami działania są punkty A i B, uważamy dowolny punkt D, leżący na prostej CD, która wyznacza kierunek wypadkowej.



Rys. 56.

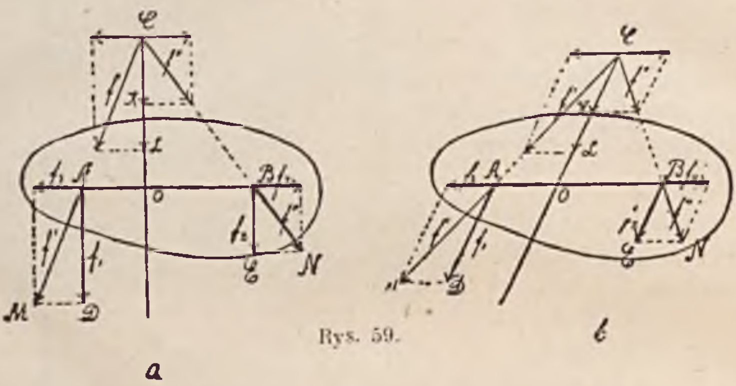


Rys. 57.


Rys. 58.

D o ś w i a d c z e n i e III. Na drążku, który osadzony jest na osi, przechodzącej przez jego środek, i który, jak każde ciało, podlega działaniu siły ciężkości, zawieszamy dwa ciała o różnej masie, a więc różnym ciężarze, z obu stron jego środka, w odległości, dobranej tak, by drążek pozostawał poziomy (rys. 58). Ciężar odpowiednio dobranego ciała za pośrednictwem sznura, na którym jest zawieszone, działa na drążek w kierunku pionowym do góry i równoważy zarówno ciężar drążka jak działanie tamtych sił *równoległych* i skierowanych pionowo na dół. Część siły, działającej tu pionowo do góry, równa jest, będąc wręcz przeciwnie skierowaną, wypadkowej sił równoległych, skierowanych pionowo na dół. Dla zorjentowania się, jak szukać należy tej wypadkowej sił równoległych, rozpatrzmy ten przypadek bliżej i znajdźmy najpierw wypadkową dwu sił równoległych f_1 i f_2, działających w punktach A i B na jakiekolwiek ciało sztywne (rys. 59a).

Załóżmy, że na punkty A i B danego ciała działają oprócz sił f_1 i f_2 jeszcze siły f_3 i f_4, równe sobie i w strony wręcz przeciwne skierowane ($f_3 = - f_4$); dodanie tych dwu sił f_3 i f_4 nie może zmienić ruchu ciała,



Rys. 59.

przypuszczenie więc to jest zupełnie możliwe. Działanie czterech sił f_1, f_2, f_3, f_4 będzie takie samo, jak dwu sił f_1 i f_2. Przekątna AM równoległoboku daje nam wypadkową f' sił f_1 i f_3; przekątna BN równoległoboku daje nam wypadkową f'' sił f_2 i f_4. Ponieważ działanie danych sił f_1 i f_2 jest równe działaniu sił f_1, f_2, f_3 i f_4, przeto równa się też działaniu wypadkowych f' i f''. Przenieśmy miejsca działania sił f' i f'' do punktu C, w którym przecinają się kierunki tych sił; punkt ten przypada tutaj poza granicami danego ciała. Teraz przeniesione w ten sposób siły f' i f'' rozkładamy na takie same składowe, jak te, z których one zostały utworzone, a więc na f_1 i f_3 oraz f_2 i f_4. Działanie sił f_3 i f_4 daje w rezultacie zero, przeto siły te możemy, jako już nam niepotrzebne, odrzucić. Pozostaje działanie sił f_1 i f_2, skierowanych zgodnie według CL i CK; działanie to równa się, oczywiście, działaniu jednej siły f, równej sumie f_1 i f_2 ($f = f_1 + f_2$), działającej w kierunku CL (czy też CK) i mającej za miejsce działania którykolwiek punkt ciała, przypadający na prostej CO; między innemi takim punktem może być O. Z podobieństwa trójkątów COA i ADM wynika

$$\frac{CO}{AO} = \frac{AD}{DM} = \frac{f_1}{f_3} \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

z podobieństwa trójkątów COB i BEN wynika

$$\frac{CO}{OB} = \frac{BE}{EN} = \frac{f_2}{f_4}; \quad \ldots\ldots \quad (2)$$

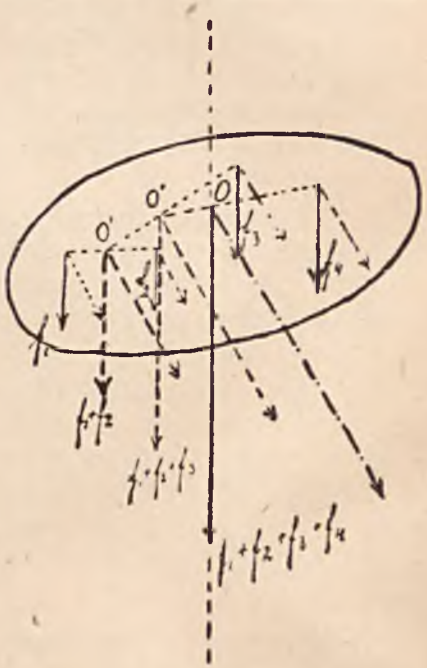
przez dzielenie (1) przez (2) otrzymujemy

$$\frac{OB}{AO} = \frac{f_1}{f_2} \quad \text{(wszak ilościowo } f_3 = f_4\text{)},$$

t. j. punkt O dzieli odległość między punktami A i B, w których działają dane siły równoległe, na części, odwrotnie proporcjonalne do wartości sił f_1 i f_2.

Przypuśćmy, iż na to samo ciało w tych samych punktach A i B działają tej samej wielkości siły równoległe f_1 i f_2, skierowane tylko inaczej względem prostej AB (rys. 59*b*). Szukając w ten sam sposób, jak wyżej, wypadkowej f, znajdujemy, iż równa się ona sumie $f_1 + f_2$, miejscem zaś działania tej wypadkowej może być którykolwiek punkt ciała, leżący na prostej CO; między innemi punktem takim może być znowu punkt O, którego położenie już wyznaczyliśmy.

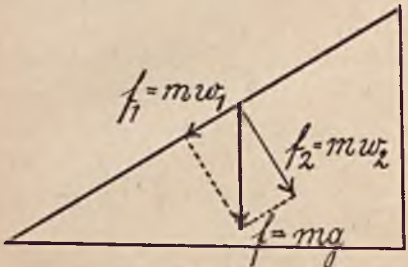
Wyciągamy więc wniosek, iż *działanie na ciało sztywne dwu sił równoległych, zgodnie skierowanych, zastąpić się daje przez działanie jednej wypadkowej, równoległej do sił danych, która równa się sumie sił danych i której kierunek bez względu na kierunek sił składowych przechodzi zawsze przez punkt, dzielący odległość między miejscami działań sił danych na części, odwrotnie proporcjonalne do wartości tych sił.* Ten charakterystyczny punkt O nazywa się *środkiem danych sił równoległych.*



Rys. 60.

W przypadku działania na ciało sztywne większej liczby sił równoległych w jedną stronę skierowanych, możemy sumować działanie ich pokolei, znajdując najpierw wypadkową dwu sił, sumując następnie z tą wypadkową trzecią siłę i t. d. (rys. 60: dane cztery siły składowe f_1, f_2, f_3, f_4). Ostatecznie i tu otrzymujemy wypadkową wszystkich sił jako równą sumie sił składowych, zgodną z niemi co do kierunku i przechodzącą przez charakterystyczny punkt, zwany *środkiem danych sił równoległych,* jakkolwiekbyśmy zmieniali kierunek wszystkich danych sił, byle ich wartości pozostawały te same, byle wciąż były równoległe i działały w tych samych punktach.

Zdarza się, że działają na ciała sztywne siły równoległe, skierowane w przeciwne strony. Przypadek ten omówimy później.

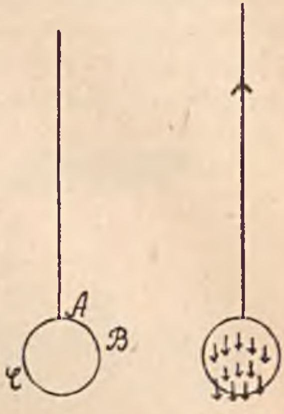


Rys. 61.

Rozpatrzmy teraz jeszcze przypadek *rozkładania* siły danej na jej składowe, odwołując się do zjawiska ruchu ciała, zsuwającego się po równi pochyłej. Stosując do opisu tego zjawiska pojęcie siły, powiemy, iż ciało porusza się po równi pod działaniem *składowej części* ciężaru, nadającej ciału tem mniejsze w porównaniu z g przyśpieszenie w, im mniejsza jest ta składowa część ciężaru w porównaniu z ciężarem całkowitym. Na rys. 61 f oznacza ciężar ciała o masie m; rozkładamy siłę f na dwie składowe części, z których jedna f_1 ma kierunek równi, druga f_2 kierunek prostopadły do tamtego; siła f_1 nadaje masie m przyśpieszenie w_1 tyle razy mniejsze od g, ile razy f_1 jest mniejsze od f; siła f_2 nadawałaby przyśpieszenie w_2 (podobnież mniejsze od g), gdyby równia nie uniemożliwiała ruchu w tym kierunku; siła f_2 przyciska tylko ciało do równi, warunkując tem jedynie wartość nieuniknionego przy ruchu tarcia. Zaniedbując tarcie, możemy uważać ruch ciała, zsuwającego się po równi pochyłej, za ruch jednostajnie przyśpieszony.

39. Środek ciężkości.

Jeżeli zawiesimy kulę jednorodną na sznurze (rys. 62), siła ciężkości nie nada jej ruchu w kierunku pionowym, w którym działa, a to dlatego, że przeciwdziała tej sile napięcie sznura. Działanie sznura możemy uważać jako siłę, skierowaną pionowo ku górze i równoważącą ciężar kuli. Lecz wszak najmniejsze części ciała, na jakie tylko sobie w myśli podzielić możemy kulę, podlegają działaniu siły ciężkości, skierowanej pionowo na dół; zatem to, co nazywamy ciężarem ciała, jest wypadkową tej niezliczonej liczby sił, działających na poszczególne punkty kuli. Piony, poprowadzone przez różne punkty kuli, są skierowane (załóżmy, iż ziemia jest kulą jednorodną) ku środkowi ziemi, a więc nie są one do siebie równoległe; swoją drogą nieznaczna wielkość rozpatrywanej kuli w porównaniu z wielkością ziemi pozwala uważać te piony za proste równoległe; ciężarem więc kuli jest wypadkowa niezliczonej liczby sił równoległych, działających na poszczególne punkty kuli. Jeżeli jedna siła (napięcie sznura) przeciwdziała sile ciężkości, znosząc jej działanie na kulę jako całość, może to zachodzić w tym jedynie przypadku, gdy siła ta jest równa tej wypadkowej i w stronę wręcz przeciwną skierowana. Za którykolwiek punkt kuli zaczepilibyśmy sznur, zawsze na przedłużeniu sznura znajdzie się środek kuli; oznacza to, iż jakkolwiekbyśmy obracali kulę, zawsze wypadkowa tych wszystkich sił, które tu działają na poszczególne punkty kuli, przechodzi przez środek kuli.



Rys. 62.

D o ś w i a d c z e n i e. Zawieśmy na sznurze płytę (rys. 63), przyczepiając sznur do płyty. Zaznaczmy na płycie kreską przedłużenie sznura. Zawieśmy tę samą płytę, przyczepiając sznur w innym jej punkcie, i zaznaczmy znów kreską na płycie przedłużenie sznura. Możemy powtórzyć to samo, zaczepiając sznur jeszcze w trzecim, czwartym punkcie płyty. Przekonywamy się, iż proste, których kierunki za każdym razem były zgodne z kierunkiem sznura, a zatem i kierunkiem wypadkowej wszystkich sił, działających tu na poszczególne punkty płyty, przecinają się w jednym punkcie. A więc ten punkt przecięcia, podobnie jak w poprzednim przykładzie środek kuli, wykazuje taką własność, iż przez ten punkt przechodzi zawsze wypadkowa danych sił równoległych, działających na poszczególne punkty ciała, jakkolwiekbyśmy obracali względem ziemi to ciało. Punkt o takiej własności istnieje w każdem ciele i nosi nazwę *środka ciężkości* danego ciała. W dalszym ciągu, mówiąc o ciężarze ciała, będziemy rozumieli przez to wypadkową


Rys. 63.

ciężarów najmniejszych części ciała, na jakie tylko w myśli podzielić je możemy, przechodzącą zawsze przez środek ciężkości ciała.

Istnienie środka ciężkości wynika też bezpośrednio z rozważań art. poprzedniego, gdzie mowa o wypadkowej sił równoległych, działających na ciało sztywne; środek ciężkości jest środkiem tych równoległych sił, które tu działają na poszczególne punkty ciała.

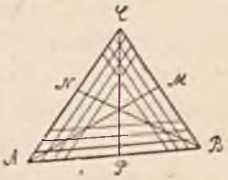
Rys. 64.

Z przytoczonego określenia środka ciężkości staje się zrozumiałe, że, jeżeli wogóle postawimy ciało, które możemy uważać za sztywne, w takie warunki, by ruch jego środka ciężkości w kierunku pionowym na dół był niemożliwy, w szczególności, gdy podeprzemy ciało w samym środku ciężkości, ciało to pod działaniem siły ciężkości opadać nie będzie. W przykładach powyższych sznur uniemożliwia ten ruch; można byłoby osiągnąć to samo inaczej, podpierając ciało w jednem miejscu tak, by punkt oparcia przypadał na jednej linji pionowej ze środkiem ciężkości (będzie to „punkt" tylko w ideale; w rzeczywistości podeprzeć ciało możemy na większej lub mniejszej części jego powierzchni). Z rys. 64 widoczne jest, jak można przez podpieranie ciała dojść do wyznaczenia położenia środka ciężkości w ciele, podobnie jak to wyżej robiliśmy, stosując metodę zawieszania.

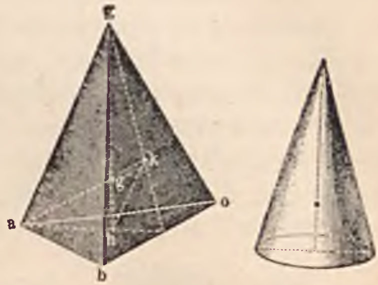
Ćwiczenie 18. Wytnijcie z tektury (grubszej, aby się nie gięła!) kilka kawałków dowolnego kształtu i metodą, podaną wyżej w doświadczeniu (rys. 63), znajdźcie w nich położenie środka ciężkości. Możecie do tegoż celu użyć cienkich deseczek. Sprawdźcie następnie przez opieranie tych ciał na ostrzu (rys. 64), czyście dobrze rozwiązali zadanie.

Ciała jednorodne, posiadające kształty symetryczne względem określonego punktu, zwanego środkiem symetrji, mają środek ciężkości w środku symetrji. Tak np. środek ciężkości kuli jednorodnej przypada w jej środku; środek pierścienia, obręczy kołowej również przypada w ich środku — zatem środek ciężkości może leżeć poza granicami ciała, w czem niema nic dziwnego: przez środek ciężkości wszak przechodzi kierunek wypadkowej siły, którą w myśli zastępujemy siły, działające na poszczególne punkty ciała; jeżeli uniemożliwimy ruch środka obręczy w kierunku pionowym na dół (przez zawieszenie, albo ustawienie w płaszczyźnie pionowej, by środek obręczy leżał na pionie, przechodzącym przez miejsca zawieszenia, względnie podparcia), obręcz opadać nie będzie.

W ciałach jednorodnych, posiadających symetrję względem prostej (osi symetrji) lub płaszczyzny (płaszczyzny symetrji), środek ciężkości leży na tej osi, względnie płaszczyźnie symetrji. Jeżeli ciało jednorodne posiada więcej niż jedną oś symetrji, to środek ciężkości przypada w punkcie przecięcia tych osi; podobnie jeżeli ono posiada więcej niż jedną płaszczyznę symetrji, środek ciężkości leży na linji przecięcia tych płaszczyzn, względnie w ich wspólnym punkcie (np. w przypadku jednorodnego prostopadłościanu). Wreszcie środek ciężkości może leżeć w punkcie przecięcia osi symetrji z płaszczyzną symetrji.



Rys. 65.



Rys. 66.

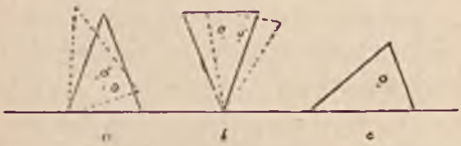
Gdzie zatem leży środek ciężkości walca jednorodnego, jednorodnego pręta, mającego na całej długości jednakowy przekrój?

W przypadku, gdy ciało, jednorodne nie posiada osi ani płaszczyzny symetrji, możemy wyszukać położenie środka ciężkości, dzieląc w myśli ciało na części, dla których umiemy już to zadanie rozwiązać. Tak np. jednorodną płytę trójkątną podzielić możemy w myśli cięciami, równoległemi do jednego z boków na szereg prętów dowolnie wąskich i szukać środka ciężkości płyty na miejscu geometrycznem środków ciężkości tych prętów. W ten sposób łatwo wykażemy, iż środek ciężkości takiej płyty (rys. 65) leży na prostej, łączącej wierzchołek trójkąta ze środkiem przeciwległego boku w odległości $^1/_3$ długości tego odcinka od boku. Podobnie, dzieląc w myśli jednorodny ostrosłup trójkątny cięciami, równoległemi do którejkolwiek ze ścian (rys. 66), dowieść możemy, że środek ciężkości jego leży na prostej, łączącej którykolwiek wierzchołek ze środkiem ciężkości przeciwległej jemu ściany w odległości $^1/_4$ długości tego odcinka od tej ściany.

Wniosek ten uogólnić możemy na dowolny ostrosłup jednorodny, jak również na stożek (rys. 66).

40. Równowaga ciał podpartych, podlegających tylko działaniu siły ciężkosci.

Wyżej (art. 39) zaznaczyliśmy, iż warunkiem niezbędnym, a zarazem dostatecznym, by ciało dane nie poruszało się pod działaniem siły ciężkości, jest ten, by pion, poprowadzony przez środek ciężkości ciała, przechodził przez punkt zawieszenia, względ. podparcia, ogólniej — wewnątrz konturu podparcia (rys. 67, 68, 69).

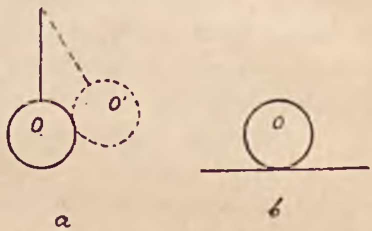


Rys. 67.

O takiem ciele podpartem, pozostającem w spoczynku, mówimy, iż jest *w równowadze.* Rys. 70 przedstawia 2 walce skośne. Który z nich — pełny, czy uzupełniony kropkami — jest w równowadze?

Rozróżniamy trzy rodzaje tej równowagi: *stałą, niestałą* i *obojętną*: Jeżeli ciało, pozostające w równowadze, po wychyleniu z tego położenia, pozostawione potem tylko działaniu siły ciężkości, wraca do równowagi, nazywamy równowagę *stałą* (rys. 67*a*, 69*a*); jeżeli po takiem wychyleniu ciało nie tylko nie wraca do początkowego położenia, lecz, przeciwnie, dąży do położenia zupełnie innego (rys. 67*b*), mówimy, iż

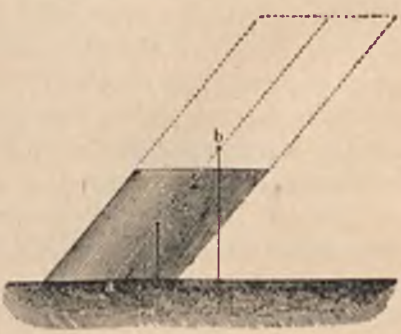
Rys. 68.



Rys. 69.

równowaga jest *niestała*; gdy wreszcie ciało, wychylone z położenia równowagi, pozostaje również w równowadze w tem nowem położeniu, oznaczamy równowagę mianem *obojętnej* (rys. 67*c*, 69*b*).

Łatwo jest dostrzec warunek, który określa każdy z powyższych rodzajów równowagi. Jeżeli przy równowadze położenie środka ciężkości jest takie, iż przez wychylenie z tego położenia on się podnosi względem powierzchni ziemi, innemi słowy, jeżeli położenie jego jest najniższe ze wszystkich możliwych po odchyleniu (rys 67*a* i rys. 69*a*), równowaga jest stała; jeżeli to po-



Rys. 70.

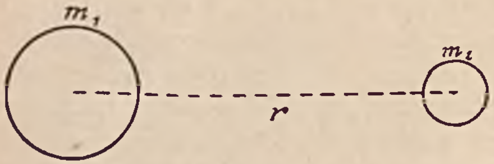
łożenie jest przy równowadze najwyższe ze wszystkich możliwych po odchyleniu (rys. 67*b*), równowaga jest niestała; jeżeli wreszcie przy zmianach położenia wysokość środka ciężkości ciała ponad powierzchnią ziemi nie ulega zmianie (rys. 67*c* i 69*b*), równowaga jest obojętna. Środek ciężkości ma zatem własność dążenia do możliwie najniższego względem powierzchni ziemi położenia.

Ten sam punkt, który oznaczyliśmy tu mianem środka ciężkości, nosi jeszcze nazwę *środka masy*. Ma on szczególną własność, że *ruch jego zależy jedynie od sił zewnętrznych* w stosunku do ciała, natomiast *nie zależy od sił wewnętrznych*, t. j. działających między poszczególnemi częściami, tworzącemi dane ciało. Ciekawym przykładem tego jest armata lub wszelkie inne urządzenie, wyrzucające pociski. Gdy zachodzi wystrzał z armaty, działają tu jedynie siły wewnętrzne, a więc ponieważ przed wystrzałem środek masy nabitej armaty pozostawał w spoczynku, zachowuje on swe położenie i po wystrzale. Istotnie, wprawdzie pocisk, wyrzucony z armaty, oddala się, ale armata się cofa i środek masy pozostaje w tem samem miejscu. Jeżeli osoba, siedząca spokojnie na nieruchomej huśtawce, pochyli się nagłym ruchem naprzód, huśtawka się cofnie wtył. Przykładów można dać więcej; zalecamy uczynić to czytelnikowi.

41. Ciążenie powszechne.

Największym tworem genjuszu Newtona było sformułowanie przez niego t. zw. *prawa ciążenia powszechnego*. Newton powziął niesłychanej doniosłości myśl, że wszystkie bez wyjątku ciała przyciągają się nawzajem, przytem, że dla dwu danych mas, znajdujących się w określonej od siebie odległości *siła* tego ciążenia *jest proporcjonalna do wielkości mas i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu ich odległości;* w tym samym więc stosunku, w jakim są większe masy, pozostające w danej od siebie odległości, większe są siły ich wzajemnego przyciągania się; jeżeli natomiast odległość między dwiema danemi masami wzrasta dwukrotnie, trzykrotnie i t. d., to siła ciążenia zmniejsza się czterokrotnie, dziewięciokrotnie i t. d. Ciężar ciał jest objawem ciążenia, zachodzącego między temi ciałami a ziemią.

Siła ciążenia działa, jak to zakłada Newton, między wszystkiemi bez wyjątku ciałami, zarówno więc między bryłami tej wielkości jak nasze słońce lub planety, jak między najdrobniejszemi częściami, na jakie ciała podzielić możemy w myśli, czy to myśleć będziemy o częściach jednego i tego samego ciała, czy też ciał różnych. Gdy mówimy o przyciąganiu się dwu ciał, rozumiemy to w ten sposób, iż ciążenie zachodzi pomiędzy wszystkiemi częściami, na jakie tylko oba te ciała w myśli możemy podzielić; myślimy więc o *wypadkowej sile* tych wszystkich sił cząstkowych, których liczby podać nie jesteśmy w stanie. Rozumowanie matematyczne, którego tu nie przytaczamy, doprowadza do wniosku, że jeśli mowa o dwu kulach jednorodnych (t. j. takich, z których każda posiada we wszystkich jej punktach jednakową gęstość), działanie g r a w i t a c y j n e (ciążenie nazywa się też g r a w i t a c j ą) zachodzi tak, jakgdyby masy tych kul skupione były w ich środkach; gdy mówimy więc o odległości takich brył kulistych, rozumiemy ją jako odległość między środkami kul.



Rys. 71.

Przypuśćmy, że odległość między środkami dwu kul o masach m_1 i m_2 wynosi r (rys. 71); prawo Newtona o ciążeniu między temi kulami, mówiące, że siła ciążenia jest proporcjonalna do mas i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości, wyraża się następującym wzorem

$$f = k \frac{m_1 \, m_2}{r^2}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

gdzie k jest to pewien spółczynnik proporcjonalności, zwany *stałą grawitacyjną.* Wyznaczyć ją można, mierząc siłę ciążenia między dwiema znanemi masami, mieszczącemi się w znanej od siebie odległości.

Z a d a n i a.

25. Masa 105 gr porusza się ze stałem przyśpieszeniem 25 $\frac{cm}{sek^2}$. Jaka siła działa na tę masę?

26. Jaki jest ciężar ciała o masie 535 gr, znajdującego się w Warszawie, gdzie $g = 981{,}2 \frac{cm}{sek^2}$?

27. Masa 300 gr porusza się pod działaniem siły = 1 megadynie. Jakie jest przyśpieszenie w tym ruchu?

28. Na ciało, poruszające się z prędkością 15 $\frac{cm}{sek}$, zaczyna działać siła = $3 . 10^6$ dyn w kierunku wręcz przeciwnym ruchowi, powodując zatrzymanie się ciała po upływie 4 sek od chwili rozpoczęcia się tego działania. Jaka jest masa tego ciała?

29. Na ciało o masie 250 gr, spoczywające na płaszczyźnie poziomej, działa siła = ciężarowi 4 kilogramów $\left(g = 981 \frac{cm}{sek^2}\right)$. Z jakiem przyśpieszeniem porusza się ciało, jeśli zakładamy, że tarcia niema?

30. Na ciało o masie 100 gr, pozostające w spoczynku, zaczynają jednocześnie działać dwie siły: 1) 50 dyn w kierunku wschodnim i 2) 25 dyn w kierunku zachodnim. W jakim momencie ciało będzie posiadać prędkość $15 \frac{cm}{sek}$, skierowaną ku wschodowi?

31. Ciało o masie 2 Kg, pozostające początkowo w spoczynku, podlega w ciągu $1^1/_2$ minuty działaniu siły, równej ciężarowi 1-go kilograma $\left(g = 981 \frac{cm}{sek^2}\right)$. Jaką prędkość posiada ciało po upływie tych $1^1/_2$ min.?

32. Pod działaniem siły, równej ciężarowi 1-go kilograma $\left(g = 981 \frac{cm}{sek^2}\right)$, ciało, pozostające początkowo w spoczynku, przebiega drogę 10 m w ciągu 10 sek. Jaka jest masa ciała?

33. Pod działaniem pewnej siły (np. siły mięśni) ciało, rzucone pionowo do góry na równiku, gdzie $g = 978 \frac{cm}{sek^2}$, wznosi się na wysokość 25 m. Na jaką wysokość wzniesie się to samo ciało pod działaniem tejże siły, rzucone pionowo do góry na biegunie, gdzie $g = 983 \frac{cm}{sek^2}$? (opór powietrza w obu razach zaniedbujemy).

34. Jaki będzie ruch ciała o masie 250 gr pod jednoczesnem działaniem trzech sił: 1) 100 dyn, skierowanej ku wschodowi, 2) 25 dyn — ku południowi i 3) 60 dyn — dokładnie ku północo-wschodowi?

35. Dlaczego człowiekowi, stojącemu na palcach, trudniej jest utrzymać równowagę, niż wtedy, gdy opiera się, jak zwykle, na całej stopie?

Rozdział III. O pracy i energji.

42. Praca.

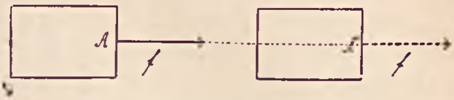
W mowie potocznej posługujemy się często słowem „praca“, rozumiejąc przez to określoną czynność, zmierzającą ku jakiemuś pożytecznemu celowi. Mówimy o pracy ludzkiej, o pracy zwierząt, które człowieka wyręczają, o pracy, wykonywanej przez najróżnorodniejsze machiny. O ile chcemy przenieść wyraz „praca“ do nauki ścisłej, jaką jest nauka o ruchu, winniśmy nadać temu wyrazowi ścisłe znaczenie, wiążąc je odpowiednio z treścią innych pojęć, już ustalonych w tej nauce.

Zastanawiając się nad poszczególnemi przykładami t. zw. pracy fizycznej i zapytując siebie, co właściwie pracą taką nazywamy, odpowiemy, iż słowo to oznacza zawsze przezwyciężanie pewnych oporów na pewnej drodze. Jeżeli np. podnosimy ciężar, przezwyciężamy siłę ciężkości; gdy przesuwamy stół lub szafę po podłodze, przezwyciężamy tarcie, przytem zarówno w pierwszym jak i w drugim przykładzie samo poruszenie ciała, wyprowadzenie jego ze stanu spoczynku, wymaga pracy ze względu na bezwładność ciała; gdybyśmy ciału, spoczywającemu i zupełnie nieskrępowanemu żadnemi przeszkodami w rodzaju tarcia (przykład taki daje się tylko pomyśleć, ale nie urzeczywistnić), chcieli nadać pewną prędkość, musielibyśmy wykonać pracę i t. d.

Otóż pokonanie tego czy innego oporu dokonywa się działaniem siły; przytem czy podnosimy ciało, czy inaczej w ruch wprawiamy, jak wyżej, miejsce działania siły ulega przytem zawsze przesunięciu. Oto dlaczego w mechanice mówimy, iż *siła wykonywa pracę, jeżeli miejsce działania siły ulega przesunięciu w kierunku tego działania.*

43. Mierzenie pracy. Jednostka pracy.

Z poprzedniego wynika, że im większy opór pokonywamy i im większa jest droga, na której to się dzieje, tem większa jest wykonywana praca; innemi słowy *praca jest tem większa, im większa siła wykonywa pracę i im większe jest przesunięcie miejsca działania siły w kierunku jej działania.* Możemy więc powiedzieć, iż *praca jest proporcjonalna do wielkości siły i wielkości tego przesunięcia.* Przypuśćmy, iż siła f działa na ciało w takim kierunku, jak to oznaczone jest na rys. 72, i pod



Rys. 72.

działaniem tej siły ciało przesuwa się na drodze $l = AA'$. Oznaczając przez u pracę, którą f wykonywa na drodze l, napiszemy

$$u = k \cdot f \cdot l, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

gdzie k jest pewnym spółczynnikiem proporcjonalności.

Umówmy się teraz za *jednostkę pracy* uważać taką pracę, którą wykonywa *jednostka siły na jednostce drogi.* W takim razie z powyższego wzoru otrzymujemy następującą zależność liczbową

$$1 = k \cdot 1 \cdot 1,$$

czyli przy takim wyborze jednostki pracy spółczynnik $k = 1$ i zamiast wzoru (1) mamy krótszy

$$u = f \cdot l, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

który wyraża, iż *pracę mierzymy iloczynem z siły działającej przez wielkość przesunięcia miejsca działania siły w kierunku tego działania.*

Ponieważ za jednostkę siły obraliśmy *dynę,* za jednostkę zaś długości *centymetr,* przeto za jednostkę pracy obieramy taką pracę, którą wykonywa siła = 1 dynie na drodze = 1 cm; określonej w ten sposób jednostce pracy nadajemy miano *erga.* Zatem

$$erg = dyna \cdot centymetr$$

albo, ponieważ $dyna = \frac{gr \cdot cm}{sek^2}$,

$$erg = \frac{gr \cdot cm}{sek^2} \cdot cm = \frac{gr \cdot cm^2}{sek^2} \quad \ldots\ldots \quad (3)$$

Widzieliśmy wyżej (art. 35), iż dyna jest siłą bardzo małą, przeto i praca tej małej siły na tak małej drodze jest również bardzo małą; jednostka ta jest odpowiednią w badaniach naukowych, do celów wszakże technicznych jest zbyt drobną i dlatego wprowadzamy jeszcze wielokrotność tej jednostki t. zw.

$$\textit{dżul}^{*)} = 10^7 \textit{ ergów} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Gdy bardzo powolnym ruchem podnosimy $1 Kg$ na wysokość 1 *metra,* wykonywamy pewną pracę, której inżynierowie często używają jako jednostki pracy, zwanej *kilogrammetrem (Kgm).* Mówimy „powolnym ruchem“, a to dlatego, by móc zaniedbać w rozważaniu tę pracę, którą trzeba wykonać na nadanie temu kilogramowi pewnej prędkości, a mieć na uwadze jedynie pracę przeciw sile ciężkości. Podniesienie 4 *Kg* na wysokość 1 *m* (takim samym powolnym ruchem w tem samem miejscu) będzie wymagało pracy poczwórnej, t. j. 4 *Kgm,* podniesienie zaś 1 *Kg* na wysokość 5 *m* pracy pięciokrotnej w porównaniu z wartością pierwszej, t. j. 5 *Kgm,* jeżeli zaniedbamy (co można uczynić) zmiany siły ciężkości wraz z wysokością. Oczywiście podnosząc 4 *Kg* na wysokość 5 *m*, wykonamy pracę

$$4 \,.\, 5 \; Kgm = 20 \; Kgm.$$

Jednostka ta — *Kgm* — daje się łatwo uzmysłowić i jest przez techników używana i lubiana; posiada ona jednak poważny brak: oto wiemy przecie, że siła ciężkości ma w różnych miejscach ziemi i na różnych wysokościach różne, jak się mówi, natężenie, którego wyrazem jest różne przyśpieszenie (g) ciał swobodnie spadających. Inny jest ciężar jednego kilograma w Warszawie, inny w Paryżu, inny na poziomie morza, a jeszcze inny na szczytach gór. *Kgm* jest zatem wielkością niestałą, a wszak zasadniczą własnością każdej jednostki musi być właśnie jej stałość. Niemniej jednak, wobec tego, iż niedokładność, płynąca z posługiwania się taką jednostką, jest niewielka i w zagadnieniach technicznych jest często możliwa do pominięcia, *Kgm* znalazł szerokie zastosowanie.

Obliczmy, ilu ergom, względnie dżulom, równa się 1 *Kgm.* Przy podnoszeniu 1 *Kg* pokonywamy siłę, równą jego ciężarowi, t. j. siłę $= 1000 g$ *dyn,* jeżeli g oznacza wartość liczbową przyśpieszenia w danem miejscu; temuż się równa siła, wykonywająca pracę (pamiętajmy, iż zakładamy ruch bardzo powolny, co upoważnia nas nie brać pod uwagę pracy, potrzebnej na udzielenie podnoszonemu ciału prędkości). Droga, na której praca jest wykonywana, $= 1 \; m = 100 \; cm$; czyli praca

$$1 \; Kgm = 1000 \; g \; dyn. \; 100 \; cm = 10^5 \; g \; dyn. \; cm = 10^5 \; g \; \textit{ergów} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

---

*) Ku uczczeniu nazwiska znakomitego uczonego angielskiego Joule'a (czyt. Dżul).

Jeżeli założymy, że przyśpieszenie grawitacyjne $= 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$, co dla Polski jest mniej więcej słuszne, otrzymamy

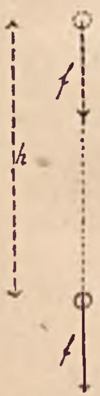
$$1\ Kgm = 98100000\ ergów,$$

t. j. *blisko* 10^8 ergów lub 10 dżulów. Jak widzimy tedy, dżul jest *mniej więcej* $^1/_{10}$ Kgm, t. j. jest to mniej więcej praca, którą wykonywamy, podnosząc 100 gr na wysokość 1 metra, lub podnosząc 1 Kg na wysokość 10 cm.

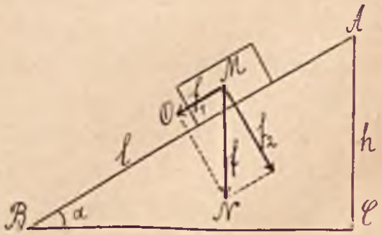
44. Praca siły ciężkości i praca przeciw sile ciężkości.

Przypuśćmy, iż bardzo powolnym ruchem podnosimy ciało w kierunku pionowym. Przypuśćmy, iż ciężar ciała $= f$, wysokość podniesienia $= h$ (rys. 73). Zaniedbując wartość siły, potrzebnej do udzielenia ciału pewnej chociażby najmniejszej prędkości, powiemy, iż siła, którą pokonywamy ciężar ciała, t. j. która wykonywa pracę, $= f$, czyli praca wykonana jest $f\ .\ h$.

Gdy ciało swobodnie spada, miejsce działania siły (mamy na myśli wypadkową wszystkich sił grawitacyjnych, działających na poszczególne cząstki ciała; miejsce jej działania zakładamy dla uproszczenia w środku ciężkości) ulega przesunięciu, a więc gdy wysokość spadania $= h$, praca wykonana jest znowu $f\ .\ h$. W tym drugim jednak razie pracę wykonywa siła ciężkości, a wynikiem tej pracy jest wzrost prędkości ciała spadającego. Jeżeli pracę siły ciężkości w tym drugim przypadku traktować będziemy jako pracę dodatnią, o pierwszej, t. j. o pracy przeciw sile ciężkości, powiedzieć możemy, że jest to również praca siły ciężkości, tylko ujemna.



Rys. 73.



Rys. 74.

Znajdźmy pracę, którą wykonywa siła ciężkości przy zsuwaniu się ciała po równi pochyłej (rys. 74); załóżmy przytem dla uproszczenia zagadnienia, że ruch zachodzi bez tarcia. W kierunku równi działa tu składowa f_1 siły ciężkości f, przyczem z podobieństwa trójkątów ABC i OMN otrzymujemy

$$f_1 : f = h : l,$$

skąd

$$f_1 = \frac{h}{l} \cdot f \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (1)$$

Praca siły f_1 na drodze l równa się $u = f_1 \,.\, l$, czyli — z uwzględnieniem wzoru (1)

$$u = f_1 \, l = \frac{h}{l} \cdot f \cdot l = f \cdot h \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (2)$$

Dochodzimy zatem do wniosku, że, gdy ciało, którego ciężar jest f, spada z wysokości h, czy to swobodnie, czy zsuwając się (bez tarcia!) po równi pochyłej, jakkolwiek względem poziomu nachyłonej, wartość pracy, wykonanej przez siłę ciężkości, jest zawsze ta sama $f \,.\, h$.

Gdybyśmy teraz chcieli odwrotnie podnieść ciało na wysokość h, przesuwając je bez tarcia po równi pochyłej, musielibyśmy wykonać pracę przeciw tej sile ciężkości, t. j. przeciw składowej tej siły w kierunku równi pochyłej; zakładamy znowu ruch bardzo powolny, by zaniedbać pracę na nadanie prędkości podnoszonemu ciału; wystarczyłoby więc powiedzieć, iż w tym razie siła ciężkości wykonywa pracę ujemną, lecz co do wielkości taką samą jak przy spadaniu, t. j. znowu $= f \,.\, h$. Można to znaleźć bezpośrednio, co pozostawiamy czytelnikowi.

Wynika stąd, iż wartość pracy którą należy wykonać, podnosząc ciało w danem miejscu na daną wysokość, jest jednakowa, niezależna od tego, czy podnosimy je bezpośrednio w kierunku pionowym, czy też przesuwamy bez tarcia po tak czy inaczej pochylonej równi; w rzeczywistości bez tarcia nie można nigdy takiego przesunięcia dokonać; jeżeli jednak tarcie jest małe, zaniedbujemy je, przyjmując, iż niema go wcale.

45. Energja.

Chcąc nadać ciału spoczywającemu pewną prędkość, musimy wykonać pracę; zdajemy sobie sprawę z tej pracy, rzucając piłkę lub kamień. Do nadania prędkości kuli karabinowej potrzeba pracy, którą wykonywają gazy, tworzące się z materjałów wybuchowych.

Gdy kula, wystrzelona z karabina, przebija deskę, wykonywa pewną pracę, przezwyciężając napotkany opór; przytem prędkość kuli się zmniejsza; czasem prędkość ta staje się równa zeru, zanim kula przejdzie nawylot — kula utkwi wtedy w desce. Podobnie każde poruszające się ciało może wykonać pracę, wprawiając w ruch inne ciało lub jego części. Możemy tedy powiedzieć, iż, gdy wykonywamy pracę, wprawiając ciało w ruch, w poruszającem się ciele zawarty jest zasób pracy, przez nas wykonanej; gdy ciało to, potrącając inne ciało, wykonywa pracę, traci ono część tego zasobu, albo i cały zasób, jak np. kula, która, wbijając się w ścianę, przestaje się poruszać.

Podnosząc jakiekolwiek ciało na pewną wysokość, wykonywamy pracę przeciw sile ciężkości; ale praca ta również jakgdyby tkwi w tem ciele podniesionem *); przy spadaniu ciała z tej wysokości siła ciężkości zwraca tę pracę, udzielając spadającemu ciału prędkości; o ile zaś to ciało spadające uderza w inne ciało, wprawia je w ruch, zgina lub łamie, w pracy, otrzymanej przytem, mamy właśnie zwrot pracy, zużytej na podniesienie.

Podobnie, gdy nakręcamy sprężynę, wykonywamy pracę; ale nakręcona sprężyna oddaje tę pracę, której zasób w sobie zawiera, rozkręcając się i poruszając przytem inne ciało, np. mechanizm zegarowy.

Nazwijmy zasób pracy *energją*, a wtedy zamiast mówić, że w ciele poruszającem się tkwi pewien zasób pracy, powiemy, iż *poruszające się ciało posiada energję*; podobnie posiada energję nakręcona sprężyna, wzniesione na pewną wysokość ciało.

Każdy zasób może się zwiększać i zmniejszać, i energja może się zwiększać i zmniejszać. Sprężyna, rozkręcając się, oddaje nagromadzoną w niej pracę, energja jej się zmniejsza; podobnie poruszający się przedmiot, gdy wprawia w ruch inny przedmiot, oddaje tkwiącą w nim pracę, a więc również energja jego się zmniejsza. Natomiast, gdy spoczywającemu ciału nadajemy prędkość; gdy ciało, leżące na ziemi, podnosimy, udzielamy tym ciałom energji, oddając im część energji, którą sami posiadamy.

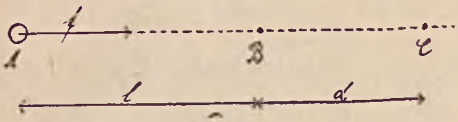
Pojęcie energji należy do najważniejszych pojęć fizyki i całego wogóle przyrodoznawstwa. Stopniowo, w miarę opanowywania przedmiotu naszej nauki, będziemy to pojęcie pogłębiali i brali szerzej.

46. Mierzenie energji. Energja kinetyczna i potencjalna.

Skoro określiliśmy energję jako zasób pracy, wynika stąd, że energja jest równoznaczna pracy, a więc mierzy się w tych samych jednostkach. Jeżeli na nadanie jakiemuś spoczywającemu ciału pewnej prędkości zużywamy np. 500 ergów, będzie to właśnie udzielony temu ciału zasób pracy, t. j. udzielona mu energja będzie właśnie wyno-

*) Ściśle mówiąc, w układzie, który stanowi to ciało wraz z ziemią, od której je oddaliliśmy.

siła 500 ergów. Jeżeli to poruszające się ciało wprawi inne ciało w ruch, wykonywając przytem pracę = 200 ergom, o tyleż zmniejszy się jego własny zasób pracy, t. j. energja jego zmniejszy się o 200 ergów.



Rys. 75.

Przypuśćmy, iż na spoczywającą w A masę m działa siła f (rys. 75); prędkość ciała pod działaniem tej siły jednostajnie wzrasta; znajdźmy, jaką wartość posiada ta prędkość, gdy ciało dochodzi do B, t. j. po przebyciu przez ciało, a więc i przez miejsce działania siły drogi $AB = l$.

Między siłą f, masą m a nadawanem jej przez siłę przyśpieszeniem istnieje, jak wiemy (art. 35), zależność

$$f = mw, \text{ t. j. } w = \frac{f}{m} \quad \dots\dots\dots \quad (1)$$

Na prędkość i drogę przebytą będziemy przeto mieli wzory

$$v = wt = \frac{f}{m} t \quad \dots\dots\dots\dots \quad (2)$$

$$l = \frac{wt^2}{2} = \frac{ft^2}{m \, . \, 2} \quad \dots\dots\dots\dots \quad (3)$$

Z drugiej strony praca siły f na drodze l jest $f \, . \, l$; podstawiając na l jego wartość z (3) i uwzględniając wzór (2), otrzymujemy

$$f \, . \, l = \frac{f^2 \, t^2}{m \, . \, 2} = \frac{f^2 \, . \, t^2 \, . \, m}{m^2 \, . \, 2} = \frac{mv^2}{2} \quad \dots\dots\dots \quad (4)$$

Jak widzimy, praca, którą wykonać trzeba dla nadania masie m prędkości v, jest

$$\frac{mv^2}{2}.$$

Tym więc zasobem pracy rozporządza poruszająca się masa, zasób ten stanowi jej energję. Otóż taką energję ruchu, t. j. energję, wyrażającą się w ruchu, bez względu na to, jak ruch powstał, nazywamy *energją kinetyczną*. Energja więc kinetyczna poruszającej się masy mierzy się *połową iloczynu z masy przez kwadrat prędkości*; będziemy ją krótko oznaczali przez K.

Przypuśćmy, iż pod działaniem tejże siły f masa porusza się dalej aż do C. W tem miejscu prędkość masy będzie inna $= V$; powtarzając rozumowanie, jak wyżej, w stosunku do całej przebytej drogi $AC = l + d$, mamy

$$f(l + d) = \frac{mV^2}{2}.$$

Możemy więc napisać

$$f(l + d) - f \cdot l = \frac{m V^2}{2} - \frac{m v^2}{2}$$

albo

$$f \cdot d = \frac{m V^2}{2} - \frac{m v^2}{2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

W tym wzorze (5) iloczyn $f \cdot d$ oznacza pracę, którą wykonywa siła f na drodze $BC = d$; $\frac{m V^2}{2}$ jest to energja kinetyczna danej masy w punkcie końcowym C, zaś $\frac{mv^2}{2}$ jej energja kinetyczna w punkcie początkowym B tej drogi BC; innemi słowy, praca, wykonana tu przez siłę f na drodze d, mierzy się *przyrostem energji kinetycznej*; zasób pracy, udzielony na tej drodze poruszającej się masie, stanowi właśnie ów przyrost. Uogólniając ten przypadek, powiemy, iż zawsze, skoro energja kinetyczna ciała otrzymuje pewien przyrost, przyrost ten daje wielkość pracy, której kosztem powstał.

Przypuśćmy teraz, iż podnosimy masę m na wysokość h w miejscu, gdzie przyśpieszenie grawitacyjne jest g; jak wyżej, zakładamy ruch bardzo powolny, by pominąć pracę, potrzebną na nadanie tej masie prędkości, t. j., jak teraz powiemy, na udzielenie jej energji kinetycznej; siła, wykonywająca pracę owego podniesienia, równa się ciężarowi ciała, t. j. mg; wartość zaś samej pracy jest mgh. Jak wskazywaliśmy wyżej, pracę tę możemy odzyskać, gdy podniesiona masa pocznie spadać; przy umieszczeniu jej na danej wysokości h zasób pracy wykonanej tkwi w tem ciele, a właściwie w układzie, złożonym z tego ciała i ziemi; ten zasób pracy, uwarunkowany położeniem ciała względem ziemi, nazywamy *energją potencjalną*; oznaczając ją przez P, napiszemy

$$P = m g h \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Podobnie, gdy nakręcamy sprężynę, wykonywamy pracę, przezwyciężając jej opór sprężysty, stawiany zmianom położeń poszczególnych części sprężyny jednych względem drugich; sprężyna nakręcona zawiera w sobie zasób pracy, przez nas wykonanej; ten zasób pracy stanowi jej energję potencjalną. Wogóle zatem *energją potencjalną jakiegokolwiek układu nazywamy energję, określoną przez szczególne położenie wzajemne części tego układu.*

Znajdźmy dla przykładu wartość energji potencjalnej masy 5 Kg, znajdującej się na wysokości 2 metrów ponad powierzchnią ziemi w miejscu, gdzie przyśpieszenie grawitacyjne jest 981 $\frac{cm}{sek^2}$ *).

O ilebyśmy chcieli wyrazić tę wartość w Kgm, mamy ją odrazu

$$P = 5 \,.\, 2 \text{ Kgm} = 10 \text{ Kgm}.$$

Pragnąc ją wyrazić w ergach lub dżulach, podstawiamy do wzoru $P = mgh$ odpowiednie wartości

$$P = 5 \,.\, 10^3 \text{ gr} \,.\, 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2} 2 \,.\, 10^2 \text{ cm} = 10^6 \,.\, 981 \frac{\text{gr} \,.\, \text{cm}^2}{\text{sek}^2} =$$

$$= 981.10^6 \text{ ergów} = 98{,}1.10^7 \text{ ergów} = 98{,}1 \text{ dżulów}.$$

Musimy w tem miejscu zaznaczyć jeszcze jedno. Oto, gdy mowa o podnoszeniu ciała na pewną wysokość, podniesienia tego dokonać można względem różnych poziomów, np. względem poziomu morza, względem podłogi lokalu, mieszczącego się na piętrze, albo jeszcze inaczej. Przypuśćmy zresztą, że podnosimy ciało z powierzchni ziemi na pewną wysokość. Na tej wysokości posiada ono, zgodnie z ustaloną już przez nas terminologją, pewną energję potencjalną, równą pracy, wykonanej przy podniesieniu, i pracę tę oddaje przy spadaniu, t. j. przy powrocie do pierwotnego poziomu. Czy jednak możemy powiedzieć, że energja potencjalna = 0 na powierzchni ziemi? wszak to samo ciało może jeszcze obniżyć swe położenie i przytem wykonać pracę, np. zapadając się w głąb przy trzęsieniu ziemi, o ile w miejscu, gdzie ono leży, utworzy się szpara w skorupie ziemskiej. Jak widzimy tedy, należy raczej rozumieć, iż przy podnoszeniu ciała na pewną wysokość względem jakiegokolwiek poziomu *zwiększamy* energję potencjalną ciała w stosunku do posiadanej przezeń w pierwotnem położeniu o wartość, równą pracy, wykonanej przy podniesieniu. Tak też w dalszym ciągu rozumieć zawsze będziemy, jakkolwiekbyśmy dla skrócenia tego nie powtarzali za każdym razem.

---

*) Zwracamy uwagę raz jeszcze, iż właściwie należałoby tu mówić o energji układu, złożonego z dwu ciał, a mianowicie danej masy i ziemi, których odległość się powiększa kosztem wykonanej pracy; mówimy o energji ciała podniesionego tylko dla skrócenia.

47. Zasada zachowania energji. Przemiany energji. Machiny. Dzielność.

Od kiedy człowiek istnieje na ziemi, próbował on dopomagać sobie w pracy różnemi narzędziami; ba, nawet zwierzęta uciekają się do pomocy narzędzi — małpy rozbijają orzechy kamieniami, posługują się zręcznie drążkiem. Z początku narzędzia były bardzo proste, zczasem stawały się więcej złożonemi i dziś rozporządzamy zaiste podziwu godnemi machinami. Bez względu na większą lub mniejszą złożoność, każda machina służy, ogólnie mówiąc, do wykonania pracy, a przytem (co człowiek musiał oddawna zauważyć) każda wymaga pewnego zasilania: albo musi być poruszana ręką ludzką, lub siłą zwierząt, albo ją w ruch wprawia wiatr, lub płynąca czy też spadająca woda, albo wymaga ona paliwa lub zasilania prądem elektrycznym, — słowem, wymaga zawsze pewnego *motoru*. Zawsze więc działanie machiny kosztem czegoś się odbywa, jakkolwiek często koszt ten jest dla nas nieznaczny, gdy np. wyzyskujemy siły przyrody, jak wiatr lub wodę bieżącą.

Oddawna nęciło człowieka wynalezienie takiej machiny, która, raz puszczona w ruch, nie tylko nie przestawałaby się poruszać, co byłoby bardzo zresztą ciekawe, aczkolwiek w praktyce nieprzydatne, lecz, poruszając się, nieprzerwanie wykonywałaby pracę. Setki ludzi wysilało swe mózgi nad sporządzeniem machiny takiej, której zgóry nadano nazwę *perpetuum mobile* (po polsku: to, co się nieustannie porusza); mijały lata i stulecia, ludzie rujnowali zdrowie i majątki, lecz... wynalazku takiego dokonać się nie udało. Można było tedy wnosić, że wynalazek ten jest niedościgłą mrzonką. Istotnie, rozwój nauki, w pierwszym rzędzie fizyki, doprowadził do zrozumienia, że perpetuum mobile jest niemożliwe. Przyrząd taki miałby wszak stwarzać pracę z niczego; tymczasem najsłuszniej jest uznać prawdę: *z niczego nic*. Wypowiadamy tedy *zasadę*, którą wszystkie znane nam fakty potwierdzają, która stanowi podstawę całego przyrodoznawstwa i nazywa się *zasadą zachowania energji*. Możemy ją sformułować tak: *praca z niczego powstać nie może, jak też zginąć nie może;* albo, ponieważ określiliśmy energję jako zasób pracy, możemy powiedzieć inaczej, że *energja zarówno z niczego nie powstaje, jak też nie ginie*.

Pobieżne rozważanie zjawisk może wzbudzić w nas pewne wątpliwości; rozpraszają się one jednak po bliższem zastanowieniu się. Oto np., gdy rzucamy pionowo w górę kamień, udzielamy mu *energji kinetycznej*; w miarę jednak jak kamień wznosi się do góry, prędkość jego maleje, a zatem energja kinetyczna się zmniejsza; wreszcie na pewnej wysokości kamień na chwilę się zatrzymuje, a więc jego energja kinetyczna staje się równa zeru. Czyby więc udzielona tu rzuconemu ciału energja kinetyczna zginęła? Zważmy jednak, iż w miarę wznoszenia się kamienia jego *energja potencjalna* rośnie, w chwili zaś osiągnięcia przez kamień najwyższego położenia osiąga największą wartość. W tem tkwi właśnie istota sprawy. Podczas wznoszenia się rzuconego do góry kamienia zachodzi *przemiana energji kinetycznej na potencjalną*; energja kinetyczna istotnie się zmniejsza, ale nie ginie — wzamian powstaje z niej energja potencjalna, a jak wykazuje rachunek, powstaje w ilości równoważnej, t. j. wzrasta o tyleż ergów, o ile energja kinetyczna maleje. Gdy po osiągnięciu najwyższego położenia kamień zaczyna spadać, rozpoczyna się przemiana energji w kierunku odwrotnym; teraz energja potencjalna maleje, przeistaczając się w równoważną jej energję kinetyczną. Zdawałoby się, iż ostatecznie jednak energja ginie, gdyż oto kamień spada na ziemię, zatrzymuje się i... zarówno jego energja kinetyczna, jak potencjalna stają się równe zeru. Wszakże uważne zastanowienie się zaprzecza temu. W miejscu, gdzie spada kamień, powstaje w ziemi zagłębienie, a to wymaga pewnego nakładu pracy; pracy tej właśnie dostarcza poruszający się kamień; poza tem, jak się dowiemy później, powstaje przy uderzeniu kamienia o ziemię ciepło, które jest inną jeszcze postacią energji.

Weźmy jeszcze, jako inny przykład, ruch wahadła. Gdy wychylamy wahadło z położenia równowagi, podnosimy je nieco względem pierwotnego położenia, a przez to zwiększamy jego energję potencjalną; na to właśnie wykonywamy pracę przeciw sile ciężkości. Gdy wahadło wraca do pierwotnego położenia, porusza się z coraz większą prędkością, — tu więc energja potencjalna maleje, energja kinetyczna wzrasta. Gdy wahadło przechodzi z największą prędkością przez byłe położenie równowagi, energja jego kinetyczna jest największa, zmienił się tu w nią bowiem całkowicie udzielony przez nas przyrost energji potencjalnej. Po przejściu przez położenie pionowe wahadło wychyla się w stronę przeciwną, wznosząc się z coraz to malejącą prędkością; teraz więc odwrotnie zachodzi przemiana energji kinetycznej na potencjalną. Gdyby ruch wahadła odbywał się bez wszelkich przeszkód (bez tarcia), wychylałoby się ono w obie strony na jednakowe wysokości, ruch jego trwałby bez końca, a włożona uprzednio przez nas praca przeistaczałaby się tylko bez końca pokolei z energji potencjalnej w kinetyczną i odwrotnie. Nieunikniona tarcie warunkuje stopniowy zanik wahań. Jak się dowiemy, i tu kosztem znikającej energji wahadła tworzy się ciepło, które się rozprasza w otaczającym wahadło ośrodku, czyli i tu energja nie ginie, jeno się przeistacza w inną postać.

Wróćmy do machin. Nie stwarzają one pracy, służą jedynie do tego, by pracę z jednego miejsca przenieść na inne, by ją przez to ułatwić lub udogodnić. Pracę właściwie wykonywa zawsze taki czy inny motor, a o funkcjonowaniu ważniejszych motorów dowiemy się w odpowiednim czasie. Tutaj poprzestajemy na zaznaczeniu, iż często zależy nam nie tylko na wielkości pracy, którą motor może wykonać, ale i na czasie, w którym się ona wykonywa. Stosunek pracy do czasu, w którym jest ona wykonana, nazywa się *dzielnością* albo *sprawnością.* Tak np. gdy praca 500 ergów jest wykonana w ciągu 5 sekund, mówimy, iż dzielność w danym razie wynosi

$$\frac{500 \text{ ergów}}{5 \text{ sek}} = 100 \frac{\text{erg}}{\text{sek}} = 100 \frac{\text{gr} \cdot \text{cm}^2}{\text{sek}^3} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Jednostką dzielności jest zatem $\frac{erg}{sek}$, t. j. iloraz z jednostki pracy przez jednostkę czasu.

Dzielność $\frac{\text{erg}}{\text{sek}}$ jest, oczywiście, zbyt mała, jeżeli chodzi o cele techniczne; w tych razach używa się albo jednostki, zwanej *watem* lub *kilowatem*, przyczem,

$$\left.\begin{aligned} wat\,{}^{*}) = \frac{d\dot{z}ul}{sek} = 10^7 \frac{erg\acute{o}w}{sek} = 10^7 \frac{gr \cdot cm^2}{sek^3} \\ kilowat\ (Kw) = 1000\ wat\acute{o}w, \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad (2)$$

albo jednostki, zwanej *koniem mechanicznym* (HP), przyczem

$$HP = 75 \frac{Kgm}{sek} = (\text{w przybliżeniu}) \ 736 \text{ watów} \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Przykład. Jeżeli pompa dostarcza w godzinę 500000 litrów wody, podnosząc ją na wysokość 20 metrów, to cała praca, wykonana przez pompę w ciągu godziny, stanowi 500000.20 Kgm $= 10^7$ Kgm. (W takim przybliżonym rachunku założyć możemy, iż masa jednego litra wody jest 1 Kg).

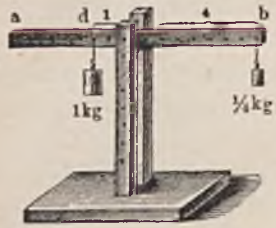
Dzielność zatem wynosi

$$\frac{10^7 \text{ Kgm}}{60 \cdot 60 \text{ sek}} = 2778 \frac{\text{Kgm}}{\text{sek}} = \frac{2778}{75} \text{ HP} = 37 \text{ HP}.$$

*) Ku uczczeniu pamięci uczonego angielskiego, który się nazywał *James Watt* (czyt. Dżems Uat) (1736—1819) i zasłynął z prac nad machiną parową.

48. Machiny proste. Dźwignia i jej różne postacie.

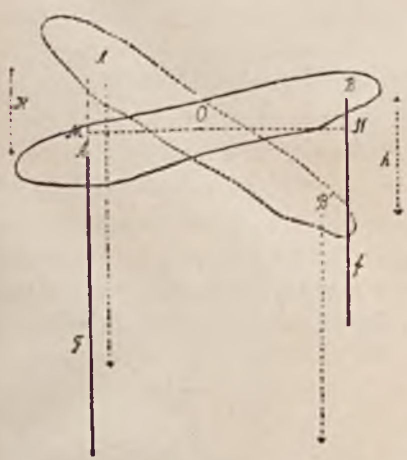
D o ś w i a d c z e n i e. Sztywny pręt (rys. 76), zaopatrzony w szereg kolców, na których dają się zawieszać ciężarki, może się obracać na osi, przechodzącej przez jego środek ciężkości. Ustawiwszy pręt poziomo, zawieszamy na nim po obu stronach osi równe odważniki i przekonywamy się, że pręt w takim tylko razie trwa dalej w równowadze, gdy oba te ciężarki przypadają w równych odległościach od osi. Natomiast gdy, tak jak na rysunku, masa, a więc i ciężar jednego z tych odważników w stosunku do drugiego jest np. 4 razy większy, należy go zawiesić cztery razy bliżej osi w porównaniu z odważnikiem mniejszym, jeżeli chcemy, by pręt zachował swe pierwotne położenie.



Rys. 76.

Każde ciało sztywne, dające się obracać dokoła pewnej osi, na którego poszczególne punkty działać mogą siły, nosi nazwę *dźwigni* i stanowi jeden z zasadniczych typów t. zw. *machin prostych.*

Rys. 77 wyobraża dźwignię, której oś *O*, jak w przypadku, przedstawionym na rys. 76, przechodzi przez jej środek ciężkości. Przypuśćmy, iż na dźwignię działają dwie równoważące się siły pionowe (ciężary zawieszonych ciał): jedna *F* w punkcie *A*, druga *f* w punkcie *B*. Odległości prostych, wskazujących swym kierunkiem kierunek działania tych sił, od osi obrotu, są to t. zw. *ramiona* sił $ON = l_f$ i $OM = l_F$. Załóżmy, iż jedna z tych równoważących się sił (np. *f*) zostaje cokolwiek zwiększona i staje się $= f + \Delta f$ (przez znak Δ — czyt. „delta" — oznaczamy „przyrost"); punkty *A* i *B* zajmują nowe położenia *A'* i *B'*; dźwignia obraca się tak, jak to zaznaczone jest na rysunku. Siła $f + \Delta f$ wykonywa tedy pracę, która się równa $(f + \Delta f) \cdot h$ (iloczynowi siły przez wartość przesunięcia miejsca jej działania w kierunku tego działania, t. j. w kierunku pionowym). Z drugiej strony siła *F* wy-



Rys. 77.

konywa wtedy pracę ujemną $F \cdot H$ — miejsce jej działania przesuwa się o wartość H w kierunku przeciwnym temu działaniu. Powiemy więc, że praca siły $f + \Delta f$ idzie: 1) na pokonanie siły F i 2) na udzielenie pewnej prędkości dźwigni (dla uproszczenia zakładamy, iż tarcia na osi niema). Im mniejszy obierzemy przyrost Δf, tem mniejsza będzie ta prędkość, a ponieważ interesuje nas tylko zależność pomiędzy wartościami równoważących się sił f i F, możemy przypuścić, iż przyrost ten obraliśmy tak mały, by można go w stosunku do f zaniedbać, a więc zaniedbać i pracę, wykonaną na wprawienie w ruch dźwigni. Z takiem zastrzeżeniem praca siły f na nic więcej nie idzie, jak na pokonanie siły F. Zgodnie więc z zasadą zachowania energji napiszemy, zakładając $\Delta f = 0$.

$$f \cdot h = F \cdot H \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

czyli

$$\frac{f}{F} = \frac{H}{h};$$

lecz oczywiście

$$\frac{H}{h} = \frac{OM}{ON} = \frac{l_F}{l_f},$$

czyli

$$\frac{f}{F} = \frac{l_F}{l_f}; \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

ostatecznie

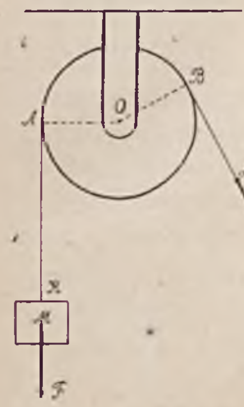
$$f \cdot l_f = F \cdot l_F, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

t. j. *równoważące się na dźwigni siły mają się do siebie w stosunku odwrotnym niż ramiona tych sił.* Z tym wnioskiem pozostaje w najściślejszej zgodzie wykonane wyżej doświadczenie; ba, opierając się na niem, możemy sprawdzić, czy wypisane na odważnikach liczby są prawdziwe. Gdybyśmy np., sprawdziwszy, że dźwignia, osadzona na osi i nieobciążona, pozostaje w równowadze obojętnej, i, zawiesiwszy w równych odległościach od jej osi dwa odważniki, na których stoi napis 500 gr na każdym, przekonali się, że równowagi niema, świadczyłoby to o nierzetelności znaków na odważnikach.

Iloczyn z siły przez jej ramię (przez odległość prostej, wyznaczającej jej kierunek, od osi obrotu) nazywa się *momentem siły* względem danej osi; wynika tedy (wzór 3), iż warunkiem równowagi dwu sił, działających na dźwignię, jest *równość momentów* tych sił.

Widzimy więc, że przez zastosowanie dźwigni możemy zaoszczędzić na sile — zapomocą mniejszej siły pokonać większą; nie możemy wszakże uzyskać oszczędności w pracy: czybyśmy np. ciało, którego ciężar stanowi siła F, podnosili bezpośrednio na wysokość H, czybyśmy dokonali tego, jak w danym przypadku, przy pomocy dźwigni mniejszą siłą f, na pracy nic nie zyskamy. W pierwszym razie praca byłaby $= F \cdot H$, w drugim $f \cdot h = F \cdot H$; zwróćmy bowiem uwagę, iż, zyskując w danym razie na sile, tracimy w tym samym stosunku na drodze (na wartości przesunięcia miejsca działania siły). Niemniej opłaca się nam często stracić na drodze (a przytem jeszcze na nieuniknionem tarciu), byle móc dokonać pracy przy pomocy mniejszej siły (np. gdy mamy podnieść ciało o masie 100 Kg, podczas gdy mięśnie nasze pozwalają nam dźwignąć w górę zaledwie ok. 25 Kg).

Rys. 78 wyobraża t. zw. *blok nieruchomy*. W nieruchomej oprawie osadzony jest na osi krążek drewniany lub metalowy z wyżłobieniem na obwodzie; przez ten żłobek przechodzi sznur, na którego końce K i L działają: z jednej strony siła, którą mamy pokonać, np. ciężar zawieszonego ciała, z drugiej — siła, która ma tę pracę wykonać, np. siła mięśni ludzkich. Widać odrazu, że blok taki jest dźwignią, przytem t. zw. *równoramienną*, gdyż ramiona OA i OB obu sił działających są równe. Wynika stąd, że warunkiem równowagi sił f i F jest ich równość. Dajmy teraz sile f najmniejszy chociażby przyrost, a poczniemy przez to unosić ciało M do góry. W rzeczywistości przyrost ten nie może być zbyt mały, chodzi bowiem jeszcze o pokonanie nieuniknionego tarcia. Jak widzimy, blok nieruchomy nie daje żadnej oszczędności na sile, gdyż do pokonania siły F trzeba użyć cokolwiek większej siły f. Mimo to jednak, przyrząd ten jest bardzo pożyteczny, pozwala bowiem zmieniać kierunek siły działającej, np. zamiast skierowywać ją do góry, jak w przypadku bezpośredniego podnoszenia ciała, nadać jej kierunek ku dołowi. Udogodnienie to wyzyskuje np. robotnik przy budowie domu, podając cegły przy pomocy bloku, umocowanego u szczytu budowli; w ten sposób oszczędza on sobie pracy dźwigania swego ciała do góry, co byłoby nieuniknione przy noszeniu cegieł.

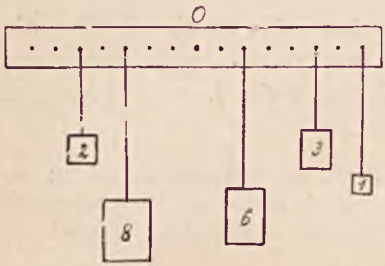


Rys. 78.

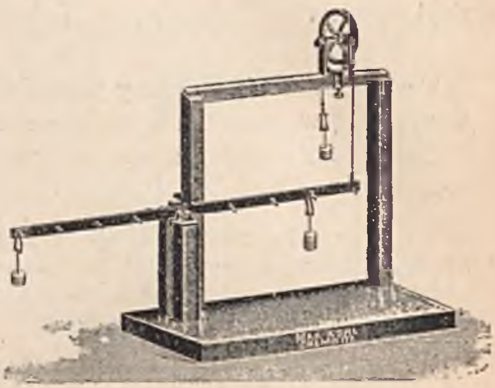
Momentom sił, obracających dźwignię w dwie przeciwne strony, przypisywać możemy przeciwne znaki (+ i —). Jako warunek równowagi sił, działających na dźwignię, możemy zatem podać, że *suma momentów tych sił winna się równać zeru*. Twierdzenie to możemy uogólnić na dowolną liczbę sił, działających na dźwignię.

Ćwiczenie 19. Zawieście na dźwigni z obu stron osi kilka różnych odważników, tak, by dźwignia pozostawała w równowadze (rys. 79), i sprawdźcie, że suma momentów wszystkich sił równa się wówczas zeru. Doczepiając do jednego z odważników mały odważnik dodatkowy, wyznaczcie graniczną wartość momentu dodatkowego, po którego przekroczeniu zostanie równowaga zakłócona. To pozwoli wam ocenić wpływ tarcia.

Ćwiczenie 20. Uczyńcie to samo, co w ćwiczeniu 19-em, używając wszakże sił, skierowanych w strony przeciwne i działających po jednej stronie osi obrotu



Rys. 79.



Rys. 80.

dźwigni (jak na rys. 80). Sprawdźcie i w tym przypadku zgodność z prawem momentów, nie zapominając, że jednakowe znaki (+ albo —) przypisujecie momentom tych sił, które warunkują obrót w tę samą stronę. Zbadajcie, jak w ćwiczeniu 19 wpływ tarcia.

Na rys. 81 mamy *blok ruchomy A* w połączeniu z poznanym przed chwilą nieruchomym *B*. Krążek z wyżłobieniem na obwodzie zawieszony jest na sznurze, przerzuconym również przez blok nieruchomy; jeden koniec *K* sznura umocowany jest nieruchomo, drugi zaś *L* służy jako miejsce działania siły *f*, wykonywającej pracę; na oprawie, osadzonej na osi bloku *A*, wisi ciało, które mamy podnieść. Działaniem siły *f* ściągamy sznur z bloku nieruchomego *B*, przez co blok *A* podnosi się wraz z zawieszonem na nim ciałem do góry. Znajdźmy, jakiej siły *f* potrzeba dla pokonania oporu *F*. O ile te siły się równoważą, najmniejszy bodaj przyrost Δf pociągnie za sobą podnoszenie się ciała *M*. Jeżeli przytem koniec *L* sznura przesunie się o długość *l*, ruchomy blok oczywiście podniesie się zaledwie o $\frac{l}{2}$; również $\frac{l}{2}$ będzie przesunięciem miejsca działania siły *F* w kierunku przeciwnym jej działaniu. Praca, wykonana przez siłę, działającą na koniec *L* sznura, równa się $(f + \Delta f) \cdot l$; lecz, jak już tłumaczyliśmy, ten przyrost Δf może być tak mały, by go w rachubę nie brać (zakładając dla uproszczenia, że niema tarcia), czyli pracę tę można uważać za równą $f \cdot l$; kosztem tej pracy pokonywa się opór siły F na drodze $\frac{l}{2}$,

czyli
$$f \cdot l = F \cdot \frac{l}{2},$$

skąd
$$f = \frac{F}{2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

Jak widzimy, blok ruchomy pozwala zaoszczędzić na sile dwukrotnie. Oczywiście w urządzeniu, zaznaczonem na rys. 81, blok nieruchomy służy tylko do nadania wygodnego kierunku sile f, wykonywającej pracę.

Ćwiczenie 21. Sprawdźcie na przyrządzie, wyobrażonym na rys. 81, zależność, wyrażoną we wzorze (4), zawieszając na bloku ruchomym różne odważniki i równoważąc je innemi, zawieszonemi na końcu sznura L. Zbadajcie, jak w ćwiczeniu 19, wpływ tarcia.

Jeden ze sposobów łączenia bloków w układy złożone — wielokrążki — przedstawia rys. 82. Mamy tu kombinację 3 bloków ruchomych z nieruchomym. Rozumując, jak wyżej, zauważymy, iż przesunięcie się pod działaniem siły poruszającej swobodnego końca sznura o l jednostek długości pociąga za sobą podniesienie się najbliższego bloku o $\frac{l}{2}$; to ostatnie powoduje podniesienie się bloku drugiego o połowę tej wartości, t. j. o $\frac{l}{4} = \frac{l}{2^2}$; to znów zkolei rzeczy powoduje podniesienie się bloku 3-go o połowę ostatniej wartości, t. j. o $\frac{l}{8} = \frac{l}{2^3}$. Równanie na pracę otrzymujemy jak wyżej

$$f \cdot l = F \cdot \frac{l}{2^3},$$

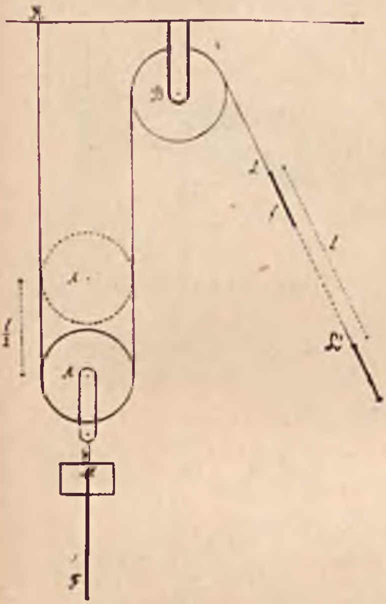
czyli
$$f = \frac{F}{2^3},$$

ogólnie zaś
$$f = \frac{F}{2^n}, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

gdzie n oznacza liczbę bloków ruchomych.

Tego więc rodzaju wielokrążki pozwalają (bez uwzględnienia tarcia) do pokonania siły F użyć siły tyle razy mniejszej, ile stanowi 2, podniesione do potęgi, równej liczbie bloków ruchomych.

Inny system bloków złożonych przedstawiony jest na rys. 83. Widzimy tu 3 bloki nieruchome we wspólnej oprawie, oraz tyleż bloków ruchomych we wspólnej oprawie. Z nawinięcia sznura widać, że, o ile swobodny koniec sznura pod działaniem siły f przesunie się o l jednostek długości, ciało podniesie się zaledwie o $\frac{l}{6}$, t. j. na wysokość tyle



Rys. 81.

Rys. 82.

Rys. 83.

razy mniejszą, ile wynosi razem liczba bloków ruchomych i nieruchomych. Równanie na pracę będzie (przez f i F oznaczamy to samo co wyżej)

$$f \cdot l = F \cdot \frac{l}{6},$$

czyli

$$f = \frac{F}{6}$$

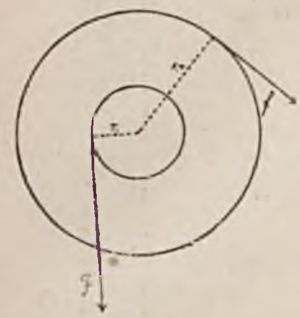
lub ogólnie

$$f = \frac{F}{n}, \qquad (6)$$

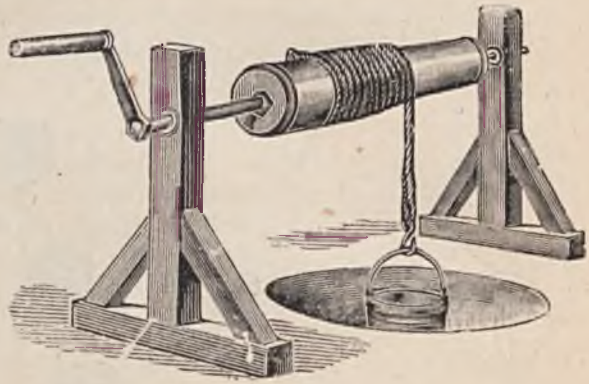
gdzie n przedstawia ogólną liczbę bloków wielokrążka. Podkreślić tu wszakże należy, iż w wielokrążkach tarcie jest znaczne i rachunek powyższy pozwala tylko w przybliżeniu zdać sobie sprawę z wartości sił, potrzebnych do wykonania pracy.

Ćwiczenie 22. Sprawdźcie przy pomocy odważników słuszność wzorów (5) i (6) dla wielokrążków (bez uwzględnienia tarcia). Zbadajcie, jak wyżej, wpływ tarcia.

Ćwiczenie 23. Zaprojektujcie i zbudujcie sami z danych wam bloków wielokrążki, obliczcie dla nich oszczędność na sile i sprawdźcie przewidywane wyniki doświadczalnie. Zbadajcie, jak wyżej, wpływ tarcia.



Rys. 84.



Rys. 85.

Rys. 84 przedstawia przekrój schematyczny t. zw. *kołowrotu*, wyobrażonego na rys. 85; właściwie mamy tu do czynienia z dźwignią: pokonywamy siłę F o ramieniu r_1 przy pomocy siły f o ramieniu r_2; zgodnie z wyjaśnioną regułą

$$f \cdot r_2 = F \cdot r_1 ,$$

czyli

$$f = \frac{r_1}{r_2} F \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

t. j. do zrównoważenia siły F użyć możemy siły tyle razy mniejszej, ile razy promień koła, na którego obwód działa siła f, jest większy od promienia wału, na którego obwód działa siła F (tarcia nie uwzględniamy).

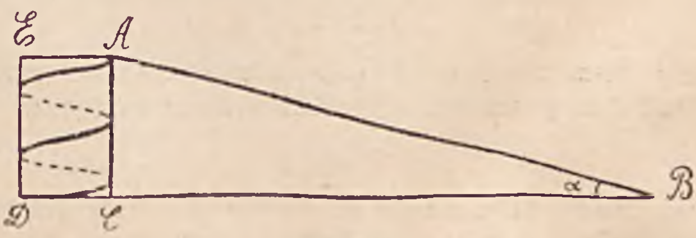
49. Machiny proste. Równia pochyła i jej różne postacie.

Drugim typem zasadniczym machin prostych jest *równia pochyła*, o której mówiliśmy już w art. 44. Pragnąc podnieść ciało na pewną wysokość względem pierwotnego położenia, możemy dokonać tego, wciągając ciało po równi pochyłej i używając przytem siły tyle razy mniejszej od ciężaru podnoszonego ciała, ile razy wysokość równi jest mniejsza od jej długości.

D o ś w i a d c z e n i e. Przyrząd, przedstawiony na rys. 86, pozwala zmieniać kąt pochylenia równi względem poziomu i mierzyć zarówno długość jak odpowiadającą jej wysokość równi. Zważywszy uprzednio spoczywający na równi walec i kładąc na zważonej również szalce, połączonej z walcem przy pomocy przerzuconego przez blok sznura, odważniki, tak, by masa, a więc i ciężar szalki i odważników był tyle razy mniejszy od masy, wzgl. ciężaru walca, ile razy wysokość równi jest mniejsza od jej długości, przekonywamy się, że istotnie walec pozostaje wtedy zrównoważony w każdem miejscu na równi; stosując cokolwiek większą siłę, możemy nią już wciągnąć walec do góry, przyczem będziemy mieli do pokonania nieuniknione tarcie. Równia zatem ułatwia nam, podobnie jak dźwignia, wykonanie pracy, pozwalając stosować mniejszą siłę od ciężaru podnoszonego ciała; zyskując wszakże tu na sile, tracimy znowu na drodze, jak to było wytłumaczone w art. 48 w stosunku do dźwigni; na pracy zatem nic nie możemy zaoszczędzić.

Rys. 86.

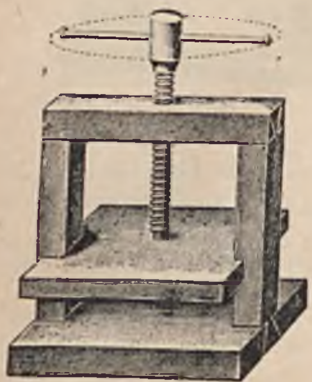
Ć w i c z e n i e 24. Zważywszy walec i szalkę przyrządu, wyobrażonego na rys. 86, ustawcie równię pod dowolnym kątem względem poziomu, obliczcie jakiemi odważnikami należy obciążyć szalkę dla zrównoważenia walca i sprawdźcie swoje przewidywania doświadczalnie. Spróbujcie, czy niewielkie dodatkowe obciążenie szalki zakłóci osiągniętą równowagę. Wyznaczcie wartość graniczną tego dodatkowego obciążenia, powyżej której zachodzi bezwzględnie zakłócenie równowagi. Da to wam wyobrażenie o roli tarcia w tem zjawisku.



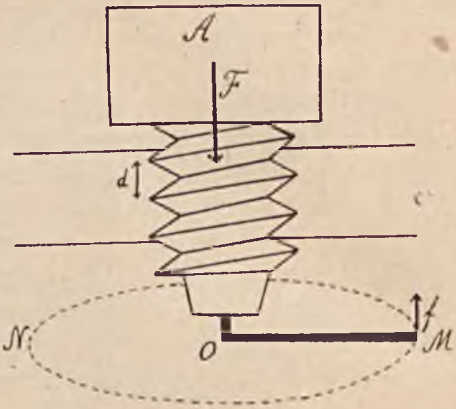
Rys. 87.

Łatwo wykazać, że do równi pochyłej sprowadza się inny często używany przyrząd, a mianowicie *śruba*. Nawińmy na walec trójkąt prostokątny, wycięty z papieru, jak to przedstawia rys. 87.

Przeciwprostokątna AB utworzy na powierzchni walca t. zw. *linję śrubową.* O ile według tej linji zrobimy na walcu odpowiednie nacięcie, zaopatrzymy go w główkę lub rękojeść do kręcenia, do tego sporządzimy jeszcze naśrubek (p. str. 5), otrzymamy znaną już nam *śrubę* (rys. 8). Widzieliśmy już zastosowanie tego przyrządu do mierzenia długości; tu zwrócimy uwagę na rolę jego przy wykonywaniu pracy. Śruba pozwala na znaczne zaoszczędzenie siły, o czem wie każdy, kto



Rys. 88.



Rys. 89.

miał do czynienia z kopjałem (rys. 88) lub inną prasą, zaopatrzoną w śrubę: nieznacznym wysiłkiem mięśni wykonywamy potężne względnie działanie. Dla zorjentowania się w tem przypuśćmy, iż z pomocą śruby chcemy podnieść ciało A, jak na rys. 89. Oznaczmy ciężar ciała przez F; gdy, posługując się siłą f, dokonywamy jednego obrotu śruby, siła f, której kierunek zakładamy stycznym do obwodu koła, zakreślonego przez miejsce jej działania $(OM = l)$, wykonywa pracę

$$f \cdot 2\pi l;$$

ponieważ przytem ciało A zostaje podniesione o jeden skok śruby, t. j. na wysokość d, na podniesienie tego ciała wykonywa się praca

$$F \cdot d.$$

Pominąwszy tarcie, które, nawiasem mówiąc, dla śruby jest znaczne, powiemy, że praca siły f na podniesienie ciała jest

$$F \cdot d = f \cdot 2\pi l,$$

czyli
$$f = F \frac{d}{2\pi l};$$

ponieważ skok śruby jest zazwyczaj bardzo mały w porównaniu z obwodem główki śruby, lub wogóle z obwodem, zakreślanym przez koniec poruszającej ją rękojeści, przeto f stanowi mały ułamek F.

Podobnie zaoszczędzamy na sile, gdy zamiast się wspinać na górę wprost ku jej szczytowi, idziemy po jej powierzchni drogą śrubową, wznosząc się po łagodnej pochyłości.

Inne ważne zastosowanie równi pochyłej mamy w t. zw. *klinie* (rys. 90), którego używamy np. do rozsadzania kawałków drzewa, a którego postacią najpopularniejszą jest nóż.

Rys. 90.

Im węższy jest klin, t. j. im kąt a jest mniejszy (z rysunku bezpośrednio widać, jaki jest związek klina z równią pochyłą), tem łatwiej, jak wiemy, klin wchodzi do ciała rozszczepianego, t. j. tem mniejszej siły trzeba do wepchnięcia go w przedmiot rozsadzany; lecz z drugiej strony, im jest on węższy, tem mniej rozsuwa części dzielonego przedmiotu — tracimy na drodze; a więc i tu mamy znaną już zależność pomiędzy czynnikami pracy: siłą i drogą.

50. Waga.

Jedno z ważniejszych zastosowań dźwigni znajdujemy w *wadze*. Rys. 91 przedstawia schematycznie wagę, rys. 92 zaś jej zasadniczą część, t. zw. *belkę*. Belka, osadzona na osi O, posiada budowę symetryczną względem płaszczyzny, przechodzącej przez oś prostopadle do długości belki. Oś tę stanowi krawędź trójkątnego pryzmatu stalowego, zwróconego tą krawędzią ku dołowi i opierającego się na odpowiedniej podstawce z bardzo twardego materjału, najczęściej z agatu. Aby belka pozostawała w równowadze stałej, środek ciężkości jej wraz z szalkami przypada cokolwiek poniżej osi O (rys. 92); u końców belki w M i N osadzone są również pryzmaty stalowe, zwrócone ostrzami do góry — na nich zawieszają się *szalki* wagi. Przy nieobciążonych szalkach belka powinna pozostawać poziomą — wnosi się o tem z położenia wskazówki t (rys. 91), połączonej z belką i przesuwającej się przy pochyleniu belki wzdłuż skali m. Ostrza O, M i N (rys. 92) powinny leżeć w jednej płaszczyźnie, odległości zaś OM i ON muszą być równe.

Gdy na jedną szalkę położymy jakikolwiek przedmiot, a na drugą odważniki, będziemy mieli działanie ciężarów tych ciał odpowiednio na ostrza M i N. O ile $OM = ON$, t. j. belka jest dokładnie równoramienna, warunkiem równowagi sił f_1 i f_2 jest

$$f_1 = f_2.$$

Przypuśćmy, iż masa ciała ważonego jest M, masa zaś odważników, które równoważą to ciało, m; wówczas

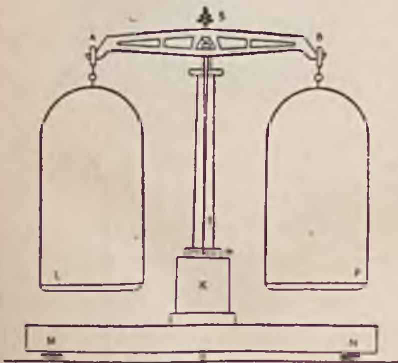
$$f_1 = Mg; \qquad f_2 = mg,$$

gdzie g oznacza przyśpieszenie grawitacyjne w danem miejscu;

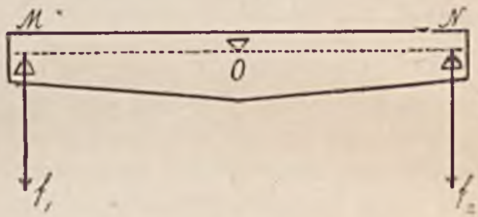
zatem $$Mg = mg$$

lub po skróceniu $$M = m, \qquad \qquad (1)$$

t. j. masa danego ciała równa się znanej masie odważników. Widzimy więc, że waga pozwala nam znaleźć masę ciała i właśnie jako przyrząd do mierzenia mas oddaje ogromne usługi (por. art. 9).



Rys. 91.



Rys. 92.

Łatwo zauważyć, że, dając nam wartość masy ciała, waga wcale nas nie poucza o jego ciężarze. Wszak wartość przyśpieszenia ruguje się z naszego wzoru (1). Gdybyśmy np. po zrównoważeniu wagi w jednem miejscu, przenieśli ją wraz z tem samem ciałem i odważnikami, leżącemi na szalkach, do innego miejsca, gdzie natężenie ciężkości jest inne, belka pozostawałaby poziomą w dalszym ciągu, zmieniłyby się bowiem jednakowo ciężary danej masy i odważników.

Na to, by waga była *rzetelna,* t. j. by istotnie masa odważników, równoważących ciało, była równa jego masie, trzeba, by ramiona OM i ON (rys. 92) były dokładnie równe. O równości ramion przekonać się można, równoważąc jedno i to samo ciało, położone to na jednej, to na drugiej szalce wagi; o ile w obu razach masa odważników jest ta sama, belka jest równoramienna. Najczęściej jednak tak nie bywa; to też dokonywamy zazwyczaj t. zw. *podwójnego* ważenia, t. j. kładziemy ciało najpierw na jednej, potem na drugiej szalce, a na wartość masy mierzonej przyjmujemy średnią z wartości odważników, równoważących ciało w pierwszym i drugim razie *). Zauważmy jeszcze, iż o równowadze wagi wnosimy zazwyczaj nie z tego, czy wskazówka stoi na tej podziałce skali, którą wskazuje przy szalkach nieobciążonych, a z tego, czy *belka waha się około tego położenia*; innemi słowy obserwujemy belkę nie w spoczynku, a w ruchu — unikamy w ten sposób zakłócającego wpływu tarcia na osi.

Zadania.

36. Na pokonanie tarcia przy przesuwaniu przedmiotu po płaszczyźnie poziomej użyć trzeba siły 390 dyn. Znaleźć wartość pracy, potrzebnej do przesunięcia tego przedmiotu na drodze 2 m.

37. Na pokonanie tarcia przy popychaniu wozu po drodze poziomej użyć należy siły = 0,01 ciężaru wozu. Jaką pracę się wykonywa podczas przebycia przez ten wóz drogi = 3 Km, jeżeli masa wozu wraz z ładunkiem wynosi 1 tonnę, w danem zaś miejscu $g = 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$? Jaka tu jest dzielność motoru poruszającego, jeżeli przewiezienia tego dokonywa się w ciągu godziny?

38. Znaleźć wartość pracy (w ergach, dżulach i Kgm), potrzebnej do podniesienia bardzo powolnym ruchem ciała o masie 9,2 Kg na wysokość 3,5 m w miejscu, gdzie $g = 980 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$.

39. Na jaką wysokość podnieść należy 40 Kg, by praca, wykonana przytem, była równa pracy na podniesienie 60 Kg na 8 m w tem samem miejscu i tym samym powolnym ruchem.

40. Na jaką wysokość podniesiono 10 Kg, jeżeli praca, wykonana przytem $= 10^{12}$ ergów, zaś $g = 980 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$?

41. Motor porusza pompę, dostarczając na minutę 1000 litrów wody na wysokość 7 metrów, przyczem na pokonanie wszelkich szkodliwych oporów musi wykonać pracę, stanowiącą 20% tej pracy użytecznej. Ile HP wynosi dzielność motoru?

42. Znaleźć wartość pracy (w ergach, dżulach i Kgm), potrzebnej na nadanie masie 3 Kg, pozostającej początkowo w spoczynku, prędkości $15 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$.

---

*) Inny, mniej używany, sposób polega na tem, iż ciało ważone kładziemy na jednej szalce i równoważymy, obciążając czemkolwiek (np. śrutem) drugą szalkę; potem z pierwszej szalki usuwamy ważone ciało i kładziemy odważniki dopóty, dopóki nie zrównoważą one tego, co zostało położone i w dalszym ciągu leży na drugiej szalce. Oczywiście ciężar tych odważników i ciężar danego ciała wywierają tu w obu razach działania równe, a zatem są równe; z równości zaś ciężarów znowu, jak wyżej, wnosimy o równości mas ($f = F$, $mg = Mg$; czyli $m = M$).

43. Masa 100 gr porusza się z przyśpieszeniem 100 $\frac{cm}{sek^2}$. Jaką pracę wykonywa siła, działająca na ciało, podczas gdy ciało przebywa drogę 10 cm?

44. Kula o masie 4 Kg, poruszająca się z prędkością 80 $\frac{m}{sek}$, uderza w wał, usypany z ziemi, i wchodzi weń na głębokość 2 m. Jaka jest przeciętna wartość siły, powstrzymującej tu ruch kuli?

45. Kula o masie 10 gr, poruszając się z prędkością 200 $\frac{m}{sek}$, uderza w płytę, a wychodzi po przebiciu jej z prędkością 40 $\frac{m}{sek}$; jaka praca jest tu wykonana na przebicie płyty?

46. Jakie machiny proste możemy rozpoznać w wiośle, kluczu, dziadku do orzechów, nożu, nożyczkach?

CZĘŚĆ TRZECIA

DYNAMICZNE WŁASNOŚCI CIAŁ.

51. Parcie; ciśnienie.

Przyciskając palec do stołu, poddajemy stół parciu. Podobnie woda w szklance, dzięki swemu ciężarowi, prze na dno i ściany szklanki; przedmiot, zanurzony w cieczy, podlega parciu ze wszystkich stron. *Parciem* tedy nazywamy *działanie siły, przypadające na jakąkolwiek powierzchnię* (powierzchnię zetknięcia stołu z palcem, powierzchnię dna lub ścian szklanki, powierzchnię ciała zanurzonego). Parcie mierzy się w takich samych jednostkach, w jakich się mierzy siła, t. j. *w dynach.*

Ciśnieniem nazywamy stosunek parcia do powierzchni, na którą ono działa. Oznaczmy parcie przez P, ciśnienie przez p, powierzchnię przez S; wtedy

$$p = \frac{P}{S} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Przypuśćmy, iż ciało w kształcie prostopadłościanu stoi na stole, oparte raz na mniejszej powierzchni S_1, drugi raz na większej S_2, jak to przedstawia rys. 93 (a i b). Parcie, wywierane przez to ciało na podstawę, równa się jego ciężarowi; w obu więc razach jest ono jednakowe (P). Wszakże w pierwszym przypadku działa ono na mniejszą powierzchnię S_1, w drugim — na większą S_2; zatem w pierwszym razie ciśnienie $p_1 = \frac{P}{S_1}$ jest większe niż w drugim $p_2 = \frac{P}{S_2}$.

Przypuśćmy, iż ciężar danego prostopadłościanu równa się jednej megadynie, t. j. $P = 10^6$ dyn, $S_1 = 10\ \mathrm{cm}^2$, zaś $S_2 = 200\ \mathrm{cm}^2$; wówczas

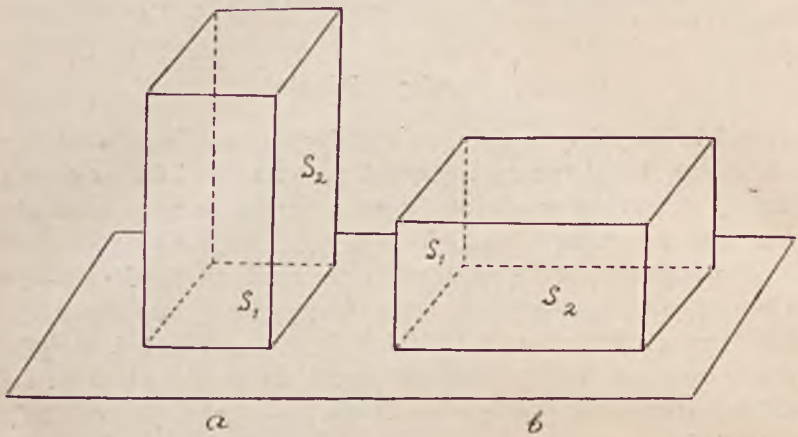
$$p_1 = \frac{10^6\ \mathrm{dyn}}{10\ \mathrm{cm}^2} = 10^5\ \frac{\mathrm{dyn}}{\mathrm{cm}^2};$$

$$p_2 = \frac{10^6\ \mathrm{dyn}}{200\ \mathrm{cm}^2} = 5.10^3\ \frac{\mathrm{dyn}}{\mathrm{cm}^2}.$$

Ciśnienie więc mierzy się w jednostkach innych, niż dotychczas znane, a mianowicie jednostką ciśnienia jest

$$1\,\frac{dyna}{cm^2} = 1\,\frac{gr\,.\,cm}{sek^2\,.\,cm^2} = 1\,\frac{gr}{cm\,.\,sek^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Gdy, używając tego samego wysiłku mięśniowego, przyciskamy do stołu raz dłoń, drugi raz ostrze trzymanego w ręku gwoździa, parcie, wywarte w obu razach, jest jednakowe, ale ciśnienie w drugim razie



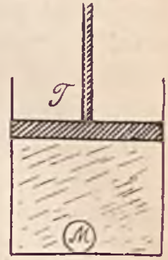
Rys. 93.

jest daleko większe — w pierwszym bowiem działanie stosowanej siły rozmieszcza się na wielkiej względnie powierzchni dłoni, w drugim — ześrodkowuje się na bardzo małej powierzchni ostrza. Im bardziej ostry jest gwóźdź, tem mniejszej siły trzeba do wytworzenia takiego ciśnienia, które powoduje zagłębianie się gwoździa w stół czy ścianę. Z tych samych powodów łatwiej jest krajać ostrym niż tępym nożem. Z drugiej strony tam, gdzie zależy na zmniejszeniu ciśnienia, zwiększamy powierzchnię, podlegającą parciu; na tem np. polega jazda na nartach (dlaczego?).

52. Odkształcenie i sprężystość. Granice sprężystości i wytrzymałości.

Ciało swobodne, poddane parciu jednostronnemu, porusza się ruchem przyśpieszonym. Jeżeli jednak ciało podlega parciu z różnych stron, może się zdarzyć, że niema przyśpieszenia wypadkowego, np. jeżeli parciu z jednej strony towarzyszy równe co do wielkości, lecz odwrotne co do kierunku parcie ze strony przeciwnej; wtedy ulega naogół zmianie postać i objętość ciała, czyli — jak się mówi — ciało ulega *odkształceniu*. Zależnie od tego, którą z tych zmian mamy na myśli, mówimy *o odkształceniu postaci* albo *odkształceniu objętości*.

Ściskając w ręce piłkę gumową, poddajemy ją odkształceniu postaci i objętości. Zdarza się wszakże, że zachodzi tylko jedno z tych dwu typowych odkształceń. Np. jeżeli kulę jednorodną M (rys. 94) umieścimy w naczyniu walcowem, wypełnionem cieczą, i wywrzemy parcie za pośrednictwem tłoka T, to, jak się dowiemy niebawem, parcie tłoka, przeniesione przez ciecz, rozmieści się jednostajnie po powierzchni kuli, t. j. we wszystkich miejscach tej powierzchni otrzymamy jednakowe ciśnienia, dzięki czemu tylko objętość kuli zmniejszy się, ale nie zmieni ona postaci — pozostanie kulą.

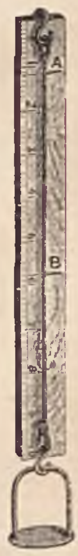


Rys. 94.

Odkształcenie otrzymuje się zawsze pod działaniem sił, działających na pewnej powierzchni, czyli *odkształcenie idzie zawsze w parze z ciśnieniem, jest wynikiem ciśnienia.*

Terminem „ciśnienie“ posługujemy się również w przypadku, gdy ciało odkształcamy przez *rozciąganie*. Np. jeżeli rurkę kauczukową (rys. 95), umocowaną u jednego końca, obciążymy u końca drugiego, będziemy ją *rozciągali*; w tym przypadku stosunek siły działającej (ciężaru ciała, zawieszonego na rurce) do przekroju rurki nazywamy *ciśnieniem ujemnem* albo *napięciem*.

D o ś w i a d c z e n i e. Rurkę gumową, zawieszoną przed skalą i zaopatrzoną u dołu w szalkę, jak na rys. 95, przetykamy dwiema igłami A i B tak, że igły te trzymają się poziomo, wskazując swemi końcami na pewne kreski skali. Notujemy odległość między A i B i kładziemy na szalce jakikolwiek odważnik, dobierając jego wielkość tak, by się otrzymało niewielkie wydłużenie rurki. Notujemy teraz odległość między A i B, a stwierdziwszy, że jest większa, niż była poprzednio, usuwamy z szalki położony odważnik. Przekonywamy się, że igły A i B wracają do swych pierwotnych położeń.



Rys. 95.

Powtarzamy to samo doświadczenie, używając obciążenia większego. Okazuje się (przy odpowiedniej wartości obciążenia), że po usunięciu obciążenia igły A i B niezupełnie wracają do pierwotnych położeń, że pozostaje pewne zwiększenie pierwotnej odległości A i B i że dopiero stopniowo w ciągu szeregu godzin, a czasem i dni, to wydłużenie zupełnie znika.

Ciała stawiają wogóle opór wszelkim odkształceniom, a po usunięciu sił odkształcających tracą w większej lub mniejszej mierze nabyte odkształcenia. Własność tę ciał nazywamy *sprężystością* i odpowiednio do rodzaju odkształcenia mówimy o *sprężystości postaci* lub *sprężystości objętości*. Gdy obserwujemy po usunięciu sił odkształcających stopniowe z biegiem czasu powracanie ciała odkształconego do stanu, poprzedzającego odkształcenie, mówimy, że zachodzi *opóźnienie sprężyste*.

Bywa, iż po usunięciu sił odkształcających ciało odkształcone nie wraca już do stanu pierwotnego, a zachowuje *odkształcenie trwałe*; gdy np. rurkę kauczukową zanadto rozciągniemy, to po ustaniu działania sił odkształcających nie odzyska ona już całkowicie swej pierwotnej długości, a pozostanie dostrzegalnie dłuższą, niż była przed odkształceniem. Powiadamy, iż przekroczyliśmy wtedy *granicę sprężystości*. Granica ta przypada bardzo rozmaicie w różnych ciałach — jedne należy do tego poddać znacznemu odkształceniu, dla innych granica ta zostaje przekroczona przy bardzo małem odkształceniu; do takich należą ciała *plastyczne* (wosk, glina), które mają bardzo niską granicę sprężystości postaci.

Powiększając jeszcze odkształcenie po przekroczeniu granicy sprężystości, spowodować możemy rozerwanie, pęknięcie lub złamanie ciała odkształcanego — powiadamy, iż przekraczamy wtedy *granicę wytrzymałości* ciała. W pewnych ciałach obie wymienione granice (sprężystości i wytrzymałości) leżą daleko jedna od drugiej (kauczuk); w innych natomiast blisko — nieznaczne powiększenie odkształcenia po przekroczeniu granicy sprężystości powoduje złamanie lub zerwanie; te ostatnie ciała nazywamy *kruchemi* (szkło).

Znajomość granicy sprężystości oraz wytrzymałości różnych ciał posiada wielkie znaczenie praktyczne; bez takiej znajomości np. niesposób nic budować; to też dla inżynierów nauka o sprężystości i wytrzymałości materjałów posiada podstawowe znaczenie.

Ćwiczenie 25. Połóżcie pokolei na szalce przyrządu, wyobrażonego na rys. 95, różne odważniki; zanotujcie odpowiadające im odległości AB między igłami; obliczcie *wydłużenia*, t. j. różnice między odległościami igieł A B, gdy szalka jest obciążona oraz gdy jest nieobciążona, i wypiszcie otrzymane wyniki w tabelce następującej

obciążenie				
wydłużenie				

Przedstawcie wynik ćwiczenia wykreślnie, odmierzając na osi x-ów obciążenia, a na osi y-ów odpowiadające im wydłużenia.

Wykonawszy ćwiczenie 25, zobaczycie, iż odpowiadające sobie liczby obu wierszy pozostają w stosunku prostej proporcjonalności (o ile nie została przekroczona granica sprężystości — jak to się poznaje?). Jeżeli obciążenie oznaczymy przez p, wydłużenie zaś przez $\Delta\, l$ (symbolem Δ, jak już wzmiankowaliśmy wyżej, oznaczamy „przyrost"), będziemy mogli napisać

$$\Delta l = kp\,, \qquad \qquad (1)$$

gdzie k jest pewnym spółczynnikiem proporcjonalności. Zależność taką nazywamy *linjową*, gdyż wykreślnie przedstawia ją linja prosta. Moglibyśmy powtórzyć ćwiczenie 25, używając zamiast rurki kauczukowej sprężyny takiej, jakie mamy w dynamometrach. Uzasadnia to budowę dynamometrów i wag sprężynowych.

Wzór (1) odczytujemy tak: wydłużenie jest proporcjonalne do obciążenia. Mamy w tem przypadek szczególny zależności ogólniejszej: *odkształcenie jest proporcjonalne do ciśnienia*, o ile nie zostaje przekroczona granica sprężystości. To twierdzenie ogólne nosi nazwę *prawa Hooke'a* (czyt. Huka).

53. Ciała stałe, ciekłe, gazowe.

Wszystkie bez wyjątku ciała posiadają zupełnie wyraźną sprężystość objętości: wszystkie mniej lub więcej opierają się zmianom objętości. Inaczej rzecz się ma z postacią. Dla pewnych ciał postać jest czemś zupełnie określonem, czego zmianie ciało stawia znaczny opór — takie ciała nazywamy *stałemi*. Inne ciała nie mają żadnej charakterystycznej dla nich postaci, przystosowując się do postaci ciał, które je w sobie zawierają — takie ciała nazywamy ogólnie *płynami*. Kawałek metalu, cukru, drzewa, szkła (niezależnie od ich postaci przypadkowej lub celowo im nadanej) — oto przykłady ciał stałych; każde z nich ma pewną postać i zmianie tej postaci naogół znacznie się opiera. Woda, mleko, powietrze tej cechy nie posiadają; gdy myślimy o tych ciałach, nie wiążemy z niemi wyobrażenia o żadnej określonej postaci; jedynie pomyśleć możemy o postaci zawierających owe ciała naczyń (nie mówimy wobec tego „kawałek mleka" albo „kawałek powietrza"). Takie ciała zaliczamy do kategorji płynów, rozróżniając wśród nich *ciecze*, które występować mogą w postaci kropel i posiadają *swobodną powierzchnię*, oraz *gazy*, które w postaci kropel nie występują i swobodnej powierzchni nie posiadają, wypełniając całą pojemność każdego naczynia, w którem je umieszczamy. Bardzo niedawno wysoce subtelne pomiary wykazały, że i ciecze stawiają pewien opór zmianom postaci, t. j.. że posiadają pewną *sztywność*; wszakże wartość tej sztywności jest tak mała, iż w większości wypadków można ją zupełnie pominąć. Wzięte pod jednakowem a niezbyt wielkiem ciśnieniem ciecze i gazy zdradzają niejednakową sprężystość objętości — podczas gdy ciecze są bardzo mało ściśliwe, gazy poddają się względnie łatwo zmianom objętości; np. gdy zechcemy wepchnąć szczelnie dopasowany do cylindra tłok, podczas gdy pod tłokiem cylinder jest całkowicie wypełniony wodą, napotkamy olbrzymi opór; natomiast popchniemy tłok nieznacznym wysiłkiem, skoro pod tłokiem w cylindrze znajduje się takie powietrze, jakie nas otacza.

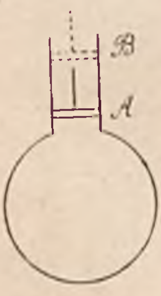
Na zasadzie powyższego *ciałami stałemi nazywamy takie, które posiadają sprężystość objętości i sprężystość postaci; ciałami cieklemi* lub *cieczami te, które mają tylko sprężystość objętości* (naogół bardzo znaczną) *i wykazują zjawisko swobodnej powierzchni*; wreszcie *ciałami gazowemi lub gazami te, które mają tylko sprężystość objętości, ale swobodnej powierzchni nie wykazują.*

Jak każda klasyfikacja, i ta jest niezupełnie ścisła — niema bowiem żadnych ostro zarysowanych granic pomiędzy temi trzema kategorjami ciał. Lód np. każdy nazwie ciałem stałem, a jednak w lodowcach mamy istne rzeki lodowe, gdzie lód, podobnie jak woda, *płynie,* przystosowując się swym kształtem do łożyska, to rozlewając się szerzej, to znów sięgając głębiej, słowem, zachowuje się podobnie jak woda. Różnica polega na prędkości, z jaką to przystosowywanie się zachodzi — podczas gdy woda w niezbyt wartkiej rzece posiada prędkość 0,5 — 0,8 $\frac{m}{sek}$, t. j. w ciągu doby przebyć może drogę ok. 50 Km, lód w lodowcu w ciągu *roku* posuwa się o jakie kilkadziesiąt centymetrów. Smoła szewska jest bardzo ciekawem pod tym względem ciałem. Jest ona bardzo krucha i w zwykłej temperaturze pokojowej rozpryskuje się przy uderzeniu młotkiem; gdy wszakże garść kawałków tej smoły wrzucimy do lejka, ustawionego pionowo i pozostawimy na czas dłuższy (lat kilkanaście lub kilkadziesiąt), zachowując ją wciąż w jednakowej temperaturze 15^0—20^0 *C*, spostrzeżemy z biegiem czasu, iż kawałki smoły coraz to szczelniej przylegają jedne do drugich i do szkła, następnie poczynają się obniżać stopniowo w szyjce lejka, zdradzając jakgdyby dążność do wylewania się, aż wreszcie poczynają „wyciekać“ tak, jakby czyniły ciecze; tylko że w cieczach proces ten postępuje szybko, w smole szewskiej trwa dziesiątki lat.

Zatem zarówno lód jak smoła szewska, jakkolwiek są ciałami, co do których bez wahania zastosujemy nazwę „stałych", zdradzają cechy, charakterystyczne dla cieczy. Wyżej znowu wzmiankowaliśmy, iż niektóre ciecze zdradzają ślady sztywności, t. j. cechę charakterystyczną ciał stałych. Przykłady te stwierdzają słuszność powiedzenia, iż granice między ciałami stałemi a ciekłemi nie zarysowują się ostro: podobnie, gdy mowa będzie o zjawiskach cieplnych, zobaczymy, iż również nie jest ostrą granica między cieczami a gazami. Zupełnie zresztą to samo spostrzegamy przy klasyfikacji w innych naukach. Np. są istoty żyjące, które zarówno dobrze można nazwać zwierzętami jak roślinami; a więc i tu nie są te dwa światy oddzielone ostro zarysowaną granicą: istnieją grupy istot, tworzących jakgdyby ogniwo pośrednie pomiędzy zupełnie zróżniczkowanemi dziedzinami.

54. Prężność ciał gazowych.

Podczas gdy dana ilość cieczy, mieszcząca się w takiem czy innem naczyniu, zajmuje określoną objętość, wypełniając określoną część tego naczynia (objętość ta ulega, jak niżej zobaczymy, pewnym wahaniom pod wpływem zmian ciśnienia i temperatury), gazy zachowują się wręcz inaczej, jak już o tem wspominaliśmy w poprzednim art.: dana ilość gazu wypełnić może dowolną objętość. Gdy w jednym pokoju otworzymy buteleczkę, zawierającą gaz o charakterystycznej woni, uczujemy po pewnym czasie tę woń w przyległych pokojach; gdy podniesiemy tłok, chodzący szczelnie w szyjce naczynia, zawierającego powietrze, z położenia A do B (rys. 96), powietrze nie pozostanie w naczyniu poniżej A, lecz wypełni część szyjki między A i B; przy obniżaniu tłoka natomiast możemy zmusić gaz do zajęcia mniejszej objętości w porównaniu z tą, którą posiadał początkowo.



Rys. 96.


Rys. 97.

Z tej własności gazów korzystamy, budując pompy powietrzne, jak o tem wkrótce będzie mowa.

D o ś w i a d c z e n i e. Weźmy zawiązany szczelnie pęcherz w postaci woreczka; zawiera on powietrze. Umieśćmy go pod kloszem pompy powietrznej (rys. 97), skąd możemy w sposób, o którym mówimy dalej, usuwać powietrze; zobaczymy, iż pęcherz poczyna się rozdymać, zwiększać, jak to wskazuje linja kropkowana na rysunku, ulegając działaniu widocznego parcia z wewnątrz — powietrze, zawarte w pęcherzu, usiłuje się *rozprężyć*, dąży do wypełnienia możliwie większej objętości. Łatwo zrozumieć, dlaczego przed wypompowywaniem powietrza z pod klosza objawu tego nie dostrzegaliśmy—oto, oczywiście, taką samą własność jak powietrze w pęcherzu posiada powietrze, wypełniające klosz: prze więc ono z zewnątrz na ściany pęcherza; gdy powietrze z pod klosza usuwamy, parcie zewnętrzne na pęcherz zmniejszamy, co pozwala uwidocznić się parciu wewnętrznemu.

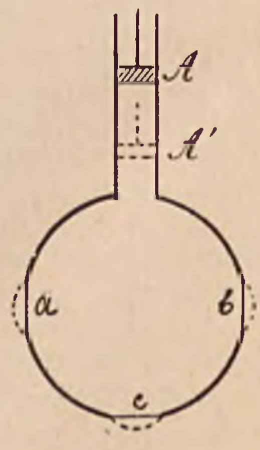
Opisaną tu własność, wspólną wszystkim ciałom gazowym, nazywamy *rozprężliwością*; skutkiem tej własności każde ciało gazowe posiada, jak powiadamy, *prężność*, t. j. prze na ściany zawierającego je naczynia oraz na wszystkie ciała, weń zanurzone.

55. Rozchodzenie się ciśnienia w płynach. Prawo Pascala.

D o ś w i a d c z e n i e I. Zróbmy w piłce gumowej otwór o średnicy ok. 1 cm, aby można było łatwo wypełnić piłkę wodą. Poza tem przekłujmy igłą kilka lub kilkanaście otworków w różnych miejscach powierzchni piłki. Po całkowitem wypełnieniu wodą pokaleczonej w ten sposób piłki weźmy ją w rękę tak, by palcem zatkać ów większy otwór, i ściśnijmy piłkę; wnet trysną ze wszystkich nakłuć, któreśmy zrobili, jednakowe strumienie tak, jak to przedstawia rys. 98.

D o ś w i a d c z e n i e II. Naczynie kształtu kuli (rys. 99) albo sześcianu, wypełnione powietrzem, zaopatrujemy w złączoną z niem szczelnie rurkę, w której daje się posuwać tłok *A*. W kilku miejscach *(a, b, c)* zrobione są w ścianach naczynia otworki, przykryte naklejonemi cienkiemi błonkami gumowemi. Jeżeli przy położeniu tłoka w *A* błonki te mają kształt płaski, to przy wsunięciu tłoka do *A'*

Rys. 98.



Rys. 99.

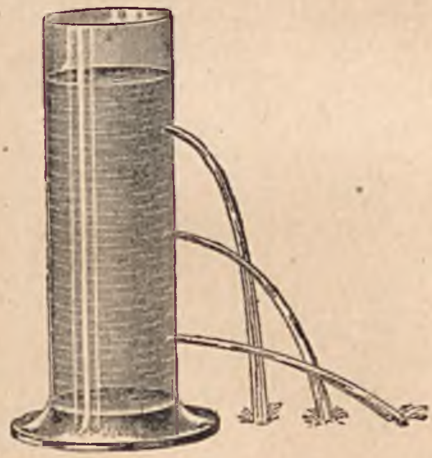
stają się one wszystkie wypięte jednakowo nazewnątrz, jak to wskazują linje kropkowane na rysunku. Wysunięcie tłoka powyżej *A* powoduje natomiast wklęsnięcie wszystkich błonek do środka naczynia.

Oba te doświadczenia ilustrują bardzo ważne prawo, dotyczące płynów, a więc zarówno cieczy, jak gazów, wypowiedziane przez znakomitego matematyka i fizyka francuskiego Pascala w XVII stuleciu, a mianowicie: *Ciśnienie w płynach (cieczach i gazach) rozchodzi się we wszystkich kierunkach jednakowo.*

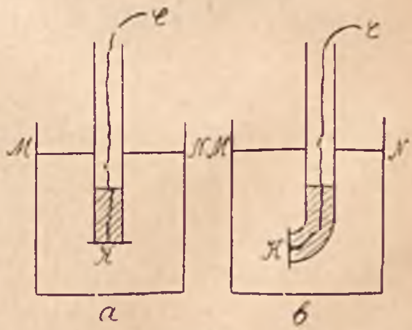
56. Ciśnienie w cieczy, wywołane przez jej ciężar.

Ciecze, jak wszystkie ciała, podlegają sile ciężkości. Gdy zatem mamy w jakiem naczyniu ciecz, górne jej warstwy ciężarem swym działają na dolne, skutkiem czego ciśnienie w cieczy rośnie wraz z głębokością.

D o ś w i a d c z e n i e I. Nalewamy wody do naczynia cylindrycznego (rys. 100), zaopatrzonego w kilka otworów bocznych, przypada-



Rys. 100.



Rys. 101.

jących na r ó ż n y c h w y s o k o ś c i a c h. Z kształtów strumieni, tryskających z otworków, wnosimy, iż pod n a j w i ę k s z e m ciśnieniem tryska strumień najniższy.

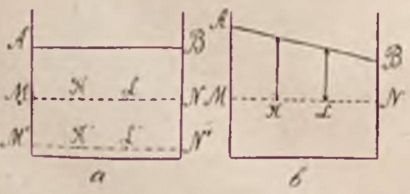
D o ś w i a d c z e n i e II. Zanurzamy w cieczy rurę z ruchomem dnem (rys. 101); stanowi je płytka, szczelnie przylegająca do krawędzi rury i przytrzymywana podczas zanurzania sznurkiem, przeciągniętym przez rurę. Po zanurzeniu rury można puścić sznurek swobodnie, a dno nie odpada, będąc przyciskane cieczą do rury od dołu (rys. 101a) lub zboku (rys. 101*b*), podczas gdy od strony wnętrza rury działania cieczy niema. Nalewajmy teraz do wnętrza rury tej samej cieczy, która wypełnia całe naczynie. Dopóki poziom cieczy w rurze jest niższy, niż w naczyniu, płytka się trzyma; z chwilą jednak, gdy poziomy cieczy w rurze i naczyniu stają się jednakowemi, płytka odpada.

Doświadczenie to potwierdza, że wraz z głębokością ciśnienie w cieczy rośnie; przytem widoczne jest, iż zgodnie z prawem Pascala w każdem poszczególnem miejscu cieczy panuje ciśnienie, skierowane jednakowo we wszystkie strony.

57. Równowaga cieczy w naczyniach pojedyńczych i połączonych.

Ciecz, nalana do niezbyt wąskiego naczynia i pozostająca w niem w spoczynku, posiada powierzchnię poziomą *), np. *AB* na rysunku schematycznym 102*a*.

We wszystkich punktach, wewnątrz cieczy położonych na jednym poziomie, np. na poziomie *MN*, panuje jednakowe ciśnienie, wszystkie bowiem leżą w tej samej głębokości. Podobnie i na każdym innym poziomie np. *M' N'* we wszystkich punktach np. *K' L'* panuje jednakowe ciśnienie, leżą one bowiem w jednakowej głębokości; ciśnienie to wszakże na poziomie *M' N'* jest większe, niż na wyższym poziomie *MN*. Przypuśćmy jednak, że powierzchnia cieczy nie byłaby pozioma — przedstawia to rys. 102*b*; wówczas w poszczególnych punktach dowolnego poziomu *MN* nie mielibyśmy jednakowego ciśnienia — np. w punkcie *K* ciśnienie byłoby większe niż w *L*, albowiem pierwszy punkt przypadałby dalej od powierzchni cieczy, t. j. leżałby głębiej niż drugi. Ponieważ ciśnienie w cieczy w każdym punkcie skierowane jest jednakowo we wszystkich kierunkach, przeto ciśnienie, rozchodzące się w kierunku od *L* do *K* byłoby mniejsze niż to, któreby się rozchodziło od *K* do *L*, skutkiem czego nie byłoby równowagi i ciecz poruszałaby się od miejsca o ciśnieniu



Rys. 102.

*) Przy samych ścianach naczynia daje się zauważyć pewne zakrzywienie tej powierzchni (o przyczynie tego mówić będziemy niżej); to też o przypadku naczyń wąskich tutaj nie mówimy.

większem do miejsca o ciśnieniu mniejszem, dopókiby się wreszcie ciśnienie na danym poziomie nie zrównało; to samo rozumowanie dotyczy każdego innego poziomu. Równowaga nastąpiłaby wreszcie tylko przy poziomem położeniu powierzchni cieczy, jak na rys. 102*a*.

Powierzchnię poziomą *AB* cieczy (rys. 102*a*), jak również poziomy *MN* lub *M' N'* traktujemy tu jako płaszczyzny; możemy sobie na to pozwolić, pamiętając, iż kierunkiem poziomym nazywamy kierunek, prostopadły do pionowego, i uwzględniając, że piony, poprowadzone przez blisko siebie położone punkty np. *K* i *L*, możemy uważać za równoległe do siebie. Inaczej miałaby się rzecz, gdybyśmy rozpatrywali bardzo wielkie naczynie (zbiornik), wypełnione cieczą — przykładem morza lub oceany, przy założeniu, iż woda w nich pozostaje w zupełnym spoczynku; tu powierzchnia, będąc prostopadłą wszędzie do kierunku pionowego, jest wyraźnie wypukła (rysunek 103).

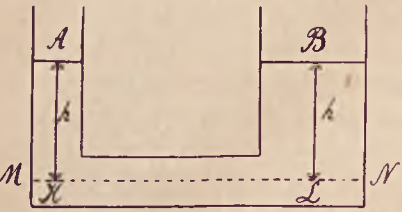
Rys. 103.

Rys. 104.

D o ś w i a d c z e n i e I. Kilka naczyń niezbyt wąskich, połączonych ze sobą tak, że ciecz może przepływać z jednego do drugiego (rys. 104), wypełniamy cieczą jednorodną (wodą, alkoholem). Stwierdzamy, że ciecz po osiągnięciu równowagi pozostaje we wszystkich naczyniach na tym samym poziomie.

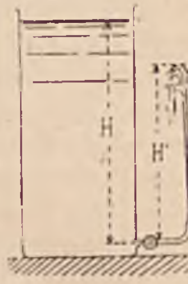
Łatwo to uzasadnić. Przypuśćmy, iż ciecz jednorodna wypełnia dwa naczynia połączone *A* i *B* (rys. 105). Ciecz będzie w równowadze, jeżeli we wszystkich punktach dowolnego poziomu *MN* będzie panowało jednakowe ciśnienie. Ale wszak np. w punktach *K* i *L* będziemy mieli ciśnienie równe tylko w tym przypadku, gdy punkty te będą się znajdowały w cieczy na jednakowej głębokości, t. j. w równej odległości (*h*) od powierzchni cieczy. Wynika stąd, że powierzchnia jednej i tej samej cieczy w naczyniach połączonych przypada *na jednym poziomie,* jeżeli ciecz jest w spoczynku. Zakładamy tutaj, że ciśnienie na poziomie *MN* uwarunkowane jest jedynie przez ciężar cieczy; wszakże powierzchnia cieczy w obu naczyniach podlega jeszcze ciśnieniu atmosferycznemu, o którem niebawem będziemy mówili (art. 60); ponieważ jednak to ciśnienie atmosferyczne na powierzchni cieczy w *A* i *B* jest jednakowe, okoliczność ta nie dodaje nic nowego do warunków równowagi.

Dążenie cieczy do ustawienia się na jednym poziomie w naczyniach połączonych znajduje wiele zastosowań praktycznych. Rys. 106 przedstawia t. zw. wodowskaz w kotłach parowych; jest to rurka szkla-



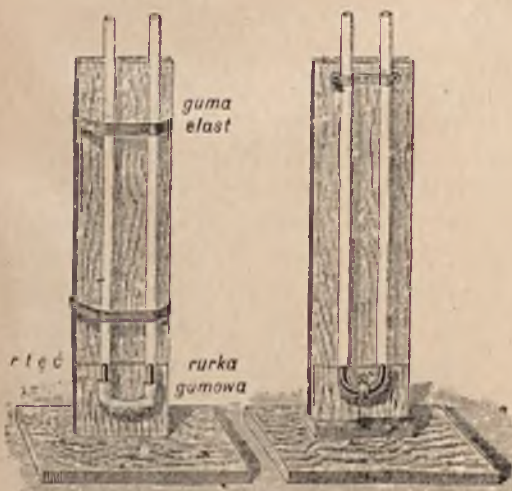
Rys. 105.

Rys. 106.



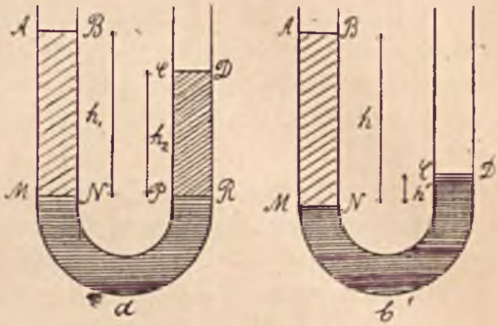
Rys. 107.

na, połączona w sposób, uwidoczniony na rysunku, z kotłem — obserwując poziom wody w rurce, widzimy, czy kocioł zawiera dostateczną ilość wody. Jeżeli naczynie z wodą zaopatrzone jest w boczną rurkę z wygiętym do góry otwartym końcem, jak to przedstawia rys. 107, woda tryska do góry, dążąc do osiągnięcia tej wysokości, na której się znajduje ona w naczyniu (wysokości tej ona nie osiągnie ze względu na przeszkody, które strumień wody napotyka w rurce i powietrzu). Na tej zasadzie oparta jest budowa wodociągów — pompy tłoczą wodę z rzeki lub studni do t. zw. wieży ciśnień, t. j. do wielkiego zbiornika, gdzie woda osiąga poziom wyższy, niż wysokość mieszkań, do których rury doprowadzają wodę z tego zbiornika.



Rys. 108.

D o ś w i a d c z e n i e II. Bierzemy rurę szklaną o średnicy paru centymetrów, zgiętą w kształcie litery *U* (na rys. 108 z prawej strony widzimy taką rurę, umocowaną na drewnianej desce pionowej; z lewej strony na tym rysunku pokazane jest, jak można zastąpić zgiętą rurę przez dwie proste, połączone ze sobą rurką gumową; schematycznie prosty ten przyrząd wyobrażony jest na rys. 109). Gdy do takiej rury nalewamy rtęci, ciecz ta staje w obu ramionach na jednakowym poziomie MN i PR. Jeżeli teraz do obu ramion dolewamy jednej i tej samej cieczy, np. wody, to oczywiście warunkiem, by poziom rtęci (MN i PR) pozostał bez zmiany, jest ten, by słupy tej cieczy, spoczywające na rtęci w obu ramionach, były jednakowej wysokości (dlaczego? coby się stało, gdyby jeden słup był wyższy?)! Jeżeli jednak do obu ramion nalewamy cieczy różnej gęstości, np. do lewego wody, a do prawego gliceryny, to warunkiem, by rtęć zachowała dawny poziom w obu ramionach, nie jest już równość słupów — słup gliceryny musi być niższy.



Rys. 109.

Rozpatrzmy tę rzecz bliżej, zakładając przytem dla ogólności, że przekroje obu ramion rurki nie są jednakowe. Przypuśćmy więc, że przekrój lewego ramienia rurki jest s_1, gęstość cieczy, spoczywającej na rtęci, jest d_1 i wysokość słupa tej cieczy jest h_1; dla prawego zaś ramienia wielkości te wynoszą odpowiednio s_2, d_2, h_2; przez g oznaczamy, jak zwykle, przyśpieszenie grawitacyjne. Dlatego, by rtęć w obu ramionach pozostała na tym samym poziomie MN, PR, trzeba, by wszędzie na poziomie zarówno MN jak PR panowało to samo ciśnienie. Znajdźmy więc to ciśnienie dla MN i PR. *Parcie* na powierzchnię MN równa się ciężarowi słupa $ABMN$, t. j. $s_1 h_1 d_1 g$, zatem *ciśnienie* na powierzchnię MN wynosi (p. ust. 51)

$$\frac{s_1 h_1 d_1 g}{s_1} = h_1 d_1 g \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Podobnie znajdziemy wartość ciśnienia, którą daje słup $CDRP$ na powierzchni PR; wynosi ono

$$\frac{s_2 h_2 d_2 g}{s_2} = h_2 d_2 g \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Równość ciśnień mamy, jeżeli wyrażenia (1) i (2) są równe, t. j

jeżeli $$h_1 d_1 g = h_2 d_2 g,$$

czyli $$h_1 d_1 = h_2 d_2\,, \qquad (3)$$

skąd $$\frac{h_1}{h_2} = \frac{d_2}{d_1} \qquad (4)$$

Równowaga zatem zachodzi, gdy *wysokości słupów cieczy są odwrotnie proporcjonalne do ich gęstości.* Poznajemy tedy sposób porównywania gęstości cieczy przy pomocy naczyń połączonych. Znając gęstość jednej cieczy np. d_1, znajdziemy gęstość d_2 drugiej, skoro zmierzymy h_1 i h_2.

Jeżeli w doświadczeniu z przyrządem, wyobrażonym na rys. 109, zamiast do obu ramion, zawierających rtęć, nalewamy cieczy do jednego tylko ramienia, wówczas poziom rtęci w drugiem ramieniu podnosi się, a w pierwszem opada. Widoczne jest, że w tym razie (rys. 109*b*) ciśnienie słupa rtęci (wysokości h') równoważy ciśnienie słupa danej cieczy (wysokości h). Mierząc więc różnicę poziomów h' rtęci w obu ramionach, jak również wysokość h słupa dolanej cieczy, możemy porównać gęstość cieczy z gęstością rtęci.

Ćwiczenie 26. Na desce pionowej, utrzymującej naczynia połączone (rys. 108), umocujcie w środku, między ramionami rurki skalę milimetrową. Nalejcie do rurki najpierw trochę rtęci, by sięgała określonego miejsca skali, a następnie dolejcie do jednego ramienia wody, do drugiego — alkoholu, przytem tak, by poziom rtęci w obu ramionach rurki pozostał ten sam *). Zmierzcie wysokości słupów wody i alkoholu i wyznaczcie stąd gęstość względną alkoholu.

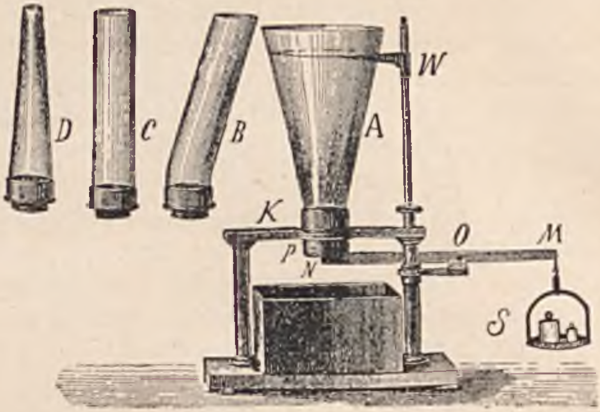
Ćwiczenie 27. Po uprzedniem wlaniu do przyrządu, wyobrażonego na rys. 108, rtęci (jak w ćwiczeniu 26), dolejcie do jednego ramienia gliceryny, by się wytworzyła różnica poziomów rtęci (p. rys. 109*b*). Wyznaczcie wysokość słupa gliceryny i różnicę poziomów rtęci w obu ramionach, a, biorąc gęstość rtęci z tablicy na końcu książki, wyznaczcie gęstość gliceryny.

58. Parcie cieczy na dno zawierającego ją naczynia.

Doświadczenie. W przyrządzie, przedstawionym na rys. 110, dają się wkręcać do jednej i tej samej oprawy K otwarte z obu końców naczynia różnych kształtów A, B, C, D; płytka P, przytrzymywana drążkiem $N\,M$, obracającym się na osi O i obciążonym na końcu M, stanowi ruchome dno wkręcanego w oprawę naczynia. Przy danem obciążeniu szalki S, a więc przy danej sile, przytrzymującej płytkę P, gdy coraz to inne naczynie zostaje wkręcone do oprawy, nalać trzeba za każ-

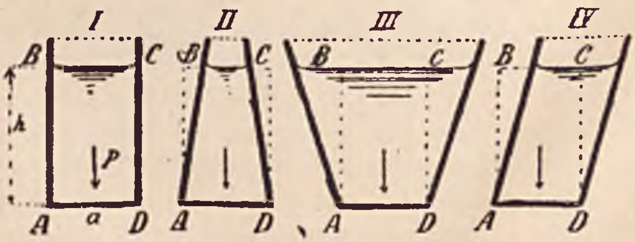
*) Nie nalewajcie zbyt mało tych cieczy, im wyższe bowiem będą mierzone słupy, tem mniejszy będzie błąd względny, popełniony przy tym pomiarze.

dym razem do naczynia danej cieczy (np. wody) *do tej samej wysokości* (notujemy to przy pomocy wskazówki W), by dno pod parciem cieczy odpadło i ciecz zaczęła się wylewać.



Rys. 110.

Wynika z tego doświadczenia, że *parcie cieczy na dno zawierającego ją naczynia,* zależne od wielkości dna i wysokości słupa spoczywającej na niem cieczy, *nie zależy od kształtu naczynia.* Łatwo to możemy uzasadnić. Jeżeli na powierzchni *s* panuje ciśnienie *p*, całkowite parcie na powierzchnię wynosi *p. s.* Weźmy cztery naczynia różnych kształtów o dnie jednakowej wielkości (rys. 111). Jeżeli do wszystkich tych



Rys. 111.

naczyń wlejemy jednej i tej samej cieczy do tej samej wysokości *h*, wówczas na dnie każdego z tych naczyń, przypadającem na tej samej głębokości, panować będzie ciśnienie jednakowe, a więc na równej wielkości dna będzie wywierane parcie jednakowe. Kształt naczynia, jak widzimy, nie wchodzi tu w grę. Rozróżniać należy zatem parcie cieczy na dno naczynia, a ciężar całej ilości cieczy, zawartej w naczyniu.

59. Ciśnienie w głębiach mórz i oceanów.

Ciśnienie w cieczy, jak widzieliśmy, zależy od głębokości rozważanego w niej punktu, t. j. od odległości tego punktu od powierzchni swobodnej. Różnice ciśnienia w różnych głębokościach dają się łatwo dostrzec w niewielkich nawet warstwach cieczy, które miewamy np. w naczyniach, używanych do doświadczeń. Cóż za różnice występują dopiero, gdy rozpatrujemy te kolosalne zbiorniki wody, jakie nam daje natura w postaci mórz i oceanów, gdzie głębokość wynosi w niektórych miejscach 10 Km! Woda w morzach i oceanach nie posiada wszędzie jednakowej gęstości; jest to zależne nie tylko od różnicy temperatury w poszczególnych miejscach, ale i od tych wielkich różnic ciśnienia — przy takich ciśnieniach nie można już zaniedbywać ściśliwości cieczy, jak to czyniliśmy wyżej, zakładając dla uproszczenia, iż ciecz w naczyniu posiada wszędzie dokładnie jednakową gęstość.

W związku z panującem w głębinach morskich ciśnieniem pozostaje budowa istot, zamieszkujących te głębiny; ryby, które tam żyć mogą, nie przystosowane są bynajmniej do istnienia w wodach płytkich — wielkie ciśnienie zewnętrzne, któremu podlegają ich ciała, równoważy się ciśnieniem wewnętrznem, które nie może się wahać w zbyt szerokich granicach; to też, gdy względnie niedawno wynaleziono sposoby wydobywania tych tworów z wielkich głębin, zdarzało się, iż np. wyciągnięta na powierzchnię ryba pękała — ciśnienie wewnętrzne nie równoważyło się już ciśnieniem ze strony zewnętrznej.

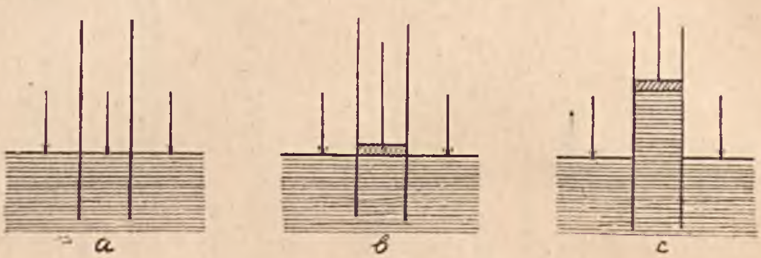
60. Ciśnienie w gazie, wywołane przez jego ciężar. Ciśnienie atmosferyczne. Zasada barometru.

Rys. 112.

Zwróćmy się teraz ku temu wielkiemu oceanowi powietrznemu, na którego dnie żyjemy. Powietrza nie otacza żadna zewnętrzna osłona; dlaczegóż ono dzięki swej rozprężliwości nie rozproszy się w przestrzeni wszechświatowej, a trzyma się ziemi, otaczając ją pewnej grubości warstwą. Dzieje się to dlatego, że powietrze, jak inne gazy, jak wszystkie zresztą ciała, podlega działaniu grawitacyjnemu, działaniu siły ciężkości.

D o ś w i a d c z e n i e 1. Z kuli szklanej, zaopatrzonej w kurek (rys. 112), możemy usunąć przy pomocy pompy powietrze. Po zamknięciu kurka odłączamy kulę od pompy i zawieszamy ją albo kładziemy na jednem ramieniu wagi, równoważąc odważnikami, położonemi na drugiej szalce. Otwieramy wówczas kurek. Słyszymy, jak ze świstem wpada powietrze do kuli, a zarazem szalka, na której leży kula, obniża się. Wykazujemy w ten sposób, że powietrze ulega działaniu grawitacyjnemu.

Ciężar powietrza jest siłą, która trzyma powietrze przy ziemi. Ale w takim razie w powietrzu musi zachodzić to samo, cośmy już stwierdzili w cieczach, a mianowicie, że górne warstwy ciężarem swym działają na dolne, a przez to ciśnienie, panujące w poszczególnych punktach tego morza gazowego, które nas otacza, nie może być wszędzie jednakowe: musi być większe w punktach, leżących „głębiej“,



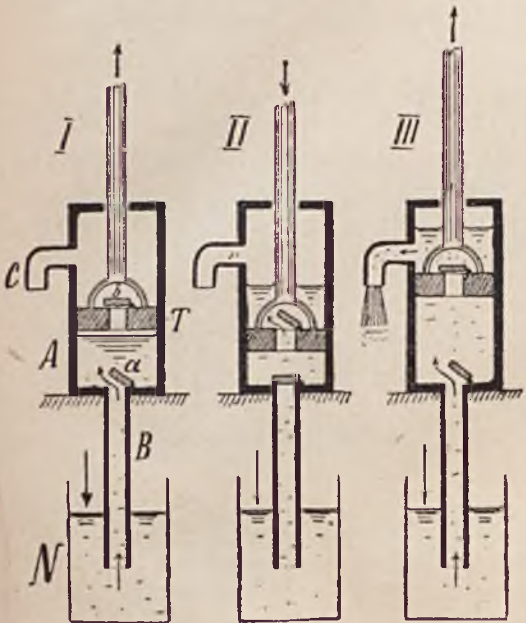
Rys. 113.

t. j. bliżej powierzchni ziemi. Tak też jest istotnie, jak nas przekonywają pomiary ciśnienia atmosferycznego, dokonywane przy pomocy przyrządu, zwanego *barometrem*, którego zasadę mamy właśnie wyjaśnić.

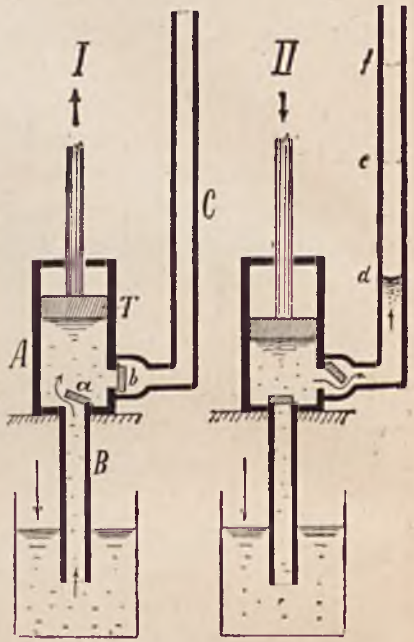
Już w starożytności znane były pompy tłokowe, któremi posługiwano się przy podnoszeniu wody ze zbiorników (np. studzien) na pewną wysokość. Przypuśćmy, iż mamy w wodzie rurę pionową z tłokiem, jak to przedstawia rys. 113*b*, tak że tłok przylega do samej powierzchni wody; jeżeli zaczniemy tłok podnosić, woda będzie podążała za tłokiem w górę (rys. 113*c*). To właśnie zjawisko znane było w starożytności — tłumaczono je tem, że „natura boi się próżni“ (przy podnoszeniu tłoka woda wypełnia próżnię, powstającą pod tłokiem). Na wątpliwą wszakże wartość takiego tłumaczenia wskazywać musiał fakt, że tą drogą wody nie można podnosić na każdą wysokość, a jedynie na dość ograniczoną (przy najszczelniejszym tłoku nie wyżej nad 10 m). Czyżby obawa natury przed próżnią miała jakie granice?

Torricelli, znakomity uczeń jeszcze bardziej znakomitego nauczyciela Galileusza, pierwszy wytłumaczył dane zjawisko tak, jak my je sobie tłumaczymy dziś. Oto, o ile zanurzona jest w wodzie rura bez tłoka (rys. 113*a*), zarówno wewnątrz, jak nazewnątrz rury prze na powierzchnię cieczy powietrze; gdy w rurze mieści się tłok, jak na rys. 113*b*, wówczas przy podnoszeniu go do góry, nie mamy pod tłokiem parcia powietrza na ciecz, podczas gdy nazewnątrz rury parcie to istnieje — parciem tem powietrze wpędza wodę do rury (prawo Pascala!). Gdy jednak przy podnoszeniu tłoka wzniesie się w rurze słup wody tej wysokości, iż ciężar jego zrównoważy parcie otaczającego powietrza, dalej woda podnosić się nie będzie.

Naturalnie, gdybyśmy po podniesieniu tłoku, jak na rys. 113*c*, zaczęli tłok obniżać, woda wróciłaby do tego zbiornika, z którego weszła do rury. Chcąc zbudo-



Rys. 114.

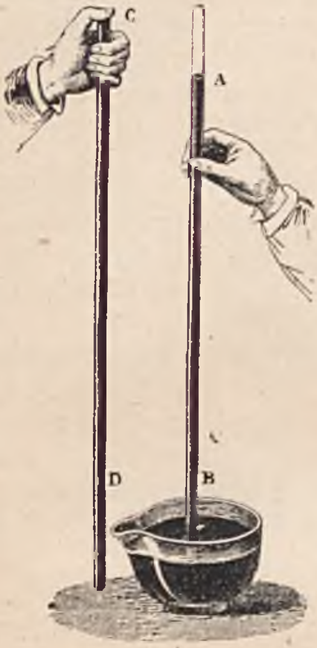


Rys. 115.

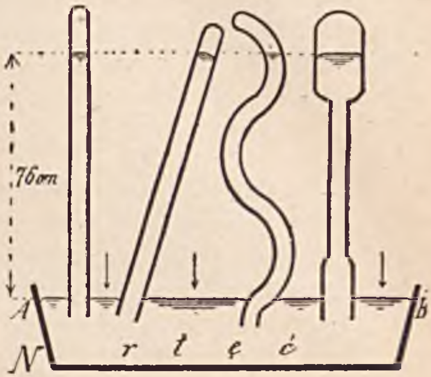
wać pompę, musimy zabezpieczyć się przed taką ewentualnością. Rys. 114 tłumaczy, jak się cel osiąga przez użycie odpowiednio otwierających się do góry klap w rurze i tłoku; klapa *a* otwiera się, gdy tłok unosi się do góry, zamyka się natomiast przy obniżaniu tłoka; rola klapy *b* w tłoku jest też łatwa do zrozumienia. Rys. 114 przedstawia typ t. zw. pompy ssącej. Rysunek 115 wyjaśnia nam zasadę pompy ssąco-tłoczącej, pozwalającej przy pomocy odpowiednich motorów tłoczyć wodę na znaczną wysokość, np. do wieży ciśnień (p. art. 57).

Torricelli rozumował zupełnie słusznie, iż, gdyby zamiast wody użyć rtęci w podobnem doświadczeniu, rtęć podniosłaby się na mniejszą znacznie wysokość i to na tyle razy mniejszą, ile razy gęstość rtęci jest większa od gęstości wody. To też wskazał on nam następujące doświadczenie, które zarazem wyjaśnia zasadę budowy barometru rtęciowego.

D o ś w i a d c z e n i e T o r r i c e l l i ' e g o (II). Bierzemy rurkę szklaną ok. 1 m długości i ok. 1 cm średnicy, u jednego końca zalutowaną; napełniamy ją całkowicie rtęcią, trzymając oczywiście końcem

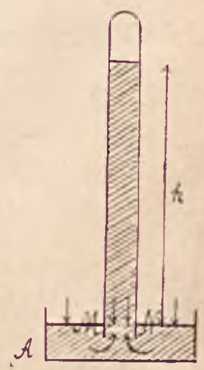


Rys. 116.



Rys. 117.

załutowanym ku dołowi i dbając o to, by nie pozostały w niej pęcherzyki powietrza; po zatknięciu palcem otworu rurki, już wypełnionej, odwracamy ją, zanurzamy tym otwartym końcem w naczyniu z rtęcią i wtedy dopiero usuwamy palec, którym zamknęliśmy otwór, nadając jednocześnie rurce położenie pionowe. Okazuje się, iż wypełniająca rurkę rtęć opada i zatrzymuje się na pewnej wysokości ponad poziomem rtęci, zawartej w naczyniu. Pochylenie rurki, zarówno jak kształt (rys. 117) nie wpływają na tę różnicę poziomów rtęci w rurce i naczyniu, co jest zupełnie zrozumiałe, skoro uważnie przestudjowaliśmy art. 56; tylko skala, która służy do wymierzania odległości między poziomami rtęci w rurce i zewnętrznem naczyniu, musi być zawsze dokładnie pionowa (dlaczego?). Szerokość rurki również nie ma zasadniczego znaczenia, jak to zaraz zobaczymy, obliczając wartość ciśnienia atmosferycznego. Przypuśćmy, iż s (rys. 118) oznacza przekrój rurki w cm^2, h wysokość słupa rtęci w rurce, zmierzoną w cm. Na poziomie MN dzia-



Rys. 118.

ła z dołu parcie, wywierane przez powietrze na powierzchnię rtęci w naczyniu A i przenoszone poprzez rtęć na MN zgodnie z prawem Pascala; z góry — ciężar słupa rtęci wysokości h, równoważący tamto parcie z dołu. Wielkość ciśnienia zatem na powierzchni MN, t. j. wielkość *ciśnienia atmosferycznego* znajdziemy, dzieląc ciężar tego słupa rtęci przez przekrój rurki, t. j. przez podstawę słupa; zatem, jeżeli d oznacza gęstość rtęci, zaś g — przyśpieszenie grawitacyjne, mamy, zważywszy, iż objętość słupa jest $h \, . \, s$,

$$b = \frac{f}{s} = \frac{s \, . \, h \, . \, d \, . \, g}{s} = h d g \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (1)$$

Jak widzimy, ze wzoru tego ruguje się s, czyli istotnie przekrój rurki nie gra roli w wyznaczaniu ciśnienia atmosferycznego; zauważmy jednak, iż przekrój ten nie może być zbyt mały, gdyż w rurkach wąskich zachodzą szczególne zjawiska, o których już wspominaliśmy, a o których niżej pomówimy obszerniej.

Gęstość rtęci zależy od temperatury; ustalono więc dla uniknięcia nieporozumień posługiwanie się rtęcią w 0^0 C, a ponieważ w rzeczywistości temperatura przy pomiarach bywa najrozmaitsza, przeto po zmierzeniu wysokości słupa w danej temperaturze obliczamy zapomocą odpowiednich wzorów, jaką byłaby ta wysokość w 0^0, i dokonywamy w ten sposób t. zw. *redukcji* do 0^0; temperatura ma też wpływ na wielkość podziałki skali, której używamy do mierzenia.

Wysokość słupa barometrycznego jest naogół zmienna; nietylko bywa różna w różnych miejscach, zwłaszcza na różnych wysokościach (dlaczego?), ale i w jednem i tem samem miejscu ulega wciąż wahaniom. Ponieważ na poziomie morza pod szerokością 45^0 wartość ta waha się mniej więcej około 76 cm (760 mm), przyjęto nazywać ciśnienie atmosferyczne, mierzone tej wysokości słupem rtęci, *normalnem,* a wogóle ciśnienie tej wielkości nazywać *ciśnieniem jednej atmosfery*.

Wartość tego normalnego ciśnienia wynosi więc, jak to łatwo obliczyć ze wzoru (1), zakładając $g = 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$, a d (w 0^0) $= 13{,}6 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$

$$hgd = 76 \text{ cm} \, . \, 13{,}6 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \, . \, 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2} = 1013961{,}6 \frac{\text{gr} \, . \, \text{cm}}{\text{sek}^2 \, . \, \text{cm}^2} =$$

$$= 1013961{,}6 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (2)$$

t. j. cokolwiek więcej od $1 \frac{\text{megadyny}}{\text{cm}^2}$.

Wartość ta jest pokaźna. Obliczmy np., opierając się na tem, parcie, któremu podlega ciało nasze, otoczone atmosferą, a otrzymamy liczbę olbrzymią; parcie to równoważy ciśnienie wewnętrzne naszego organizmu. Gdy człowiek w podróży napowietrznej unosi się na znaczną wysokość, gdzie ciśnienie atmosferyczne jest mniejsze, równowaga ta zostaje zakłócona i występują ciężkie objawy przeważającego wówczas ciśnienia wewnętrznego.

Doświadczenie III. Dwie półkule metalowe (rys. 119 i 120) dopełniają się nawzajem, tworząc kulę, gdy je złożymy; o ile z wewnątrz złożonej kuli usuwamy powietrze, rozłączenie półkul wymaga pokona-

Rys. 119.

Rys. 121.

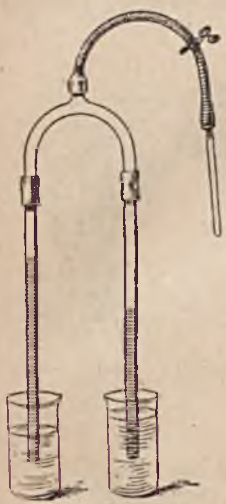
Rys. 120.

Rys. 122.

nia parcia atmosferycznego z zewnątrz, którego już nie równoważy parcie od wewnątrz kuli. Wartość siły, przeciwdziałającej rozłączaniu półkul, znajdziemy, obliczając, ile cm^2 posiada pole wielkiego koła kuli, i pamiętając, iż na każdy cm^2 działa parcie mniej więcej równe ciężarowi jednego kilograma (megadyna jest siłą cokolwiek większą od ciężaru 1 kilograma). Powtarzamy tu historyczne doświadczenie z t. zw. półkulami magdeburskiemi, które wykonał słynny w dziejach fizyki burmistrz miasta Magdeburga, Otto v. Guericke; przy użyciu odpowiedniej wielkości kul 16 koni nie mogło rozdzielić półkul połączonych.

Doświadczenie IV. Wypełniamy całkowicie szklankę wodą, a po ostrożnem przykryciu jej arkuszem papieru tak, by pod papierem nie było pęcherza powietrza, odwracamy szklankę, przytrzymując dłonią arkusz; potem możemy usunąć rękę z pod arkusza, a arkusz nie odpadnie i woda się nie wyleje (rys. 121).

Doświadczenie V. Na talerzu pompy powietrznej umieszczamy cylinder szklany, zawiązany szczelnie pęcherzem (rys. 122), i zaczynamy wypompowywać z pod cylindra powietrze; pęcherz zostaje wgnieciony przez ciśnienie atmosferyczne i wreszcie pęka z hukiem. Podobnych doświadczeń, ilustrujących ciśnienie atmosferyczne, daje się wiele wykonać.



Rys. 123.

Ćwiczenie 28. Na rys. 123 wyobrażony jest przyrząd, który łatwo sobie możecie sami sporządzić. Dwie proste rurki szklane połączone są ze sobą, przy pomocy rurek gumowych, zgiętą rurką szklaną, zaopatrzoną u góry w jeden jeszcze wylot, na który nasadzona jest dłuższa rurka gumowa, drugim końcem złączona z kawałkiem prostej rurki szklanej. Jeżeli zanurzycie dwie pierwsze rurki tak, jak to przedstawia rysunek 123, w dwu naczyniach, zawierających różne ciecze, z których jedno zawiera np. wodę, a drugie alkohol lub glicerynę, to przez wessanie powietrza za pośrednictwem dłuższej rurki gumowej spowodujecie wzniesienie się obu cieczy w rurkach. Aby zachować to wzniesienie na czas dłuższy, zaciśnijcie wtedy rurkę gumową przy pomocy ściskacza, jak właśnie widzicie na rysunku. Wytłumaczcie zachodzące tu zjawisko, a mierząc wysokość słupów cieczy w jednej i drugiej rurce, porównajcie ich gęstości i wyznaczcie gęstość względną alkoholu lub gliceryny.

Ćwiczenie 29. Zbudujcie taki przyrząd jak na rys. 123, używając prostych długich rurek różnych przekrojów, nie mniejszej wszakże średnicy niż 1 cm. Sprawdźcie, iż otrzymane wyniki pomiaru gęstości nie zależą od średnicy rurek *).

61. Barometry, aneroidy.

Po wyjaśnieniach, danych w poprzednim artyk. co do zasady barometru rtęciowego, czytelnik łatwo zrozumie budowę istotną tych przyrządów. Rys. 124 i 125 przedstawiają właśnie 2 typy używanych barometrów. Na rys. 124 mamy *barometr naczyniowy* — budowa jego odpowiada schematowi na rys. 118. Naczynie z rtęcią ma dno ruchome, które daje się obniżać i podnosić przy pomocy śruby; śrubę regulujemy tak, by poziom rtęci dotykał ostrza nieruchomo osadzonej igły z kości

*) Przy odczytywaniu trzymajcie zawsze oko na wysokości poziomu cieczy w rurce, jak to wskazane było na rys. 21.

słoniowej (w rtęci jak w zwierciadle widzimy obraz tego ostrza; poruszamy dno przy pomocy śruby, dopóki nie dojrzymy, iż koniec ostrza igły dotyka swego własnego obrazu). Po takiem ustawieniu poziom rtęci w naczyniu stoi na *zerowej* podziałce skali; wystarczy odczytać, na której podziałce przypada poziom rtęci w rurce. Podziałka, przy której pomocy to się robi i która zaopatrzona jest w nonjusz dla dokładniejszego odczytywania, zrobiona jest zazwyczaj na metalowej oprawie, osłaniającej rurkę barometryczną. Szczegóły budowy dolnej i górnej części tego barometru uwidocznione są na rys. 126. Ponieważ skala do odczytywania wysokości barometrycznej musi być pionowa, jak to podkreśliliśmy w poprzednim ustępie, barometr zawieszamy np. tak, jak to widać na rys. 127.

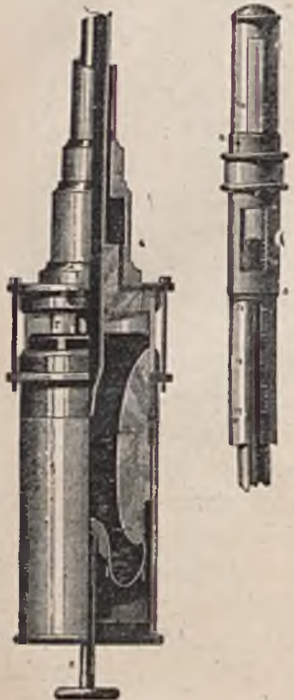
Rys. 124.

Rys. 125.

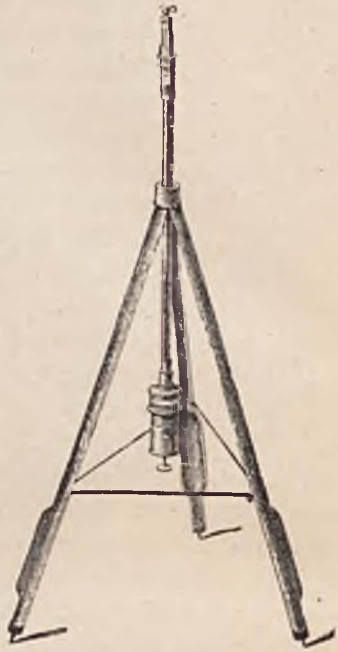
Zamiast rurki, wstawionej do oddzielnego naczynia, można użyć naczyń połączonych — rurki zgiętej tak, jak to wyobraża rys. 125 (barometr lewarowy); górny koniec rurki jest zalutowany, drugi otwarty. Jeżeli nad powierzchnią rtęci w ramieniu zamkniętem niema powietrza, a jest tylko nieunikniona para rtęci, ciśnienie atmosferyczne mierzy się słupem rtęci, którego wysokość równa się odległości poziomów rtęci w ramieniu otwartem i zamkniętem; rurka zgięta jest zazwyczaj tak, by obie powierzchnie rtęci przypadały jedna pod drugą, na jednej linji pionowej.

I tu podziałka robi się zwykle na oprawie metalowej, w której okienka pozwalają widzieć dokładnie oba poziomy rtęci; trzeba tu dokonać zawsze 2 odczytywań, do czego służą dwa nonjusze. Podobnie jak poprzedni, i ten barometr winien być ustawiony pionowo. (Dlaczego przy jednym i przy drugim muszą być termometry?).

Barometry rtęciowe stanowią przyrządy kosztowne i niewygodne do przenoszenia. Jakkolwiek więc w badaniach naukowych wyłącznie niemal takie barometry bywają używane, to jednak w praktyce codziennej zastępują je najczęściej barometry metalowe, t. zw. *aneroidy*. Rys. 128 przedstawia urządzenie najbardziej rozpowszechnionego typu aneroidu. Sprężyste pudełko blaszane *K*, hermetycznie zamknięte, o powierzchni pofałdowanej, zawierające powietrze rozrzedzone, podlega działaniu ciśnienia atmosferycznego. Mocna szeroka sprężyna *P*, połączona jednym końcem w R z podstawą przyrządu, drugim zaś w M z powierzchnią pudla K, przeciwdziała ciśnieniu atmosferycznemu, usiłującemu wgnieść powierzchnię pudła K. Zachodzące przy zmianach ciśnienia ruchy powierzchni pudełka udzielają się połączonej z niem przy pomocy szeregu drążków i kółek zębatych wskazówce, która się przesuwa nad podziałką. Na podziałce czytamy 730, 740, 750 i t. d.,



Rys. 126 (ok. $^1/_2$ nat. wielk.).



Rys. 127 (ok. $^1/_{13}$ nat. wielk.).

co rozumieć należy w ten sposób, iż gdy wskazówka stoi, dajmy na to, na podziałce 748, ciśnienie atmosferyczne wynosi 748 mm. Tyle więc wskazałby użyty jednocześnie barometr rtęciowy. Skala aneroidów sporządza się i sprawdza przy pomocy barometru rtęciowego, jako przyrządu zasadniczego. Pamiętać należy, iż budowa aneroidów oparta jest na własnościach sprężystych metali, a własności te dalekie są od ideału; aneroidy wymagają więc systematycznego co pewien czas sprawdzania.

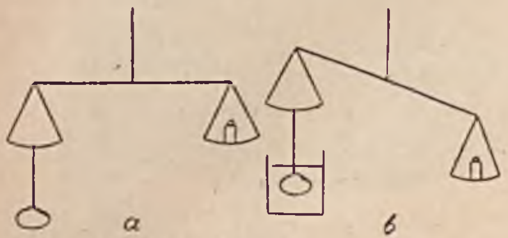
Przebieg wielu zjawisk fizycznych zależy od ciśnienia atmosferycznego. W pracowni zatem fizycznej barometr jest nieodzownym przyrządem. Ale oto inna dziedzina zjawisk, w której ciśnienie atmosferyczne odgrywa pierwszorzędną rolę — zmiany pogody pozostają w związku ze zmianami ciśnienia atmosferycznego; wszakże zależność ta nie jest tak prosta, by usprawiedliwiała popularny pogląd, iż barometr pozwala przepowiadać pogodę. Ciśnienie nie jest jedynym czynnikiem, warunkującym pogodę; jeżeli chodzi o przepowiednię pogody, dokonywa się tego między innemi na podstawie znajomości zmian, które zachodzą w ciśnieniu atmosferycznem na pewnym większym obszarze ziemi. Przepowiedni takich dokonywa centralna stacja meteorologiczna na podstawie danych, dostarczanych jej systematycznie w drodze telegraficznej przez ogół stacyj, tworzących sieć meteorologiczną. Wszystkie te stacje muszą zatem być zaopatrzone w barometry (rtęciowe). Znajomość zmian, którym podlega ciśnienie atmosferyczne w jakimś jednym punkcie, nie może w żadnym razie służyć za wystarczającą podstawę do przewidywania pogody; jednakże np. gwałtowne i znaczne zmiany ciśnienia, które barometr wskazuje w danem miejscu, niemal zawsze się wiążą ze zmianami pogody; naogół przytem powiększanie się ciśnienia idzie w parze z rozpogadzaniem się, zniżone ciśnienie — z opadami, deszczem, burzą. Takie przypadki prostej napozór zależności stały się powodem rozpowszechnienia mniemania, jakoby ze wskazań pojedyńczego barometru można zawsze wnosić o pogodzie. Stąd też popularność barometru, zwłaszcza w tej jego dogodnej postaci aneroidu; stąd też napisy nad podziałką aneroidu, oznaczającą wartości ciśnień, „sucho, deszcz, burza" i t. d. Ostrzegamy czytelnika przed poleganiem na tego rodzaju przepowiedniach.

Rys. 128.

Nie możemy tu pominąć jeszcze jednego ważnego zastosowania barometru. Wszak im wyżej wznosimy się nad poziom morza, tem mniejsze musi tam być ciśnienie atmosferyczne. Z wystudjowanej zależności pomiędzy zmianami ciśnienia a wysokością wnosić można o wysokości (wpobliżu powierzchni ziemi mniej więcej wzniesieniu się o 10 m odpowiada zmniejszenie się ciśnienia o 1 mm); mierząc jednocześnie (dlaczego jednocześnie?) ciśnienie atmosferyczne u podnóża góry i na jej szczycie, możemy wnosić o wysokości góry. Na tem polega jeden ze sposobów mierzenia wysokości gór, a także zastosowanie barometrów i aneroidów w lotnictwie.

62. Parcie płynów na ciała w nich zanurzone. Prawo Archimedesa. Pływanie ciał.

D o ś w i a d c z e n i e I. Zawieszamy na wadze u spodu jednej z szalek, jak to widać na rys. 129, kawałek metalu, a po zrównoważeniu przez odważniki, położone na drugiej szalce, podstawiamy naczynie z wodą tak, by ten kawałek metalu zanurzył się w wodzie. Szalka z uwieszonym kawałeczkiem metalu niezwłocznie unosi się w górę, a dla zrównoważenia wagi trzeba ująć nieco odważników z drugiej szalki. Dostrzegamy więc, że ciecz prze do góry na ciało w niej zanurzone. To wypieranie przez ciecz ciała zanurzonego objawia się w sposób bardzo wyraźny — zanurzmy np. w wodzie korek; gdy go tylko puszczamy z ręki, zostaje wypchnięty natychmiast na powierzchnię. W gazach dostrzegamy podobne zjawisko: balon, wypełniony gazem świetlnym lub wodorem, leci w powietrzu do góry, podobnie jak dąży na powierzchnię wody korek, w niej zanurzony.

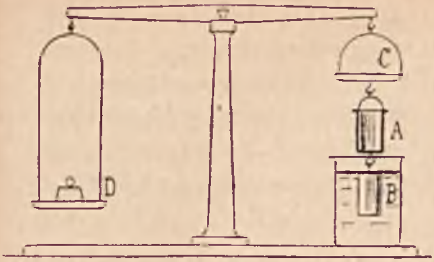


Rys. 129.

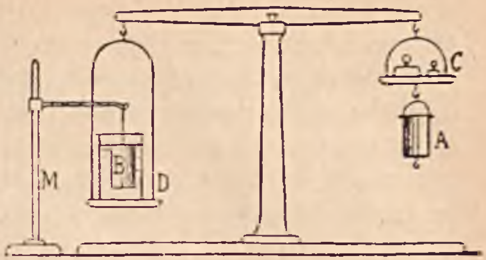
Wyżej już poznaliśmy, iż w każdym płynie, czy to cieczy, czy gazie, ciśnienie w poszczególnym punkcie jest jednakowe we wszystkich kierunkach — jest to cecha charakterystyczna ciśnienia *hydrostatycznego* (od słowa pochodzenia greckiego „hydrostatyka“ — nauka o równowadze cieczy); poza tem ciśnienie to zależy od głębokości rozważanego punktu. Zrozumiałe więc jest, że na całą powierzchnię ciała zanurzonego ciecz wywiera parcie z góry, z boków i dołu, a ponieważ powierzchnia dolna ciała leży *głębiej*, przeto parcie z dołu ostatecznie przeważa, co właśnie tłumaczy zjawiska przytoczone.

Rys. 130.

D o ś w i a d c z e n i e II. Bierzemy dwa walce metalowe (rys. 130), z których jeden wchodzi szczelnie w drugi tak, że objętość pierwszego możliwie ściśle równa się pojemności drugiego. Zawieszamy pierwszy walec u spodu drugiego, jak na rys. 131, a po zrównoważeniu przez odważniki, położone na drugiej szalce, podstawiamy



Rys. 131.



Rys. 132.

naczynie z wodą tak, by dolny walec zanurzył się w niej i równowaga została zakłócona. Gdy ostrożnie do górnego walca wlewamy wodę, spostrzegamy, iż w chwili, gdy wypełniamy go wodą po brzegi, belka wagi powraca do położenia równowagi. Naturalnie, gdybyśmy zanurzyli walec dolny w alkoholu lub eterze, a nie w wodzie, należałoby odpowiednio i do górnego walca nalać alkoholu, eteru.

Na podstawie takich doświadczeń jak również uzasadnień, których tu nie przytaczamy, wypowiadamy twierdzenie, znane pod nazwą prawa lub zasady Archimedesa *), a mianowicie, że *parcie do góry, któremu podlega ciało, zanurzone w płynie (cieczy lub gazie), równa się ciężarowi płynu w objętości ciała zanurzonego.*

Doświadczenie III. Na szalce wagi stawiamy zlewkę z wodą i równoważymy ją przy pomocy odważników i pustego walca z poprzedniego doświadczenia (rys. 132). Potem zanurzamy w wodzie, znajdującej się w zlewce, ten sam walec, który był zanurzony w wodzie w poprzedniem doświadczeniu — szalka z tej strony opada natychmiast. Oto wszak każdemu działaniu towarzyszy równe i w przeciwną stronę skierowane przeciwdziałanie — ciecz prze na ciało zanurzone, wypierając je do góry; ciało zaś zanurzone prze na ciecz w stronę przeciwną ku dołowi. Jeżeli jednak walec pusty, zawieszony na drugiej szalce, napełnimy wodą, waga powróci do równowagi. Doświadczenie więc pozostaje w najzupełniejszej zgodzie z prawem Archimedesa.

Każde zatem ciało, mieszczące się w płynie (cieczy lub gazie), podlega parciu z dołu do góry; wszakże jednocześnie podlega ono sile ciężkości, skierowanej z góry na dół. Zależnie od tego, która z tych sił jest większa, ciało albo się unosi w płynie do góry, albo podąża na dół (tonie). Jeżeli te siły są równe, ciało pozostaje zawieszone w płynie, nie podnosząc się ani nie opadając. W przypadku, gdy jaki przedmiot

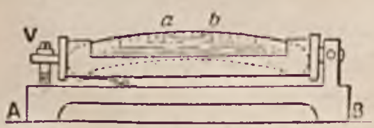
*) Archimedes, wielki matematyk i myśliciel grecki, który pierwszy wypowiedział to twierdzenie, żył w III wieku przed Chrystusem.

pływa w cieczy, będąc częściowo w niej zanurzony, ciężar cieczy w objętości zanurzonej części ciała (taka jest bowiem wartość parcia do góry) równa się ciężarowi samego ciała. Jeżeli do łodzi, która pozostaje w części zanurzona w wodzie, wchodzi parę osób, łódź zanurza się głębiej — ciężar łodzi wraz z jej balastem staje się tu większy, ale przy większem zanurzeniu się łodzi ciężar wody w objętości zanurzonej części łodzi staje się również odpowiednio większy.

Doświadczenie IV. Do długiej wąskiej próbówki wlewamy trochę rtęci albo wsypujemy pewną ilość śrutu. Zanurzona w wodzie próbówka pływa, trzymając się pionowo. Zanotowawszy miejsce, do którego się ona zanurza w wodzie (można to wygodnie zaznaczyć, umieszczając wewnątrz próbówki odpowiednio wąski skrawek papieru z dowolną skalą), wpuszczamy ją do innych cieczy, oczywiście, wycierając ją uprzednio. Zgodnie z zasadą Archimedesa zanurza się ona bardziej w alkoholu, mniej w glicerynie. Stopień zanurzenia się zależy tu, oczywiście, od gęstości cieczy; to też z faktu tego korzystamy do budowy gęstościomierzy, o których mowa w art. 64.

63. Libela.

Jeżeli, zanurzywszy w wodzie jeden koniec rurki szklanej, bierzemy w usta drugi jej koniec i dmuchamy przez rurkę, widzimy, jak z zanurzonego w wodzie końca rurki wpadają do wody pęcherze gazu i szybko unoszą się do góry. Zasada Archimedesa tłumaczy nam w zupełności to zjawisko, a z faktu samego korzystamy, między innemi do budowy bardzo rozpowszechnionego przyrządu, zwanego *libelą* i służącego do doświadczalnego wyznaczania kierunku poziomego. Schematycznie przedstawia libelę rys. 133. W oprawie metalowej mamy osadzoną rurkę szklaną, cokolwiek wygiętą ku górze; rurka jest prawie całkowicie wypełniona zabarwionym alkoholem lub eterem, tak że pozostaje tylko malutki pęcherzyk gazu (powietrza zmieszanego z parą cieczy użytej), który zajmuje zawsze najwyższe położenie. Gdy libelę pochylamy, pęcherzyk się przesuwa ku wzniesionemu do góry końcowi libeli. W dobrze sporządzonej libeli pęcherzyk przypada między środkowemi kreskami, zrobionemi na rurce, gdy libela leży na płaszczyźnie poziomej. Bardzo łatwo sprawdzić, czy libela jest dobra: ustawiamy np. ją na stole tak, by zwrócona była,

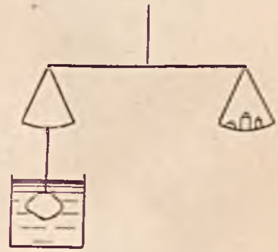


Rys. 133.

dajmy na to, z północy na południe, a po zanotowaniu położenia pęcherzyka względem zaznaczonych kresek, obracamy ją o 180° dokoła osi pionowej, t. j. kładziemy w tem samem miejscu tak, by koniec, który był uprzednio zwrócony ku północy, teraz był zwrócony na południe, i odwrotnie. Jeżeli po takim obrocie pęcherzyk jest przesunięty względem środka libeli o tyleż kresek i w tę samą stronę co przedtem, np. w pierwszym i drugim razie ku północy, libela jest dobra. Gdyby tak nie było, libela daje się wyregulować przy pomocy śruby *V*, której pokręcanie w jedną lub w drugą stronę powoduje podnoszenie się, względnie obniżanie jednego końca oprawy libeli.

64. Wyznaczanie gęstości względnej ciał na podstawie prawa Archimedesa. Gęstościomierze (areometry).

Ćwiczenie 30. Zawieście na mocnej cienkiej nitce u spodu jednej z szalek wagi kawałek metalu np. ołowiu (szalka musi być zaopatrzona w specjalny haczyk); wyznaczcie przez położenie na drugiej szalce odważników masę metalu m (przy ścisłych pomiarach uwzględniać należy masę nitki; tutaj dla uproszczenia pominiemy ją w dalszem rozumowaniu). Podstawcie pod szalką z wiszącym na niej kawałkiem metalu naczynie z wodą tak, by kawałek ten zanurzył się całkowicie w wodzie; równowaga wagi zostanie przez to zakłócona, a dla jej odzyskania będziecie musieli na drugiej szalce położyć odważników mniej, niż poprzednio (moment ten właśnie wyobraża rys. 134); przypuśćmy, iż masa odważników, równoważąca teraz zanurzone w wodzie ciało, jest m_1; na podstawie prawa Archimedesa oraz proporcjonalności mas ciał do ich ciężaru w jednem i tem samem miejscu ziemi powiecie, iż $m - m_1$ wskazuje masę wody w objętości danego ciała. Stosunek $\frac{m}{m - m_1}$ da wam gęstość danego ciała względem gęstości wody w tej temperaturze, którą woda posiada.



Rys. 134.

Znajdźcie tą drogą gęstość ołowiu, żelaza, miedzi, drzewa *).

Ćwiczenie 31. Zawieście, jak w ćwiczeniu 30, bryłkę metalu na jednej szalce wagi i zanotujcie masę m odważników, równoważących bryłkę. Podstawcie naczynie z wodą, by bryłka się w niej zanurzyła, i wyznaczcie masę m_1 odważników, która teraz równoważy bryłkę. Wyjąwszy bryłkę z wody i osuszywszy, pozostawcie ją w dalszym ciągu zawieszoną na tej samej szalce i podstawcie naczynie z alkoholem, by teraz bryłka się zanurzyła w alkoholu; wyznaczcie masę m_2 odważników, która teraz równoważy bryłkę. Macie teraz według tego, co było wyjaśnione, masę

*) W przypadku drzewa dla całkowitego zanurzenia go w wodzie musicie dołączyć kawał metalu, który odgrywa tu rolę pomocniczą, podobnie jak w ćwiczeniu 10-em.

alkoholu $m-m_2$ w objętości zanurzonej bryłki oraz masę wody $m-m_1$ w tej samej objętości. Gęstość względną alkoholu da iloraz $\frac{m-m_2}{m-m_1}$.

Wyznaczcie tą metodą gęstość gliceryny, eteru lub innej cieczy i porównajcie z wynikami, otrzymanemi przez was na innej drodze, oraz z wartościami, podanemi w tablicach *).

W praktyce laboratoryjnej i technicznej znajdują wielkie zastosowanie *gęstościomierze* (areometry), które pozwalają w prędki sposób wyznaczać gęstość względną cieczy (są też areometry do wyznaczania gęstości względnej ciał stałych). Najbardziej rozpowszechniony typ areometru przedstawia rys. 135; gęstościomierz taki składa się z szerszej rurki szklanej, do której u góry przylutowana jest rurka węższa, mieszcząca wewnątrz skalę z podziałką, u dołu zaś kuleczka z rtęcią lub śrutem. Przyrząd ten, zanurzony w cieczy, pływa w niej, utrzymując się pionowo (równowagę tę nadaje mu właśnie rtęć lub śrut w dolnej części przyrządu) i zanurzając się głębiej lub mniej głęboko, zależnie od gęstości cieczy, do której został włożony. Jeżeli np. w wodzie zanurza się on do jednej ze środkowych kresek na podziałce, w którą zaopatrzona jest węższa rurka, to w cieczy gęstszej np. glicerynie zanurzy się mniej, t. j. do jednej z kresek, leżących bliżej szerokiej części przyrządu, natomiast w cieczy mniej gęstej np. alkoholu lub eterze zanurzy się więcej, t. j. do kreski, leżącej bliżej górnego końca skali. Skalę sporządza się tak, iż przy kreskach stoją liczby, wskazujące odrazu wartości gęstości cieczy, w której areometr jest zanurzony. Sprawdzić, czy skala jest dobrze zrobiona, można w ten sposób, że wyznaczamy np. gęstość jakiej cieczy drogą, wyżej opisaną, a następnie zanurzamy w tej cieczy areometr; jeżeli liczba przy kresce, do której przyrząd się zanurza, jest taka sama, jaką otrzymaliśmy na gęstość, areometr jest dobry. Każdy areometr jest zaopatrzony w termometr (dlaczego?). Jeżeli areometr przeznaczony jest do jakiego specjalnego użytku, posiada odpowiednią numerację na skali. Tak np. są areometry, zwa-

Rys. 135.

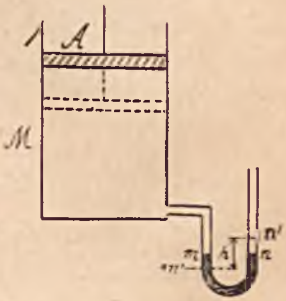
*) Pragnąc uwzględnić wpływ temperatury, musicie otrzymany wynik pomnożyć przez gęstość wody w temperaturze, obserwowanej w doświadczeniu (p. tablice na końcu książki) — wszak tylko w 4° C. gęstość tę przyjmujemy za = 1.

ne alkoholometrami lub spirytusomierzami — pozwalają one bezpośrednio odczytać procentową zawartość alkoholu w roztworze wodnym tej substancji. Areometry, zwane cukromierzami, pozwalają w prędki sposób wyznaczać procentową zawartość cukru w wodnym roztworze i t. p.

Ćwiczenie 32. Wyznaczcie przy pomocy areometru gęstości cieczy, które znaleźliście w ćwiczeniu 31-m, i porównajcie wyniki, otrzymane jednym i drugim sposobem.

65. Manometry. Zmiany ciśnienia w gazie, towarzyszące zmianom jego objętości.

Doświadczenie. Naczynie cylindryczne z tłokiem łączymy z rurką szklaną, zgiętą w kształcie litery U i zawierającą nieco rtęci (rys. 136). Na powierzchnię m rtęci w jednem ramieniu rurki prze gaz, zawarty w naczyniu M; na powierzchnię n rtęci w drugiem ramieniu prze atmosfera; jeżeli w obu ramionach rtęć stoi na jednym poziomie, świadczy to, iż z obu stron ciśnienie jest jednakowe. Wpychając tłok w głąb naczynia M, powodujemy zgęszczenie powietrza w niem, a jednocześnie widzimy, iż rtęć w ramieniu rurki, bliższem naczynia, opada np. do m', w drugiem podnosi się do n'. Jeżeli więc przedtem w naczyniu M panowało ciśnienie, równe atmosferycznemu, teraz powiemy, iż w naczyniu M ciśnienie jest większe, a różnica poziomów rtęci w rurce pozwala ocenić, o ile to ciśnienie zwiększyło się — mianowicie powiemy, iż miarą wzrostu ciśnienia jest tu wysokość słupka h rtęci i, jeżeli np. $h = 38$ cm powiemy krótko, iż ciśnienie wzrosło o $1/2$ atmosfery *). Podobnie więc jak przy pomocy barometrycznego słupa rtęciowego wymierzamy ciśnienie atmosferyczne, tak tu stosujemy tę samą metodę do wymierzania ciśnienia gazu wogóle. Przyrządy takie jak opisana rurka z rtęcią, służące wogóle do mierzenia ciśnienia, nazywają się *manometrami*. Konstrukcja manometrów bywa bardzo rozmaita;



Rys. 136.

Rys. 137.

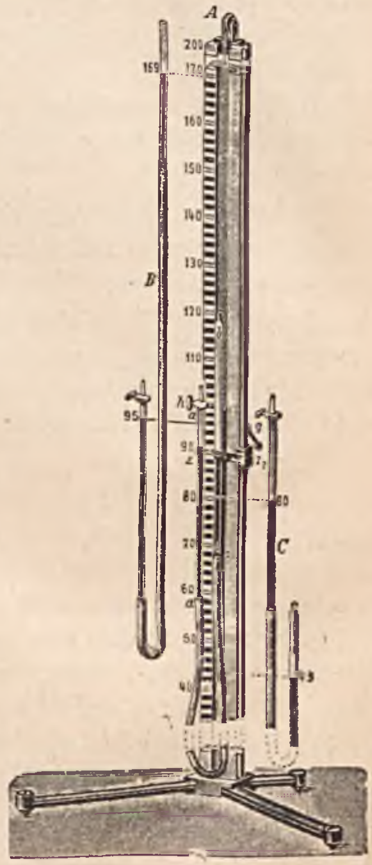
*) Będzie to ściśle, jeżeli zmierzona jednocześnie wysokość słupa barometrycznego wynosi 76 cm.

rys. 137 przedstawia (w osłonie i bez osłony) jeden z używanych typów manometrów metalowych — wnętrze zgiętej rurki sprężystej łączy się ze zbiornikiem, w którym chcemy zmierzyć ciśnienie; zależnie od wartości tego ciśnienia (zewnętrzne ciśnienie atmosferyczne mało się względnie zmienia) rurka się więcej lub mniej wygina, co się uwidocznia za pośrednictwem połączonej z końcem rurki wskazówki. O barometrze moglibyśmy powiedzieć, że jest to manometr, przeznaczony specjalnie do mierzenia ciśnienia atmosferycznego.

Gazy są rozprężliwe, t. j. nie posiadają tak jak ciecze określonej do pewnego stopnia objętości, lecz mogą wypełniać wszelką objętość. Jeżeli tłok w naczyniu *M* podnosimy do góry, przesuwając z tego położenia, przy którem poziom rtęci w obu ramionach manometru był jednakowy, wytwarza się znowu różnica tych poziomów, ale w kierunku odwrotnym, niż przy posunięciu tłoka w dół — teraz rtęć stoi wyżej w ramieniu, złączonem z naczyniem i, podobnie jak poprzednio, z tej różnicy poziomów czytamy, o ile teraz ciśnienie w naczyniu *M* zmniejszyło się. A zatem ciśnienie w gazie zwiększa się, w miarę jak objętość jego zmniejszamy, t. j. gdy gaz zgęszczamy i odwrotnie — zmniejsza się przy zwiększaniu objętości gazu.

66. Prawo Boyle-Mariotte'a.

D o ś w i a d c z e n i e. W celu znalezienia zależności ilościowej między zmianami objętości a ciśnieniem gazu użyjemy następującego przyrządu (rys. 138). Rurka szklana zaopatrzona jest na jednym końcu w kurek *h*, drugim zaś złączona jest z rurką kauczukową; ta ostatnia znów drugim końcem łączy się z inną rurą szklaną z obu końców otwartą (na końcu *b* rura ta jest zwężona i zagięta, by kurz się do wnętrza nie przedostawał). Po nalaniu do połączonych w ten sposób rurek rtęci i umocowaniu nieruchomo rurki z kurkiem, możemy podnosić lub obniżać drugą rurkę, jak to przedstawiają rysunki, zrobione obok, a przez to albo przelewać rtęć do pierwszej z rurek, albo ją stamtąd usuwać. Przypuśćmy, iż kurek *h* pozostaje otwarty; wtedy w obu ramionach naszego przyrządu panuje ciśnienie atmosferyczne i rtęć w obu rurkach szklanych pozostaje na jednym poziomie, jakkolwiekbyśmy podnosili lub obniżali prawe ramię. Przypuśćmy, iż przy pewnem jego położeniu poziom rtęci przypada, jak na środkowej części rys. 138, na 90-tej podziałce skali centymetrowej, umocowanej na statywie. Zamykamy kurek *h* i podnosimy prawe ramię rurki do góry. Rtęć w rurce pod kurkiem podnosi się, wszakże nie tak, jak w drugiej — wytwarza się pewna różnica poziomów. Powietrze w rurce z kurkiem zostaje przytem zgęszczone; objętość jego zmniejsza się, jednocześnie ciśnienie wzrasta, a miarę tego przyrostu ciśnienia daje słup rtęci, jak to już było wyjaśnione w art. poprzednim. Okazuje się przytem, że, jeżeli objętość powietrza zostaje zmniejszona dwukrotnie, co daje się dokładnie odczytać na podziałce, to wysokość słupa rtęci, równoważącego przyrost ciśnienia, wynosi tyleż, co wysokość słupa barometrycznego; ten przypadek właśnie przedstawia rysunek lewy — rtęć w rurce zamkniętej podniosła się do 95 podziałki (kurek, t. j. koniec rurki przypada na 100-ej podziałce), w otwartym zaś końcu do 169-ej podziałki, t. j. wytworzył się słup rtęci wysokości 74 cm (169 cm — 95 cm). Jeżeli zmniejszymy objętość gazu w stosunku do pierwotnej trzykrotnie, to słup równoważący rtęci będzie dwa razy dłuższy od słupa barometrycznego. Jaki z tego wyciągamy wniosek? Oto początkowo, gdy rtęć w obu ramionach naszego przyrządu stoi na jednakowym poziomie, powietrze w rurce zamkniętej (z kurkiem) posiada ciśnienie takie samo jak atmosfera — wartość tego ciśnienia wyznaczamy przy pomocy barometru (w danym razie słup barometryczny ma wysokość 74 cm). Gdy objętość powietrza zmniejszamy dwukrotnie, ciśnienie jego wzrasta o tyle, ile wynosi to ciśnienie atmosferyczne, a więc stanowi już dwie atmosfery; gdy objętość zmniejszamy trzykrotnie, ciśnienie stanowi już trzy atmosfery i t. d. Innemi słowy okazuje się, iż w tym samym stosunku, w jakim zmniejsza się objętość powietrza, wzrasta jego ciśnienie.



Rys. 138.

Zależność szukaną można znaleźć, nie zmniejszając, lecz zwiększając objętość powietrza w rurce zamkniętej. W tym celu, nie otwierając kurka h, obniżamy prawe ramię, jak to wskazuje rysunek z prawej strony. Teraz poziom rtęci opada bardziej w rurce otwartej niż zamkniętej. Przypuśćmy, iż w rurce zamkniętej powietrze zajmuje objętość 2 razy większą niż na początku (rtęć opada do 80-ej podziałki); okazuje się, iż różnica poziomów rtęci wynosi tyle, co połowa wysokości słupa barometrycznego (80 cm — 43 cm = 37 cm), t. j. teraz ciśnienie w rurce zamkniętej stanowi połowę tego, co wynosiło na początku. A więc i tutaj widzimy, iż w tym samym stosunku, w jakim się zwiększyła objętość powietrza, zmniejszyło się jego ciśnienie. Podkreślmy jeszcze, iż podczas tych doświadczeń powietrze badane pozostaje w niezmiennej temperaturze; gdyby temperatura się zmieniała, nie stwierdzilibyśmy powyższego.

Otóż tę prostą zależność, właściwą różnym gazom, odkryli, niezależnie jeden od drugiego, dwaj uczeni Boyle i Mariotte (w drugiej połowie wieku XVII).

Możemy w następujący sposób sformułować to tak zw. prawo *Boyle-Mariotte'a: w stałej temperaturze ciśnienie gazu jest odwrotnie proporcjonalne do jego objętości.*

Przypuśćmy, iż objętość gazu jest v_1, a ciśnienie jego p_1; zgęszczając gaz, zmniejszamy jego objętość, lub też odwrotnie, dajemy mu się rozszerzyć; w tej nowej objętości v_2 ciśnienie staje się inne p_2. Prawo Boyle-Mariotte'a wyraża wzór:

$$p_1 : p_2 = v_2 : v_1 \qquad (1)$$

skąd

$$v_1 p_1 = v_2 p_2 \qquad (2)$$

A więc, jak to wskazuje wzór (2), gdy zmieniamy w stałej temperaturze objętość gazu, ciśnienie jego zmienia się tak, iż iloczyn tych dwu wielkości pozostaje bez zmiany. Prawo zatem Boyle-Mariotte'a wyrazić możemy jeszcze tak: *w stałej temperaturze iloczyn z objętości danego gazu przez jego ciśnienie jest wielkością stałą;*

$$\text{przy } t = \text{const.}^{*)} \qquad vp = \text{const.} \qquad (3)$$

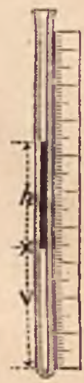
Dokładniejsze badania wykazały, iż naprawdę gazy niezupełnie stosują się do tego prawa, odchylenia zaś są tem większe, im większemu ciśnieniu są one poddawane; przytem dla poszczególnych gazów, jak wodór, tlen, bezwodnik węglowy, te uchylania się od prawa Boyle-Mariotte'a nie są zupełnie jednakowe.

Gaz, jakiego w rzeczywistości nie znamy, a któryby podlegał dokładnie prawu Boyle-Mariotte'a, nazywamy gazem *doskonałym.* Gazy rzeczywiste, zwłaszcza niektóre jak wodór, hel, tlen, azot, mało się róż-

*) „Const.", skrócone łacińskie constans = stały.

nią od doskonałego, a więc o ile chodzi o cele praktyczne, możemy na te różnice nie zwracać uwagi i traktować te gazy, *jakgdyby* one się stosowały dokładnie do prawa Boyle-Mariotte'a.

Ćwiczenie 33. Weźcie rurkę szklaną długości 60—70 cm o średnicy wewnętrznej ok. 1 mm, zatopioną u jednego końca i cokolwiek rozszerzoną u drugiego (rys. 139). Ustawcie rurkę pionowo zamkniętym końcem ku dołowi na tle skali milimetrowej. Połączcie górny koniec rurki przy pomocy rurki gumowej z niewielkim lejkiem i nalejcie do lejka trochę czystej rtęci. Rtęć nie będzie się wlewała swobodnie do rurki, zatykając bowiem całkowicie rurkę nie da możności ujść z rurki zawartemu w niej powietrzu. Przetykając słupek rtęci w rurce cieniutkim drucikiem stalowym, dacie ujście zawartemu w rurce powietrzu i stopniowo wprowadzicie do rurki słupek rtęci taki, jak to widzicie na rysunku (nie przerywany pęcherzykami powietrza). Zakładając, że przekrój rurki jest wszędzie jednakowy, możecie uważać, iż objętość zamkniętego w rurce pod słupkiem rtęci powietrza jest proporcjonalna do długości wypełnionej tem powietrzem części rurki ($v = sl$, gdzie l jest tą długością, s zaś przekrojem wewnętrznym rurki). Jeżeli odczytane jednocześnie ciśnienie barometryczne jest b, wysokość zaś słupa rtęci w rurce jest h, to powietrze, zamknięte w dolnej części rurki, pozostaje pod ciśnieniem (i samo wywiera ciśnienie) $= b + h$. Wprowadźcie większe i mniejsze ilości rtęci do rurki i zanotujcie wyniki obserwacji w takiej tablicy, jaką podajemy dla przykładu:



Rys. 139.

wysokość słupa barometrycznego $b = 756$ mm.

długość *(l)* słupa powietrza w rurce .	6.4 cm	5.8 cm	i t. d.
objętość *(v)* powietrza w rurce . . .	$s \cdot 6{,}4$	$s \cdot 5{,}8$	
ciśnienie $(b + h)$	770	850	
ciśnienie $\times$ objętość $(p \cdot v)$	$s \cdot 6{,}4 \cdot 770 = s \cdot 4928$	$s \cdot 4930$	

Powietrze w rurce będziecie mieli tylko pod ciśnieniem atmosferycznem, jeżeli rurkę położycie poziomo; ciśnienie mniejsze od atmosferycznego otrzymacie, stawiając rurkę pionowo otwartym końcem ku dołowi (wtedy ciśnienie $= b - h$).

Zważając, by doświadczenie zachodziło z tą samą ilością powietrza *w stałej temperaturze,* otrzymacie ciekawy wynik, wyrażony w ostatnim wierszu tablicy, a mianowicie, iż iloczyn z objętości gazu przez jego ciśnienie pozostaje mniej więcej dla wszystkich zaobserwowanych przypadków ten sam (pamiętajcie o możliwych błędach obserwacji).

Ćwiczenie 34. Przedstawcie wyniki, otrzymane w ćwiczeniu 33, metodą wykreślną, odmierzając a) na osi x-ów objętości, a na osi y-ów odpowiadające im ciśnienia powietrza; b) na osi x-ów objętości, a na osi y-ów odpowiadające im iloczyny z objętości przez ciśnienie.

67. Prężność i ciśnienie mieszanin gazowych.

Jeżeli do zbiornika, mieszczącego w sobie pewien gaz, wpuścimy inny, zmieszają się wkrótce tak doskonale, że tworzyć będą jednolitą mieszaninę. Powietrze jest mieszaniną całego szeregu gazów; zawiera ono w największej ilości azot i tlen, poza tem argon, bezwodnik węglowy, parę wodną oraz drobne ilości amonjaku, helu, neonu, kryptonu, ksenonu; dodajmy, że mowa tu o powietrzu przy powierzchni ziemi; wraz z wysokością składniki te ulegają zmianie. Jeżeli ograniczymy się do wymienienia dwu głównych części składowych powietrza, będziemy mogli powiedzieć, iż w przybliżeniu 21% stanowi w niem tlen, zaś 79% azot. Uczonemu angielskiemu *Daltonowi* zawdzięczamy wykrycie zależności, w jakiej pozostaje prężność i ciśnienie mieszaniny gazowej od ciśnienia i prężności jej składowych części. Okazuje się, iż *ciśnienie, wywierane w danym zbiorniku przez daną mieszaninę, równa się sumie ciśnień, jakie w tymże zbiorniku wywierałby każdy ze składników mieszaniny, gdyby sam tylko wypełniał dany zbiornik.*

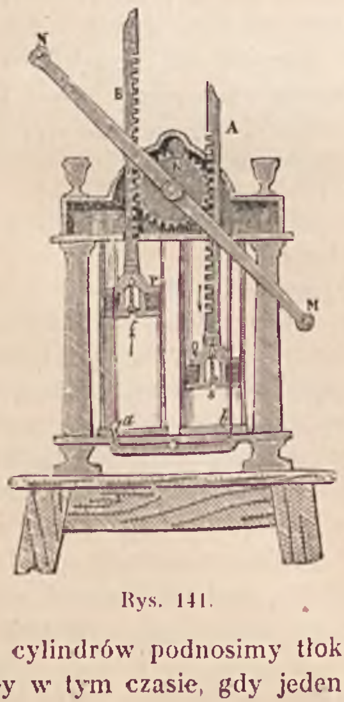
Jeżeli zatem do pustego zbiornika, mającego pojemność 10 litrów, wpuścimy 1 litr tlenu, odmierzony pod ciśnieniem jednej atmosfery, będzie on tam zgodnie z prawem Boyle-Mariotte'a wywierał ciśnienie równe 0,1 atmosfery; jeżeli następnie do tegoż zbiornika wpuścimy 1 litr azotu, odmierzony również pod ciśnieniem jednej atmosfery, przekonamy się zapomocą manometru, iż teraz mieszanina, która się utworzyła, wywiera ciśnienie = 0,2 atm. To samo otrzymalibyśmy, gdybyśmy najpierw wpuścili azot, a potem tlen. W ten sposób właśnie udowodniamy, że ciśnienie mieszaniny gazowej sumuje się z ciśnień jej składowych części.

68. Urządzenie pompy powietrznej.

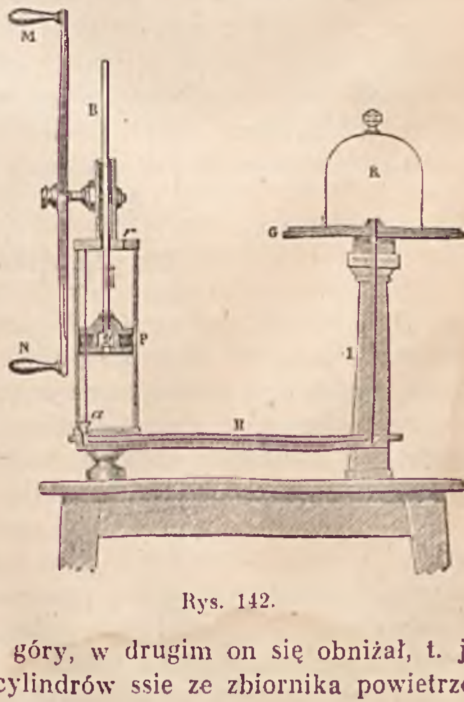
Najprostszy i najdawniejszy typ pompy powietrznej przedstawia schematycznie rys. 140. Składa się ona z naczynia walcowego, w którem porusza się szczelnie dopasowany tłok *C* z otworem, przykrytym klapą *D*, która się może otwierać nazewnątrz, a do przykrywanego otworu przyciśnięta jest słabą sprężyną, pominiętą na rysunku. Zbiornik *A*, z którego pragniemy wypompowywać powietrze lub inny gaz, łączy się z cylindrem zapomocą rurki, zaopatrzonej w kurek *K*. Jeżeli kurek ten nastawiony jest tak, że między zbiornikiem a wnętrzem cylindra jest połączenie, i podnosimy tłok do góry, klapa *D* pozostaje zamknięta przez zewnętrzne ciśnienie, któremu dopomaga wzmiankowana sprężyna, a gaz ze zbiornika *A* skutkiem swej rozprężliwości podąża do przestrzeni *B* pod tłokiem. Jeżeli teraz po zamknięciu kurka *K* będziemy tłok popychali w kierunku przeciwnym, zmniejszanie się objętości znajdującego się pod tłokiem gazu będzie warunkowało stopniowo coraz to większe jego ciśnienie, co wreszcie spowoduje otworzenie klapy *D* i wychodzenie gazu przez odsłonięty otwór nazewnątrz. Po doprowadzeniu tłoka do podstawy cylindra należy znów otworzyć kurek *K* i tłok podnieść do góry i t. d. Oto i mamy wytłumaczenie zasady pompy *rozrzedzającej*. Gdybyśmy natomiast użyli przyrządu o podobnej budowie z tą różnicą, by klapa *D* otwierała się w stronę przestrzeni *B*, a nie nazewnątrz, otrzymalibyśmy model pompy *zgęszczającej* — tu, oczywiście, należy kurek *K* trzymać zamknięty, gdy tłok podnosimy, otwierać zaś, gdy posuwamy go ku podstawie cylindra.

Rys. 140.

Rys. 141 i 142 przedstawiają w przekroju rzeczywistą pompę powietrzną rozrzedzającą tego typu; jeszcze dziś są one bardzo rozpowszechnione w szkołach. Widzimy na rysunkach kanały, przewiercone w tłokach i przykryte klapami, przytrzymywanemi przez sprężyny; dwa cylindry — a nie jeden — używają się dlatego, by podczas gdy zapomocą rękojeści w jednym



Rys. 141.



Rys. 142.

z cylindrów podnosimy tłok do góry, w drugim on się obniżał, t. j., by w tym czasie, gdy jeden z cylindrów ssie ze zbiornika powietrze, z drugiego jednocześnie było usuwane zawarte już w nim powietrze. Z rysunku widać, jak są połączone oba cylindry z talerzem, przykrytym płytą szklaną; na talerzu umieszcza się np. dzwon, z pod którego pragniemy usunąć powietrze. Łatwe do zrozumienia jest także połączenie z manometrem (nie przedstawione na rysunku), pozwalającym ocenić wartość osiągniętego rozrzedzenia. Zamiast niewygodnego otwierania i zamykania kurka K, jak to było przedstawione na schemacie, mamy tu urządzenie, działające automatycznie — przez tłok przechodzi suwający się w nim z niewielkiem tarciem pręt, zakończony stożkową zatyczką; gdy tłok idzie w górę, unosi on ten pręt, przez co się otwór, zamknięty przez zatyczkę, otwiera i mamy połączenie zbiornika opróżnianego z wnętrzem danego cylindra (gdy się cokolwiek pręt podniesie, opiera się on o przykrywę cylindra, zatrzymuje się, a tłok po nim sunie dalej w górę); gdy tłok obniżamy, pociąga on pręt ku dołowi, zatyczka wchodzi w otwór, prowadzący do dzwonu, przez co połączenie zostaje przerwane (i tu potem tłok podąża dalej ku dołowi, sunąc z niewielkiem tarciem po pręcie).

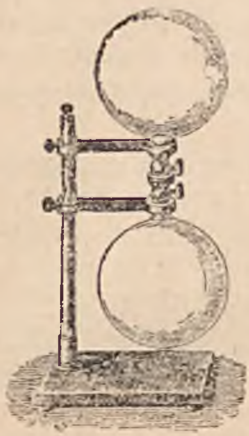
Pompy tego typu nie dają znacznych rozrzedzeń (dobrze, jeżeli dochodzimy do ciśnienia słupa rtęci $^1/_2$ cm); gdy przez obniżanie tłoka usuwamy zebrane pod nim powietrze, zbiera się ono w niedających się uniknąć przy konstrukcji zagłębieniach, a więc nie można go zupełnie usunąć. Poza tem trudno osiągnąć dokładną szczelność zatyczek, klap. Znaczny postęp został osiągnięty przez uszczelnianie podejrzanych w pompie miejsc warstwami oliwy, ale szczegółowo zatrzymywać się na tem nie będziemy. Nie będziemy też podawali opisu całego szeregu inaczej urządzonych pomp, doskonale działających.

69. Zjawisko dyfuzji.

Doświadczenie I. W jednej z dwu kul, zaopatrzonych w kurki i dających się ze sobą połączyć (rys. 143), mamy powietrze, drugą wypełniamy gazem barwnym, np. parą bromu; oba gazy są pod zwykłem ciśnieniem atmosferycznem. Pozostawiając obie kule połączone przy otwartych kurkach, widzimy, jak stopniowo barwny gaz przenika do drugiej kuli, zabarwiając jej wnętrze. Po pewnym czasie (kilku, kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu godzinach), który zależy od przekroju rurki, łączącej obie kule, mamy jednolite zabarwienie w obu kulach, co świadczy, że każdy z danych gazów częściowo przewędrował z jednej kuli do drugiej poprzez łączący je kanał, i gazy utworzyły jednolitą mieszaninę w obu kulach.

Zjawisko takiego wzajemnego przenikania gazów nosi nazwę *dy-*

fuzji. Tłumaczymy to sobie w ten sposób, że każdy gaz składa się z oddzielnych cząsteczek, poruszających się nieustannie w różnych kierunkach po linjach prostych; cząsteczki zderzają się ze sobą i zmieniają przytem kierunek ruchu, oraz uderzają o ściany naczynia, co daje właśnie obserwowane ciśnienie gazu na zawierające go naczynie. Owe



Rys. 143.

Rys. 144.

Rys. 145.

zderzenia cząsteczek powodują, iż poszczególna z nich to się posuwa w określoną stronę, to się cofa, i właśnie dzięki temu całkowite zmieszanie się poprzez łączącą rurkę przenikających się nawzajem gazów wymaga określonego czasu.

Zjawiskiem dyfuzji gazów tłumaczymy sobie rozchodzenie się zapachów: gdy w jednym końcu pokoju umieszczamy niczem nie osłonięty kawałek kamfory, naftaliny, trochę perfum, amonjaku, po pewnym czasie (ale nie odrazu) czujemy dany zapach w całym pokoju.

Doświadczenie II. Wnętrze porowatego cylindra glinianego łączymy przy pomocy rurki szklanej z jedną szyjką t. zw. flaszki Woulffa (rys. 144), a do drugiej szyjki wstawiamy, szczelnie ją tam osadzając, rurkę szklaną, której koniec zanurza się w wodzie, znajdującej się we flaszce. Po przykryciu cylindra porowatego zlewką lub kloszem wpuszczamy pod klosz strumień gazu świetlnego lub wodoru. Z rurki, zanurzonej w wodzie, tryska wtedy fontanna.

Świadczy to, że dyfuzja gazów zachodzi i wtedy, gdy są przedzielone ścianą porowatą; przytem różne gazy przenikają przez taką ścianę z różną prędkością. W doświadczeniu tem powietrze z cylindra glinianego przedostaje się pod osłaniający go z zewnątrz klosz, a gaz świetlny lub wodór z pod klosza przechodzi do wnętrza cylindra, przytem z większą prędkością, skutkiem czego ciśnienie w cylindrze, a więc i nad powierzchnią wody we flaszce wzrasta, co powoduje wytrysk wody.

D o ś w i a d c z e n i e III. Nalewamy do wysokiej zlewki szklanej lub słoja najpierw wody, a następnie ostrożnie alkoholu, tak, by alkohol, jako ciecz o mniejszej gęstości, tworzył słup, spoczywający na słupie wody (rys. 145). Wobec różnych własności optycznych wody i alkoholu wyraźnie dostrzegamy granicę obu cieczy. Stopniowo wszakże przy najzupełniejszym spoczynku całego naczynia granica ta się zaciera, a po pewnym czasie przekonywamy się, że nie mamy już w naczyniu dwu cieczy, lecz jednolitą mieszaninę obu.

Podobnie jak w doświadczeniu I obserwowaliśmy dyfuzję gazów, tutaj poznajemy *dyfuzję cieczy*. Tłumaczymy ją w podobny sposób, że cząsteczki alkoholu przenikają do wody, cząsteczki wody do alkoholu (te wędrują do góry — wbrew sile ciężkości), aż wreszcie wytwarza się stopniowo jednolita mieszanina. Zauważmy tylko, iż ciecze zdradzają większe zawiłości w budowie swej niż gazy i o ruchach poszczególnych cząsteczek cieczy nie możemy sobie wytworzyć tak prostego obrazu, jak to uczyniliśmy dla gazów.

D o ś w i a d c z e n i e IV. Na dnie słoja szklanego, wypełnionego czystą wodą, umieszczamy kawałek siarczanu miedzi i pozostawiamy to wszystko w spokoju. Z biegiem czasu dostrzegamy, iż niebieskie zabarwienie cieczy, które się najpierw ukazuje na dnie słoja, przenosi się coraz wyżej, a po dość długim czasie, szeregu tygodni, a nawet miesięcy, otrzymujemy ciecz jednolicie zabarwioną, co świadczy, że się wytworzył jednolity roztwór siarczanu miedzi w wodzie. Tu również mamy do czynienia z *dyfuzją* — dyfunduje siarczan miedzi. Możemy do słoja wlać warstwę roztworu siarczanu miedzi, a na to warstwę czystej wody; będziemy wtedy również obserwowali, że z biegiem czasu zaciera się wyraźna początkowo granica pomiędzy dwiema warstwami i roztwór stopniowo staje się jednolitym. I tu dla całkowitego przeprowadzenia doświadczenia trzeba tygodni, a nawet miesięcy. Dodajmy, że dla uniknięcia parowania użytych cieczy należy naczynia, zawierające je, przykrywać hermetycznie, np. zapomocą dobrze przyszlifowanych płytek szklanych.

W ostatniem doświadczeniu używaliśmy siarczanu miedzi dlatego, że możemy tu postępowanie procesu dyfuzji bezpośrednio obserwować okiem. Możemy jednak używać innych ciał, np. cukru lub soli; i one również dyfundują w wodzie, tworząc wkońcu jednolity roztwór.

Nie wynika stąd wszakże, że wszystkie ciała dają to zjawisko. Jeżeli na dnie słoja z wodą umieścimy rtęć lub kawałek innego metalu, zjawiska takiego, jakie wyżej opisaliśmy, nie stwierdzimy.

D o ś w i a d c z e n i e V. Do naczynia z wodą wstawiamy słoik, napełniony całkowicie alkoholem i zawiązany szczelnie pęcherzem. Po pewnym czasie stwierdzamy, że pęcherz wydyma się ku górze, jak to przedstawia rys. 146, a badając zawartość słoja i naczynia, przekonywamy się, że w słoju nie mamy już takiego alkoholu, jaki był poprzednio, lecz jest on rozcieńczony wodą, naczynie zaś zewnętrzne zawiera alkohol, czyli że poprzez błonę odbywa się przechodzenie w jedną stronę alkoholu, w drugą wody (czy z jednakową prędkością?). Taka dyfuzja cieczy przez błony nazywa się *osmozą*.

Rys. 146.

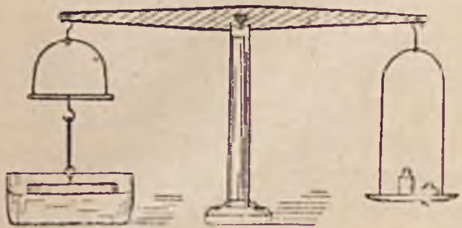
Mieszaninę alkoholu z wodą nazywamy *roztworem* alkoholu w wodzie. Podobnie mówimy o roztworach cukru, soli kuchennej i innych ciał w wodzie lub innych cieczach. Tworzenie się roztworu drogą dyfuzji zachodzi, jak widzieliśmy, bardzo powoli, jeżeli substancja o większej gęstości znajduje się poniżej substancji o gęstości mniejszej. Pragnąc prędzej sporządzić roztwór, dopomagamy sobie mieszaniem. Daje się przytem zauważyć fakt, że niektóre substancje rozpuszczają się w innych w pewnym tylko ilościowym stosunku (zależnym naogół od temperatury). Gdy rozpuszczać będziemy np. cukier w szklance wody w określonej temperaturze, przekonamy się, iż po rozpuszczeniu się pewnej ilości cukru reszta będzie pozostawała dalej w wodzie nierozpuszczona. O takim roztworze, który zawiera największą dla danych warunków ilość rozpuszczonej substancji, mówimy, iż jest *nasycony*.

W mowie potocznej, mówiąc o roztworach, myślimy zazwyczaj o pewnych substancjach, stałych lub ciekłych, zawartych w cieczach. Nie jest to jednak słuszne. Tak np. gazy rozpuszczają się w cieczach — woda surowa zawsze zawiera w sobie powietrze (wydziela się ono w postaci pęcherzyków na ścianach szklanki, zawierającej tę wodę); powietrze, rozpuszczone w wodzie rzek, jezior, mórz, potrzebne jest do oddychania tworom, żyjącym w wodzie (czy akwarjum można wypełniać wodą przegotowaną?). Piwo, woda sodowa, wino szampańskie zawierają rozpuszczony w nich bezwodnik węglowy.

W ciałach stałych mogą się również tworzyć roztwory — np. błony, przez które odbywa się dyfuzja cieczy, *nasiąkają* temi cieczami. Podobnie błony nasiąkać mogą gazami; baloniki dziecinne tracą zawarty w nich gaz drogą dyfuzji, która zachodzi właśnie przez takie nasiąkanie. O stali, która zawiera zawsze pewną ilość węgla, mówimy, iż zawiera ona rozpuszczony w niej węglik żelaza; szkła barwne również przedstawiają przykłady roztworów stałych.

70. Spójność. Przyleganie.

Przez dość znaczne obciążenie drutu możemy go *rozerwać;* użyć więc tu musimy znacznej siły dla pokonania *spójności,* t. j. tych sił, które, jak sobie wyobrażamy, działają między cząsteczkami substancji drutu i stawiają przeszkodę oddalaniu się od siebie tych cząsteczek. Siły te są różne w różnych substancjach — inna jest spójność miedzi, inna żelaza, szkła i t. p.



Rys. 147.

Rys. 148.

Zanurzmy pręcik szklany w wodzie (zamiast pręcika użyć możemy własnego palca); po wyjęciu jego z wody dostrzeżemy zwisającą na końcu kroplę — cząsteczki wody, tworzące tę kroplę, trzymają się tu razem, dzięki właśnie spójności; w tem zaś, że kropla nie odrywa się od szkła, lecz wisi na pręciku, widzimy wskazanie, iż działanie cząsteczkowe występuje nietylko między cząsteczkami jednego i tego samego ciała (szkła, wody), ale i pomiędzy cząsteczkami różnych ciał: cząsteczkami wody i cząsteczkami szkła, o ile się znajdują one dość blisko siebie. To ostatnie działanie określamy mianem *przylegania.*

D o ś w i a d c z e n i e. Zawieszamy u jednej szalki wagi płytkę szklaną, jak to przedstawia rys. 147; po zrównoważeniu jej przez odważniki stawiamy pod nią naczynie z wodą tak, by płytka szklana dotknęła powierzchni wody. Spostrzegamy wówczas, iż płytka przylega do cieczy tak, iż przy podnoszeniu zawieszonej płytki unosi ona do góry niewielki słup cieczy, od którego się nie może oderwać (rys. 148); dokładając potrochu odważników na drugą szalkę, dochodzimy wreszcie do takiego obciążenia, że płytka się odrywa: zauważmy jednak, że przytem powierzchnia płytki pozostaje wilgotna, t. j. że właściwie nie pokonywamy tu sił cząsteczkowych przylegania wody do szkła, jeno *spójność wody;* że — użyjmy tego zwrotu — *rozrywamy* słup wody. To samo doświadczenie możemy wykonać, używając alkoholu, eteru, i wówczas porównamy spójność wody ze spójnością alkoholu, eteru.

Użyjmy teraz do tego doświadczenia rtęci zamiast wody przy tej samej płytce, dobrze wytartej. Gdy znowu stykamy płytkę z rtęcią, przylega ona i trzeba użyć znacznie większej siły niż w przypadku wody dla oderwania płytki. Wszakże zachodzi tu poważna różnica — oto płytka po oderwaniu się jest sucha, nie pozostaje ona pokryta rtęcią tak, jak była uprzednio pokryta wodą. W tym więc przypadku pokonywamy tylko *przyleganie* rtęci do szkła.

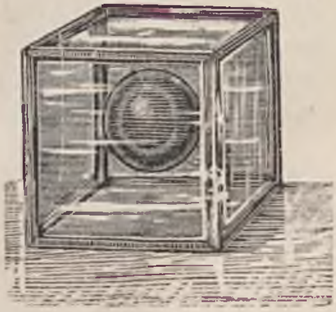
Doświadczenia te tłumaczą nam, dlaczego pewne ciecze zwilżają niektóre ciała stałe przy zetknięciu, a inne nie zwilżają (woda, alkohol zwilżają szkło; rtęć szkła nie zwilża). Oczywiście, zwilżanie zachodzi wtedy, gdy spójność danej cieczy ma mniejszą wartość, niż przyleganie tej cieczy do danego ciała stałego; przeciwnie, o ile przyleganie jest słabsze od spójności, zwilżania niema. (Jak zatem wytłumaczyć fakt, że pręt szklany, pokryty parafiną, po zanurzeniu w wodzie daje się wyjąć „suchy"? Czy atrament zwilża stalówki? Na czem właściwie polega pisanie, rysowanie?).

71. Napięcie powierzchniowe.

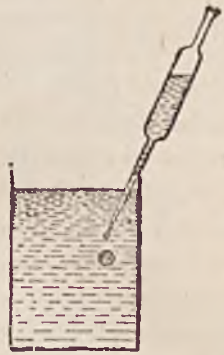
D o ś w i a d c z e n i e I. Kładąc ostrożnie igłę, całą jej długością naraz, na powierzchnię wody, otrzymujemy ciekawe zjawisko, że igła pływa po wodzie, uginając zlekka jej powierzchnię, jakgdyby powierzchnia ta była delikatną błonką sprężystą. Gdy dotykamy wody tą igłą, trzymając ją ukośnie względem powierzchni wody, igła wpada do wody i idzie na dno; tu jakgdyby ta błonka zostaje przebita igłą.

Godne uwagi jest, że krople różnych cieczy posiadają tem dokładniej kształt kulisty, im są mniejsze; łatwo to zaobserwować, gdy rozlejemy trochę rtęci na stole. Jeżeli uprzytomnimy sobie, iż ze wszystkich brył tej samej objętości kula posiada najmniejszą powierzchnię, będziemy musieli powiedzieć, iż to wyraźne dążenie do jak najmniejszej powierzchni świadczy o istnieniu w tej powierzchni pewnego *napięcia,* przypominającego napięcie sprężystych błonek.

D o ś w i a d c z e n i e II. Sporządzamy roztwór alkoholu w wodzie tej gęstości co oliwa; do tego roztworu wpuszczamy trochę oliwy; pozostaje ona w spoczynku gdziekolwiek wewnątrz tego roztworu, tworząc przytem zawsze bryłkę kulistą (rys. 149). (Parciu do góry przeciwdziała tu działanie siły ciężkości; natomiast w przykładzie powyższym z rtęcią, rozlaną na powierzchni stołu, większe jej krople pod działaniem siły ciężkości pozostają spłaszczone w kierunku pionowym) Rys. 150 wyjaśnia, jak wprowadzamy oliwę do wnętrza roztworu.



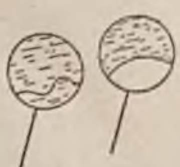
Rys. 149.



Rys. 150.

Zaobserwowane w powyższych doświadczeniach *napięcie powierzchniowe* cieczy doskonale daje się pokazać na błonach z mydlin

D o ś w i a d c z e n i e III. Do roztworu mydła w wodzie, zawierającego trochę gliceryny, zanurzamy pierścień z drutu, do którego uwiązana jest dwoma końcami nitka (rys. 151). Po wyjęciu pierścienia z mydlin widzimy na nim z obu stron nitki rozpiętą błonę, mieniącą się pięknemi barwami. Przekłuwamy błonę (najlepiej gorącą igłą) po jednej stronie nitki, a natychmiast błona, pozostała z drugiej strony nitki, kurczy się i nadaje kształt nitce taki, jak to przedstawione jest z prawej strony na rys. 151. Błona mydlin jest, oczywiście, cienką warstwą cieczy o dwu powierzchniach; skutkiem napięcia powierzchniowego wielkość tych powierzchni dąży do najmniejszej wartości.



Rys. 151.

Rys. 152.

D o ś w i a d c z e n i e IV. Wydymamy bańkę mydlaną przy pomocy rurki szklanej, wyobrażonej na rys. 152. Bańka ma znany dobrze kształt kulisty, co już świadczy o istnieniu napięcia powierzchniowego. Gdy odejmiemy od ust ten koniec rurki, w który dmuchaliśmy, bańka się kurczy, ujawniając tu również istniejące napięcie. Gdy odjęty od ust koniec rurki zbliżamy do płomienia, co właśnie przedstawia rys. 152, płomień się odchyla, zdradzając tem strumień gazu, wypędzanego z bańki przy jej kurczeniu się.

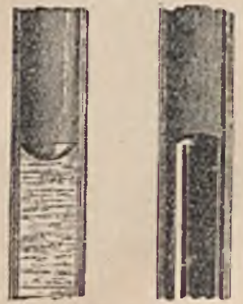
72. Włoskowatość.

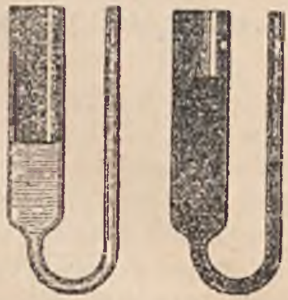
D o ś w i a d c z e n i e I. Do jednego z dwu jednakowych naczyń szklanych *A* i *B* (rys. 153) nalewamy wody, która zwilża szkło, do drugiego rtęci, która szkła nie zwilża. W pierwszem naczyniu ciecz przy ścianach jest nieco wzniesiona w stosunku do reszty jej powierzchni, w drugiem, przeciwnie, stoi przy ścianach niżej. Takie ukształtowanie powierzchni cieczy tuż przy ścianie mieszczącego ją naczynia zależy od ustosunkowania wzajemnego tych sił cząsteczkowych, które ujawniają się w spójności i przyleganiu. W przypadku cieczy, zwilżającej ściany naczynia, powiemy krótko, że przyleganie jest większe od spójności cieczy — pomiędzy cząsteczkami cieczy a cząsteczkami materjału ścian zachodzi działanie silniejsze, niż działanie wzajemne między cząsteczkami cieczy; stąd ciecz przy ścianie jest jakgdyby przyciągnięta do tej ściany, wznosząc się przy niej cokolwiek do góry. Wręcz przeciwnie jest w przypadku cieczy niezwilżającej — tu działanie cząsteczkowe między cząsteczkami cieczy jest silniejsze, niż między cząsteczkami cieczy a cząsteczkami tego materjału, z którego zrobiona jest ściana naczynia.

Rys. 153.

Im mniejszy jest przekrój poziomy naczynia, tem mniejsza jest ta część poziomu mieszczącej się w naczyniu cieczy, którą nazywać możemy płaską. Zatem w bardzo *wąskiem* naczyniu zupełnie tej płaskiej części nie widzimy, natomiast powierzchnia cieczy kształtuje się albo tak, jak to przedstawia rys. 154*a*, w przypadku cieczy, zwilżającej ściany naczynia, albo jak na rys. 154*b*, w przypadku cieczy nie zwilżającej; powierzchnia cieczy jest w pierwszym razie *wklęsła*, w drugim *wypukła*. Fakt ten stwierdzamy w rurkach t. zw. *włoskowatych* (tak nazywają się rurki o wąskim kanale). W rurkach tych występują jeszcze inne ciekawe zjawiska.

Doświadczenie II. Do jednego z dwu jednakowych szklanych naczyń połączonych, z których każde składa się z rurki szerokiej, złączonej z włoskowatą, nalewamy wody (cieczy, zwilżającej szkło), do drugiej — rtęci (cieczy, nie zwilżającej szkła) (rys. 155). Stwierdzamy, że istotnie powierzchnie cieczy w tych rurkach włoskowatych

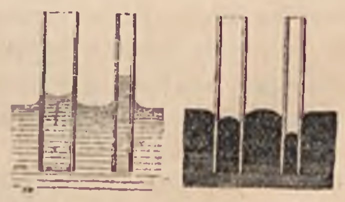

a *b*
Rys. 154.


Rys. 155.

przedstawiają się tak, jak to właśnie widzimy na rys. 154. Poza tem widzimy, że poziom wody w rurce włoskowatej jest wyższy, niż w połączonej z nią rurce szerokiej; przeciwnie, poziom rtęci w rurce włoskowatej przypada niżej, niż w rurce szerokiej.

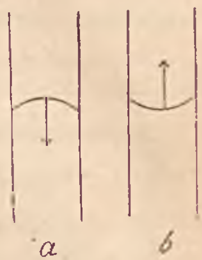
Doświadczenie III. Kilka rurek włoskowatych o różnych przekrojach (rys. 156) zanurzamy w cieczy, która je zwilża. Ciecz pod-


Rys. 156.


Rys. 157.

nosi się w tych rurkach w stosunku do poziomu cieczy w naczyniu, w którem rurki są zanurzone; przytem różnica poziomu jest tem większa, im mniejszy jest przekrój rurki. Wyjaśnia to oddzielnie rys. 157, gdzie przedstawiony jest również przypadek zanurzenia rurek w cieczy, nie zwilżającej ich (np. w rtęci).

Dzieje się więc tak, jakgdyby w rurkach włoskowatych ciecz, zwilżającą ściany, jakieś siły wciągały do rurki i to tem wyżej, im węższa jest rurka; przeciwnie, ciecz, nie zwilżająca ścian rurki, jest jakgdyby z rurek wypychana ku dołowi. Możemy sobie wytłumaczyć to zjawisko, przypominając, że wszak warstewka powierzchniowa cieczy zdradza dążność do stania się jak najmniejszą, t. j. do spłaszczenia się wpoprzek rurki. W ten sposób błonka powierzchniowa wypukła (rys. 158*a*), jakgdyby się kurcząc, wywiera działanie wypychające na znajdującą się pod nią ciecz; przeciwnie, kurczeniu się błonki wklęsłej (rys. 158b) towarzyszyć musi wciąganie znajdującej się pod nią cieczy do rurki. Im węższa jest rurka, tem większa jest krzywizna powierzchni cieczy, tem silniej występuje zarówno pierwsze, jak drugie działanie.



Rys. 158.

Jak wykazują bliższe badania, napięcie powierzchniowe w różnych cieczach jest naogół różne, a i w jednej i tej samej cieczy jest różne w różnych temperaturach. To też i zjawisko wznoszenia się, wzgl. obniżania cieczy w rurkach włoskowatych jest naogół różne dla różnych cieczy.

Ogół zjawisk, które dają ciecze w wąskich kanałach mieszczących je naczyń, nazywamy *włoskowatością*. Jeżeli zanurzamy bibułę w wodzie lub atramencie, ciecz wznosi się po bibule do góry — wszak bibułę możemy uważać za zbiorowisko rurek włoskowatych, utworzonych przez włókienka. Wznoszenie się soków w roślinie też częściowo jest objawem włoskowatości; poza tem wchodzą tu w grę inne czynniki, o których mówić nie będziemy.

Zadania.

47. Na poziomej podstawie stoi kloc dębowy (gęstość w tablicy na końcu książki) kształtu prostopadłościanu o wymiarach 50 cm, 40 cm, 60 cm. Znaleźć ciśnienie, jakie wywiera ten kloc na podstawę, położony kolejno na swych różnych ścianach $\left(g = 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}\right)$?

48. Jakie jest w przybliżeniu ciśnienie w rtęci w punkcie, znajdującym się na głębokości 76 cm pod poziomem?

49. Jakie jest ciśnienie w oceanie na głębokości 7 Km (gęstość wody zakładamy wszędzie jednakową $= 1{,}026 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$). Jakich danych trzeba do ścisłego rozwiązania zadania?

50. Wysokość słupa barometrycznego na parterze wynosi w pewnym momencie 756 mm, jednocześnie zaś barometr na najwyższem piętrze w tej samej temperaturze wskazuje 754,2 mm. Jaka jest w przybliżeniu wysokość domu?

51. W jaki sposób możemy się przekonać, iż rurka barometryczna (rys. 116) zawiera nad powierzchnią rtęci powietrze?

52. Do jednego ramienia naczyń połączonych (rys. 108), zawierających rtęć, nalano alkoholu, wobec czego poziom rtęci w drugiem ramieniu podniósł się o 2 cm. Jaka jest w przybliżeniu wysokość słupa alkoholu?

53. Ciało stałe o masie 128 gr i gęstości 6,8 $\frac{gr}{cm^3}$ zanurzamy całkowicie w wodzie, której gęstość zakładamy $= 1 \frac{gr}{cm^3}$, a następnie w alkoholu, którego gęstość jest 0,8 $\frac{gr}{cm^3}$. Jakiemu parciu ze strony cieczy podlega to ciało w jednym i drugim razie, jeżeli w danem miejscu $g = 980 \frac{cm}{sek^2}$?

54. Kawał drzewa objętości 100 cm^3 i gęstości względnej 0,6 pływa po wodzie; znaleźć objętość zanurzonej części drzewa?

55. Na drucie zawieszony jest kawałek szkła o masie 250 gr i gęstości 2,5 $\frac{gr}{cm^3}$, zanurzony całkowicie w glicerynie w 18^0 (patrz tabl. na końcu książki); średnica drutu = 1,5 mm, $g = 981 \frac{cm}{sek^2}$. Jakiemu ciągnieniu podlega drut?

56. Łódź podwodna posiada masę 500 tonn i objętość 600 m^3; ile wody muszą wchłonąć jej zbiorniki, by się zanurzyła całkowicie?

57. Przez blok przerzucona jest nitka, na której końcach wiszą zanurzone całkowicie w wodzie i równoważące się kawał mosiądzu (gęst. wzgl. 8,5) i kawał kwarcu (gęst. wzgl. 2,65). Jaka jest masa kwarcu, jeżeli masa mosiądzu jest 75 gr? Dając rozwiązanie przybliżone, wskazać, jakich danych brakuje do rozwiązania ścisłego.

58. Manometr rtęciowy (rys. 136) wykazuje ciśnienie słupa rtęci wysokości 12 mm; jakie byłoby wskazanie w tych samych warunkach manometru wodnego? (jakie dane są potrzebne do zupełnie ścisłego rozwiązania?).

59. Pionowo ustawiona rurka, zgięta w kształcie litery U, na jednym końcu zalutowana, u drugiego otwarta, wypełniona jest rtęcią tak, iż ciecz ta wypełnia całkowicie część zalutowaną, w otwartej zaś sięga cokolwiek wyżej miejsca zgięcia. W ten sposób zbudowany przyrząd, umieszczony pod kloszem lub połączony otwartym końcem z kloszem, z którego się wypompowuje powietrze, informuje nas o stopniu osiągniętego rozrzedzenia; w jaki sposób? (manometry do małych ciśnień nazywane bywają wakuummetrami — od łac. vacuum = próżnia).

60. Dwie kule szklane, mające promienie odpowiednio 80 cm i 10 cm, zawierają jednakowe masy wodoru w tej samej temperaturze. Porównać wartość ciśnienia w obu kulach.

61. Gaz, pozostający pod ciśnieniem słupa rtęci 72 cm, posiada objętość 56 cm^3; jaka jest objętość gazu w tej samej temperaturze, jeżeli ciśnienie wzrasta do wartości słupa rtęci 75 cm?

62. W cylindrze zawarte jest pod tłokiem powietrze w ciśnieniu normalnem; odległość od powierzchni tłoka do dna cylindra wynosi 20 cm. Jakie będzie ciśnienie tego powietrza, jeżeli tłok przesuniemy o 5 cm w jedną, względnie w drugą stronę, zakładając, iż temperatura przytem nie ulegnie zmianie.

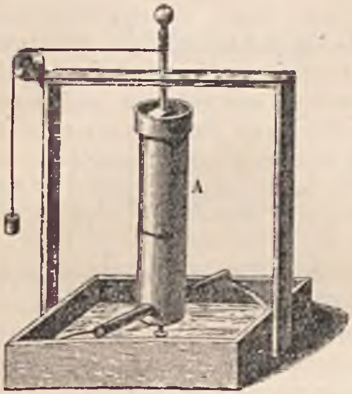
63. Jaki ładunek unieść może wypełniony gazem świetlnym $\left(d = 0{,}0007 \frac{gr}{cm^3}\right)$

balon objętości 1000 m^3, jeżeli masa jego opony, sznurów i kosza wynosi 220 Kg? Dlaczego rachunek daje się wykonać tylko przybliżony?

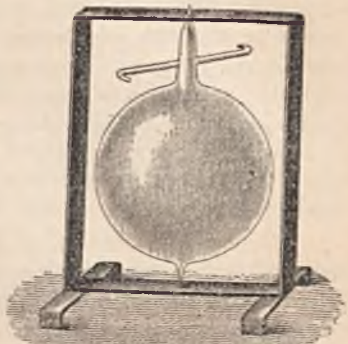
64. Jaka jest w przybliżeniu masa powietrza, wypełniającego pokój o przeciętnych wymiarach 5 m $\times$ 5 m $\times$ 3,5 m?

65. Szklanka o wysokości 12 cm zanurzona jest do wody dnem do góry, przytem tak, iż zawarte w niej powietrze pozostało i że dno przypada na jednym poziomie z powierzchnią wody. Do jakiej wysokości wchodzi woda do szklanki? Dlaczego podane warunki pozwalają rozwiązać zadanie tylko w sposób przybliżony?

66. Która z podanych w art. 57 i 60 metod wyznaczania gęstości względnej cieczy przy pomocy naczyń połączonych nadaje się do porównywania gęstości cieczy, mieszających się ze sobą przy zetknięciu?



Rys. 159.


Rys. 160.

67. Na rysunku 150 przedstawione jest schematycznie wpuszczanie przy pomocy pipetki oliwy do wodnego roztworu alkoholu. Wytłumaczyć działanie pipetki.

68. Zaobserwować tworzenie się kropel przy sączeniu się wody z nieszczelnie zamkniętego kurka (np. u wodociągu); wyrysować kolejne kształty tworzącej się kropli aż do chwili jej oderwania się, i zauważyć, o ile obserwacja ta daje potwierdzenie istnienia napięcia powierzchniowego cieczy?

69. Jeżeli w tych samych warunkach z tego samego otworu sączą się różne ciecze, tworząc krople, wielkość tych kropel wypada naogół różna dla różnych cieczy. Czem to można wytłumaczyć?

70. Strumień powietrza, wypływający z kurczącej się bańki mydlanej (rys. 152), staje się silniejszy w miarę zmniejszania się bańki. Wytłumaczyć to, opierając się na rozumowaniu, dotyczącem rys. 158.

71. Wytłumaczyć, dlaczego trudno jest w palcach utrzymać kawałek lodu, który się *wyślizguje*?

72. Wytłumaczyć, na czem polega trudność chodzenia po czystym lodzie w zwykłem obuwiu?

73. Pompa powietrzna wyciąga w sekundę $^1/_5$ zawartości gazu, znajdującego się w zbiorniku. Jakie będziemy mieli ciśnienie gazu w zbiorniku po 1 minucie pompowania, jeżeli rozpoczęliśmy od ciśnienia, mierzonego słupem rtęci 740 mm?

74. Wytłumaczyć, dlaczego przy pompowaniu powietrza zwykłą pompą tłokową poruszanie tłoków wymaga tem większego wysiłku, im dalej posunięte jest rozrzedzenie w opróżnianym zbiorniku?

75. Rys. 159 wyobraża przyrząd, zwany młynkiem Segnera. Cylindryczne naczynie, mogące się obracać dokoła osi pionowej, zaopatrzone jest u dołu w rurki poziome z otworkami, z których może wypływać ciecz, nalana do cylindra. Strumienie, wypływające z rurek u dołu, skierowane są w jedną stronę (w kierunku ruchu wskazówek zegara, o ile patrzymy na dany przyrząd zgóry). Po nalaniu do cylindrycznego naczynia wody zaczyna się ono obracać z chwilą rozpoczęcia się wypływu z dolnych rurek, przyczem kierunek ruchu obrotowego jest przeciwny kierunkowi wypływu cieczy. Wytłumaczyć to zjawisko, odwołując się do końca art. 40, gdzie mowa była o środku masy.

76. Osadzona w oprawie i mogąca się obracać dokoła osi pionowej bania szklana (rys. 160) ma u góry dwie poziome rurki, odgięte na końcach w jednakowy sposób (w kierunku przeciwnym ruchowi wskazówek zegara, o ile na dany przyrząd patrzymy z góry). Przez te poziome rurki może do bani wchodzić, wzgl. z niej wychodzić zawarty w niej gaz (powietrze); poza tem bania jest zewnątrz szczelnie zalutowana. Gdy umieszczamy przyrząd ten pod kloszem pompy powietrznej i zaczynamy wypompowywać z pod klosza powietrze, bania poczyna wirować w kierunku przeciwnym kierunkowi odgiętych końców rurek poziomych. Wytłumaczyć obserwowane zjawisko (p. zad. 75).

77. Wyżej mówiliśmy, iż tarcie, które jest dla nas często zjawiskiem niepożądanem, w innych razach jest nieodzowne, inaczej bowiem wiele czynności stałoby się dla nas niemożliwemi (trzymanie czegokolwiek w ręce, chodzenie i t. p.). Poruszanie się w tym czy innym ośrodku — powietrzu, wodzie — wymaga również specjalnego nakładu pracy na pokonanie stawianego przez ten ośrodek oporu. Przytoczyć przykłady, gdy ten opór wyzyskujemy ku naszemu pożytkowi.

CZĘŚĆ CZWARTA.

O CIEPLE

Rozdział I. O temperaturze i termometrach.

73. Zmysł ciepła.

W doświadczeniu codziennem mówimy o różnych ciałach, że są gorące, cieple, letnie, chłodne, zimne. Zamiast tych przymiotników można byłoby użyć jednego tylko słowa „ciepły“ z dodaniem pewnego wyrazu, oznaczającego stopniowanie.

W pierwszem przybliżeniu wnosimy o tem, czy ciało dane jest więcej lub mniej ciepłe, dotykając ciała ręką — posługujemy się wtedy jednym ze zmysłów, a mianowicie t. zw. zmysłem ciepła (nie należy go utożsamiać ze zmysłem dotyku).

D o ś w i a d c z e n i e. Niech ktokolwiek zanurzy prawą rękę w wodzie z lodem, a lewą w wodzie o tyle gorącej, by jeszcze bez bólu można było w niej rękę utrzymać; po paru minutach takiej kąpieli niech osoba, wykonywająca doświadczenie, wyjmie jednocześnie ręce z tych naczyń i zanurzy je obie w trzeciem naczyniu z taką wodą, jakiej zazwyczaj używamy do picia, wówczas, idąc za wskazaniem, dostarczonem przez prawą rękę, nazwie ona wodę w trzeciem naczyniu wodą ciepłą, idąc zaś za wskazaniem ręki lewej, nazwie tę samą wodę — wodą chłodną.

Doświadczenie to dowodzi, że wnioski nasze, oparte na danych zmysłu ciepła, mogą być błędne.

74. Pojęcie temperatury.

Jeżeli wrzucamy kawałek gorącego żelaza do zimnej wody, woda staje się coraz cieplejsza, żelazo zaś coraz chłodniejsze; ciała te dążą do stania się jednakowo ciepłemi. Podobnie, jeżeli wlewamy do wody zimnej wodę gorącą, otrzymujemy mieszaninę cieplejszą od pierwszej, chłodniejszą od drugiej. Powiadamy, iż w przykładzie pierwszym żelazo *oddaje ciepło* wodzie, przez co staje się chłodniejsze, woda zaś *pobiera* ciepło, przez co staje się cieplejsza. W drugim przykładzie woda gorąca oddaje ciepło, woda chłodna je pobiera; stąd ostatecznie tworzy się owa pośrednia pod względem cieplnym mieszanina.

Mówimy o ciałach, że pozostają w *połączeniu cieplnem,* jeżeli ciepło z jednego z ciał przechodzi w drugie. Powiadamy przytem, iż to ciało, które ciepło oddaje, posiada *temperaturę wyższą;* to zaś, które ciepło odbiera — *temperaturę niższą*. Ustalenie połączenia cieplnego między ciałami o różnej temperaturze warunkuje w miarę przechodzenia ciepła z jednego ciała na drugie stopniowe *wyrównywanie się temperatur.*

Temperaturą zatem nazywamy pewną swoistą własność ciał, której różnice warunkują przechodzenie ciepła z jednych ciał na drugie. Jeżeli więc po ustaleniu połączenia cieplnego między ciałami żadnemu z nich ciepła ani przybywa, ani ubywa, wówczas mówimy, iż ciała te posiadają temperaturę jednakową.

Zauważmy, iż, używając powyżej zwrotu o oddawaniu lub pobieraniu ciepła przez ciała, nic bliższego narazie nie zakładamy o tem, czem jest owo ciepło; rozumiemy tylko, iż jest to coś, czego ciała zawierać mogą więcej lub mniej.

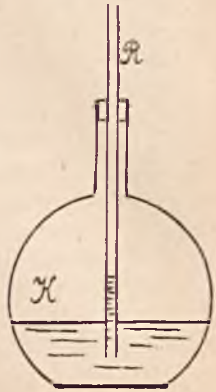
75. Zmiany własności ciał przy zmianach temperatury.

Wspomnieliśmy już, iż pierwszej informacji o tem, czy ciało jest ciepłe czy zimne, a więc — użyjmy już właściwego terminu — o temperaturze ciał dostarczyć nam może zmysł ciepła. Ponieważ jednak, jak widzieliśmy, wskazania tego zmysłu są bardzo niedokładne, usiłujemy je zastąpić przez wskazania innego zmysłu, któremu najwięcej dowierzamy, a mianowicie zmysłu wzrokowego. Opieramy się przytem na fakcie, iż wtedy, gdy temperatura ciała ulega zmianie, ulegają też zmianie wszystkie naogół własności ciała. W poszczególnych działach fizyki zapoznamy się z temi przez ciepło uwarunkowanemi zmianami własności ciał; tutaj wystarczy chociażby wskazać na jedną zmianę, o której już mówiliśmy w art. 2 (część I), a mianowicie zmianę objętości. Objętość ciał powiększa się przeważnie przy wzroście temperatury, jakkolwiek znane są ciała, których objętość przytem się zmniejsza.

W art. 3 przytoczyliśmy doświadczenie, wykazujące rozszerzalność cieplną ciał stałych. Nietrudno wykazać rozszerzalność cieplną cieczy i gazów.

D o ś w i a d c z e n i e I. Kolbka szklana (rys. 161) z przechodzącą szczelnie przez korek rurką szklaną tak wypełniona jest całkowicie cieczą (wodą, naftą, alkoholem), zabarwioną dla ułatwienia obserwacji, że poziom cieczy przypada w rurce na pewnej wysokości. Przyrząd ten posiada z początku temperaturę pokojową; gdy jednak zanurzamy kolbkę do gorącej wody, widzimy, iż poziom cieczy w rurce najpierw nieco się obniża, potem zaś zaczyna prędko się podnosić. Tłumaczymy sobie zjawisko to w następujący sposób: przy zetknięciu z gorącą wodą najpierw ogrzewa się naczynie szklane, przyczem pojemność jego wzrasta — stąd obniżenie się poziomu cieczy w rurce; następnie ogrzewa się i ciecz, a wznoszenie się jej poziomu w rurce świadczy o większej względnie rozszerzalności przy ogrzewaniu cieczy, niż szkła.

Rys. 161.



Rys. 162.

D o ś w i a d c z e n i e II. Kolbka szklana (rys. 162) z przechodzącą szczelnie przez korek i sięgającą do samego prawie dna rurką szklaną zawiera tyle tylko zabarwionej cieczy, by dolny koniec rurki znajdował się pod jej poziomem. Wystarcza położyć rękę na kolbie, a poziom cieczy w rurce zaczyna się prędko podnosić. Proste to doświadczenie wykazuje znaczną rozszerzalność gazów przy ogrzewaniu: powietrze, zamknięte w kolbie ponad cieczą, ogrzane od ręki, rozszerza się, a przez to wtłacza ciecz do rurki.

76. Termoskop.

D o ś w i a d c z e n i e. Rurkę szklaną z wydętą u jednego jej końca kulką wypełniamy zabarwioną cieczą, np. naftą (rys. 163). Notujemy (zapomocą sznurka, gumki, skrawka papieru) położenie poziomu cieczy w rurce, gdy przyrząd nasz jest zanurzony w naczyniu z wodą. Jeżeli po wyjęciu przyrządu i włożeniu go do drugiego naczynia z wodą poziom cieczy pozostaje w tem samem miejscu rurki, świadczy to, iż woda w tem drugiem naczyniu posiada taką samą temperaturę, jak w pierwszem. Jeżeli przy włożeniu przyrządu do innego naczynia poziom cieczy w rurce się podnosi lub obniża, wskazuje to, że woda w tamtem naczyniu ma temperaturę wyższą, względnie niższą. W ten sposób, nie uciekając się wcale do pomocy naszego zmysłu ciepła, a posługując się zmysłem wzroku, jesteśmy w stanie wnioskować o równości lub różnicy temperatur różnych ciał. Podstawę naszego wnioskowania stanowi przeświadczenie, iż przyrząd, przez nas użyty, pozostając w połączeniu cieplnem z wodą w jednem i drugiem naczyniu, posiada ostatecznie za każdym razem temperaturę tej czy tamtej wody.

Rys. 163.

Gdybyśmy ten sam przyrząd trzymali wciąż w jednem i tem samem naczyniu z wodą, wówczas, dopókibyśmy nie zauważyli zmiany w położeniu poziomu cieczy w rurce, moglibyśmy wnosić, że woda w naczyniu posiada temperaturę niezmienną; przesuwanie się natomiast poziomu w rurce wskazałoby nam zmianę temperatury wody.

Wszelki przyrząd, pozwalający, podobnie jak użyty tutaj, stwierdzać równość lub nierówność temperatur różnych ciał, lub też zmiany temperatury jednego i tego samego ciała, bez bliższego oznaczenia zanotowanych różnic lub zmian, nazywa się *termoskopem.*

Urządzony tak, jak przed chwilą podaliśmy, termoskop posiada poważne braki; już to chociażby, że rurka jego jest otwarta, warunkuje zmniejszanie się ilości zawartej w nim cieczy przez parowanie, przez co obniżanie się poziomu cieczy w rurce może być błędnie przypisane zmianom temperatury. Możemy wszakże zbudować termoskop podobny, ale dokładniejszy. W tym celu grubościenną rurkę o wąskim, na całej swej długości jednakowego przekroju kanale (z t. zw. rurek włoskowatych), z wydmuchaną na jednym jej końcu banieczką, wypełniamy czystą rtęcią, poczem zatapiamy otwarty jej koniec tak, by nad powierzchnią rtęci w rurce nie było powietrza.

W ten sposób sporządzony termoskop rtęciowy, osadzony na deseczce, przedstawia rys. 164.

Ćwiczenie 35. Sporządźcie termoskop rtęciowy, jak przed chwilą opisany. Do tego trzeba użyć rurki włoskowatej, zakończonej na jednym końcu naczyńkiem cylindrycznem lub kuleczką, na drugim zaś końcu niewielkiem lejkowatem rozszerzeniem (rys. 165). Moglibyście sami przygotować takie naczyńka, mniej ładnie wyglądające, niż sporządzo-

Rys. 164.

Rys. 165.

ne przez szklarza. Jeden koniec rurki musicie stopić, trzymając w płomieniu (najlepiej w dmuchawce gazowej, można jednak i w płomieniu spirytusowym), a gdy zauważycie, iż zanurzony w płomieniu koniec stał się półpłynny, usuńcie go z płomienia i dmuchajcie (niezbyt gwałtownie!) przez drugi koniec rurki. W ten sposób po kilku próbach potraficie wydąć na końcu rurki kulkę. Zamiast rozszerzenia na drugim końcu rurki możecie użyć niewielkiego własnoręcznie zrobionego lejeczka, łącząc go z rurką termoskopu przy pomocy rurki gumowej *). Gdy nalejecie do lejka rtęci, nie przedostanie się ona, nawet przy pionowem położeniu rurki, do środka przyrządu (z jednej strony wchodzi tu w grę ciśnienie zawartego w rurce powietrza, z drugiej — zjawisko włoskowatości). Zróbcie więc tak, jak przedstawione jest na rys. 165. Przechyliwszy rurkę, trzymajcie jakiś czas jej kuleczkę nad płomieniem, aby rozszerzające się pod wpływem ogrzewania powietrze wydostało się częściowo przez lejek z rurki. Usuńcie wtedy naczyńko termoskopu z ponad płomienia i postawcie rurkę pionowo; zawarte wewnątrz powietrze oziębi się i ciśnienie atmosferyczne wpędzi trochę rtęci do naczyńka. Powtórzcie tę czynność kilkakrotnie, zanim całe naczyńko i część rurki nie wypełnią się rtęcią. Po odcięciu, względnie usunięciu lejka potrzymajcie czas dłuższy naczyńko termoskopu nad płomieniem, by rozszerzająca się rtęć wypełniła całą rurkę i zaczęła się potrosze wylewać przez jej otwarty koniec. Wtedy zanurzcie szybko otwarty koniec rurki do płomienia gazowego lub spirytusowego i zalutujcie dokładnie ten koniec.

77. Termometr.

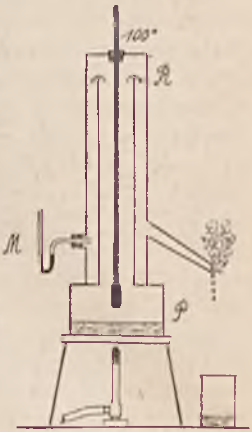
Niewiele trzeba, by od zbudowanego w podany wyżej sposób termoskopu rtęciowego (art. 76) przejść do znanego z praktyki codziennej *termometru* rtęciowego. Przez wielokrotne doświadczenie sprawdzić możemy, iż słupek rtęciowy należycie sporządzonego termoskopu staje zawsze w tem samem miejscu rurki, jeżeli termoskop zanurzamy w topniejącym lodzie; podobnież poziom rtęci w rurce termoskopu zajmuje inne, ale również stałe miejsce, jeżeli termoskop umieszczamy w parze wody, wrzącej pod normalnem ciśnieniem atmosferycznem (t. j. gdy wysokość słupa barometrycznego, odczytana w tym czasie, wynosi 760 mm). Na tej zasadzie twierdzimy, iż temperatura topnienia lodu jest temperaturą stałą, i umawiamy się nazywać ją *temperaturą zera stopni;* twierdzimy również, że temperatura pary wody, wrzącej

*) Weźcie rurkę szklaną ok. 20 cm długości, ok. 1 cm średnicy o niezbyt grubych ściankach i, trzymając ją za oba końce, zanurzcie jej środkową część w płomieniu spirytusowym lub gazowym i obracajcie palcami cały czas rurkę dokoła jej osi, by się możliwie jednostajnie ze wszystkich stron ogrzewała. Po pewnym czasie spostrzeżecie, a zwłaszcza wyczujecie rękami, że rurka się gnie w miejscu ogrzanem, gdzie dostatecznie zmiękła. Wyjąwszy ją wtedy z płomienia, rozciągajcie, a otrzymacie — zależnie od prędkości tego rozciągania, lejkowato zwężoną dłuższą lub krótszą część środkową rurki. Połóżcie ją wtedy na niemalowanej drewnianej desce, by wystygła, a następnie, zrobiwszy pilnikiem rysę w tem miejscu, gdzie chcecie uciąć rurkę, złamcie ją. W ten sposób otrzymacie pożądany lejek.

pod ciśnieniem normalnem, jest również temperaturą stałą, i umawiamy się nazywać ją *temperaturą stu stopni.*

Oto jak dalej zaznaczamy *stałe punkty* termometru. Termoskop rtęciowy, zbudowany jak podaliśmy wyżej, zanurzamy w topniejącym lodzie (rys. 166) i miejsce na rurce, przy którem zatrzymuje się ostatecznie słupek rtęci, zaznaczamy kreską, pisząc przy niej „zero" (0). Podobnie umieszczamy ten termoskop w parze wody wrzącej (rys. 167) (z przekroju przyrządu widać, że jego ściany podwójne z odpowiedniemi otworami zabezpieczają parę, w której mieści się termoskop, od oziębiania się przez zetknięcie z otaczającem powietrzem), a jednocześnie odczytujemy stan barometru i połączonego z przyrządem manometru; jeżeli ciśnienie jest normalne, to miejsce rurki, przy którem zatrzymuje się poziom rtęci, zaznaczamy kreską, pisząc przy niej „sto" (100) *). W ten sposób właśnie zaznaczamy na sporządzonym termometrze dwa jego stałe punkty (0^0 i 100^0). Następnie odległość między kreskami 0 i 100 dzielimy na sto równych części, prowadząc dalej taką samą podziałkę poniżej kreski 0 i powyżej kreski 100. Teraz mamy już z termoskopu sporządzony termometr z jego *skalą.* Jeżeli przygotowany w ten sposób przyrząd, umieszczony w tym czy innym ośrodku, wskazuje końcem słupka rtęciowego siódmą podziałkę poniżej zera, dwunastą podziałkę poniżej zera, piętnastą podziałkę powyżej zera, czterdziestą siódmą powyżej zera i t. d., to powiadamy, jak to nam dobrze jest znane z doświadczenia codziennego, iż temperatura ośrodka badanego wynosi -7^0 (minus siedem stopni), -12^0, $+15^0$, $+47^0$ i t. d. (zamiast $+15^0$, $+47^0$ pisze się zwykle z opuszczeniem znaku $+$ krótko 15^0, 47^0).

Rys. 166.

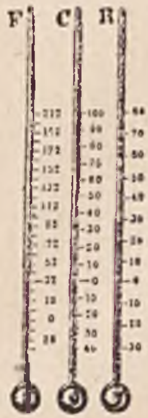


Rys. 167.

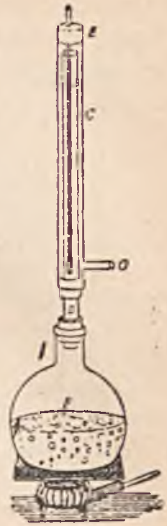
Skalę termometryczną, opisaną przed chwilą, a przyjętą we wszystkich badaniach naukowych, nazywamy skalą Celsjusza, oznaczając

*) W tablicach na końcu książki podane są wartości temperatur wrzenia wody pod innemi ciśnieniami, niż normalne.

temperatury krótko w następujący sposób: — 7° C, 15° C, i t. d. Oprócz tej skali znana jest skala Réaumura (skrócenie R), różniąca się od poprzedniej tem, że temperatura pary wrzącej wody oznacza się przez 80, a nie przez 100 (zatem 1 stopień R wynosi $^5/_4$ stopnia C, jeden zaś stopień C wynosi $^4/_5$ stopnia R). Poza tem w Anglji i Ameryce używają skali Fahrenheita (skrócenie F); temperatura topnienia lodu oznacza się na niej przez 32, temperatura zaś pary wrzącej wody przez 212; widoczne jest odrazu, iż 1° F = $^9/_5$ ° C = $^9/_4$ ° R. Na rys. 168 mamy termometry ze skalami C, R i F.



Rys. 168.


Rys. 169.

Ćwiczenie 36. Sprawdzić sposobem, wskazanym na rys. 166 i 167, stałe punkty danych wam termometrów. Zamiast przyrządu, przedstawionego schematycznie na rys. 167, możecie użyć zbudowanego prościej ze szkła, który widzicie na rys. 169.

Skutkiem zmian, które zachodzą z biegiem czasu w szkle, pojemność naczyńka termometrycznego stopniowo maleje, skutkiem czego punkty stałe termometru ulegają na podziałce przesunięciu ku górze — zanurzony w topniejącym lodzie termometr nie wskazuje 0°, lecz nieco więcej; podobnie w parze wrzącej wody pod normalnem ciśnieniem słupek rtęci sięga powyżej kreski 100°. Z tego powodu zawsze co pewien czas (nie rzadziej, niż co rok) należy sprawdzać wskazania każdego zbudowanego w powyższy sposób termometru.

Termometry rtęciowe nie mogą być używane poniżej temperatury — 39°C. W tej bowiem temperaturze rtęć krzepnie. To też do niskich temperatur używa się termometrów podobnej budowy, wypełnionych innemi cieczami, np. alkoholem, toluolem i t. p. Termometrów rtęciowych ze szklanemi naczyniami nie używamy też powyżej 500°C, w tej bowiem temperaturze szkło mięknie albo nawet się topi. Ostatniemi względnie czasy zaczęto robić termometry rtęciowe z kwarcu tak samo przezroczystego, jak szkło, lecz znacznie trudniej topliwego. Skala termometrów kwarcowych z rtęcią przekracza nieco 700°C. Termometry rtęciowe do wyższych temperatur posiadają w rurce ponad powierzchnią rtęci gaz, np. bezwodnik węglowy, którego ciśnienie zapobiega wrzeniu rtęci (p. niżej ustęp o wrzeniu).

Zresztą istnieje cały szereg inaczej zbudowanych, służących do różnych celów, termometrów, w szczególności t. zw. *pirometrów* (termometrów do wysokich temperatur). Omawiać tego wszystkiego tutaj, oczywiście, nie będziemy.

Zadania.

78. Ile stopni w skali C wynosi 18^0 R, 50^0 R, 64^0 F, 12^0 F?

79. Ilu stopniom skal R i F odpowiada 15^0 C, 24^0 C, 49^0 C?

80. Termometry F i C, zanurzone w pewnej cieczy, dają zgodne co do liczby stopni odczytania. Jaką temperaturę posiada dana ciecz?

81. Termometry F i C zanurzone są w pewnej cieczy, przyczem odczytanie na termometrze F daje 2 razy taką liczbę stopni, jak odczytanie na termometrze C. Jaka jest temperatura danej cieczy?

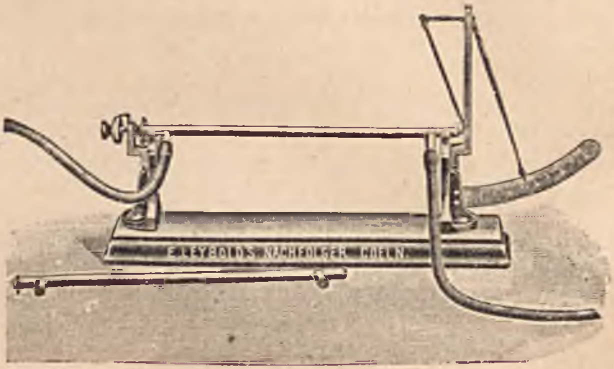
82. Zamiast rtęci używane bywają do termometrów inne ciecze. Jakim wymaganiom winny te ciecze naogół odpowiadać?

83. Bywają termometry do specjalnego użytku, w których skala nie rozciąga się od 0^0 do 100^0; np. termometry lekarskie mają skalę mniej więcej od 35^0 do 42^0. Jak sprawdzić ścisłość wskazań takiego termometru?

Rozdział II. O spółczynnikach rozszerzalności.

78. Spółczynnik rozszerzalności linjowej i jego wyznaczanie.

D o ś w i a d c z e n i e I. Wykazujemy przy pomocy przyrządu, wyobrażonego na rys. 170, że różne ciała stałe, ogrzane w tych samych granicach temperatury, rozszerzają się naogół niejednakowo. Przyrząd ten składa się z podstawy, na której dają się umieszczać rurki jednakowej długości (ok. 1 m) z różnych metali, np. mosiądzu i żelaza, tak, by



Rys. 170.

jednym zamkniętym końcem opierały się o koniec śruby, wkręconej w nieruchomą nakrętkę, widoczną na rysunku z lewej strony, drugim zaś zamkniętym końcem — o układ drążków, nadających ruch wskazówce na skali. Każda z rurek zaopatrzona jest w niewielkie rurki boczne, przypadające prawie u samych jej końców; przez te boczne rureczki, zapomocą połączonych z niemi rurek gumowych, można przepuszczać przez badaną rurkę strumień zimnej lub gorącej wody, albo parę wrzącej wody.

Umieszczamy najpierw na przeznaczonem do tego łożysku rurkę żelazną, a uregulowawszy położenie śruby, doprowadzamy do tego, że wskazówka stoi na określonej podziałce skali. Po pewnym czasie puszczamy przez rurę prąd pary wrzącej wody. Wskazówka zaczyna się posuwać po skali, wreszcie zatrzymuje się na pewnej kresce, co odpowiada, oczywiście, temu, że temperatura rury już się ustaliła. Przerywamy prąd pary; rura się oziębia i stopniowo wskazówka cofa się do pierwotnego położenia.

Gdy już mamy pewność, że wszystkie części przyrządu wróciły do temperatury początkowej, t. j. do temperatury pokoju, kładziemy na miejscu rury żelaznej tej samej długości rurę mosiężną, regulujemy, jak poprzednio, położenie wskazówki na skali i znowu przepuszczamy przez rurę prąd pary wrzącej wody. Stwierdzamy po ustaleniu się temperatury, że w tych samych granicach temperatury rurka mosiężna wydłuża się bardziej, niż żelazna.

Przejdźmy jednak do ściślejszego ujęcia sprawy. Przypuśćmy, iż długość pręta metalowego (rury) w temperaturze t^0 (w temperaturze pokojowej) wynosi l; przypuśćmy, iż długość tegoż pręta w temperaturze $t_1{}^0$ (w temperaturze pary wrzącej wody) wynosi l_1, przyczem, jak widzieliśmy, $l_1 > l$, jeżeli $t_1 > t$. W takim razie *bezwzględny przyrost* długości pręta przy zmianie temperatury od t^0 do $t_1{}^0$ jest

$$l_1 - l\,.$$

Przyrost ten mierzy się w jednostkach długości, np. centymetrach lub milimetrach i w danych granicach zmiany cieplnej jest tem większy, im dłuższy jest pręt.

Przyrostem względnym długości pręta nazywamy stosunek jej przyrostu bezwzględnego do długości początkowej (zmierzonej, oczywiście, w tych samych jednostkach, co przyrost), t. j.

$$\frac{l_1 - l}{l}\,.$$

Przyrost względny wyraża się liczbą oderwaną i wskazuje, o jaką część swej długości początkowej pręt się wydłużył; wartość tej długości początkowej nie ma tu więc znaczenia, tak samo bowiem przy danej zmianie cieplnej pręt metrowy wydłuży się np. o $\frac{1}{1000}$ swej długości początkowej, t. j. o 1 mm, jak zrobiony z tegoż materjału pręt $\frac{1}{2}$ metrowy o $\frac{1}{1000}$ swej długości, t. j. o $\frac{1}{2}$ mm.

Jeżeli otrzymany przyrost względny podzielimy przez liczbę stopni, o które temperatura pręta wzrosła, t. j. przez $(t_1 - t)$, otrzymamy wyrażenie

$$\lambda = \frac{l_1 - l}{l(t_1 - t)}, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (1)$$

które daje nam tak zwany *średni spółczynnik rozszerzalności linjowej* materjału pręta w granicach temperatury od t^0 do t_1^0; spółczynnik ten λ wskazuje, o jaką część swej długości początkowej pręt się przeciętnie wydłuża lub skraca przy wzroście, względnie zniżeniu temperatury o 1^0.

Ćwiczenie 37. Wyznaczcie przy pomocy przyrządu, wyobrażonego na rys. 170, spółczynnik rozszerzalności linjowej metalu (mosiądzu, miedzi, żelaza...), z którego zrobione są należące do przyrządu rury. Przyrząd trzeba przedewszystkiem wycechować, t. j. znaleźć wartość przesunięcia końca rury, odpowiadającą przesunięciu wskazówki na skali o 1, 2, 3 i t. d. podziałek.

Cechowanie. Zmierzcie skok śruby i zobaczcie, na ile części podzielony jest obwód jej główki (por. art. 4, gdzie była mowa o mikrometrze). Umieśćcie jedną z rur, którą następnie będziecie badać, na jej właściwem miejscu. Sprawdźcie, czy istotnie jeden koniec rury dotyka końca śruby, a drugi drążka, połączonego ze wskazówką, a jednocześnie, wkręcając lub wykręcając śrubę, wyregulujcie tak jej położenie, by wskazówka pokazywała zerową kreskę skali. Pokręcając główką śruby, a przez to posuwając koniec rury, nastawiajcie koniec wskazówki na pierwszą, drugą i t. d. (albo 5-ą, 10-ą i t. d.) kreskę skali i odczytujcie za każdym razem obrót śruby, notując odpowiadające tym pokręceniom główki przesunięcia końca śruby. Ułóżcie tabelkę, która będzie wynikiem cechowania:

przesunięcie wskazówki od kreski do kreski	0 — 1	1 — 2	2 — 3	. . . .
odpowiadające przesunięcie końca rury				

Pomiar wydłużenia rury. Zmierzcie przy pomocy skali milimetrowej długość badanej rury. Umieśćcie rurę na jej właściwem miejscu i sprawdźcie, czy dotyka zarówno końca śruby, jak drążka, połączonego ze wskazówką, którą ustawicie na jednej z pierwszych podziałek skali. Pozostawcie na jakiś czas w ten sposób przygotowany przyrząd, by móc przyjąć, iż temperatura rury jest taka sama, jak otaczającego powietrza. Temperaturę tę odczytajcie na mieszczącym się wpobliżu rury termometrze i zanotujcie. Zanotujcie też, na której kresce stoi wskazówka. Nie dotykając już więcej śruby, puśćcie teraz przez rurę z uprzednio przygotowanego zbiornika prąd pary wrzącej wody i utrzymujcie ten prąd przez czas dłuższy, zanim koniec wskazówki nie przestanie się posuwać. Zanotujcie, na której kresce stoi wtedy wskazówka. Obliczcie, jakie jest wydłużenie rury przy ogrzaniu od temperatury pokojowej *) do temperatury wrzenia wody (100^0) **) i znajdźcie spółczynnik roz-

*) Dokładniej możecie wyznaczyć początkową temperaturę rury, przepuszczając przez nią z odpowiedniego zbiornika lub wodociągu strumień zimnej wody o stałej temperaturze, którą możecie wyznaczyć, np. zanurzając koniec rury gumowej, z której woda wycieka, w szklance, gdzie się mieści termometr — ze szklanki tej przez jej wierzch woda płynie dalej do większego zbiornika.

**) Aby rurę zabezpieczyć od zmian temperatury, uwarunkowanych przez otaczający ośrodek, podczas gdy przez nią przepuszczamy czy to strumień wody, czy parę wrzącej wody, dobrze jest owinąć rurę szczelnie taśmą z barchanu, wojłoku lub sukna.

szerzalności linjowej materjału rury według podanych wyżej wskazówek. Wyniki zanotujcie w protokóle w sposób następujący:

długość rury miedzianej (żelaznej . . .) (l) . = ...

wydłużenie podczas ogrzewania $(\Delta l = l_1 - l)$ = ...

temperatura początkowa rury (t) . . . . = ...

„ końcowa rury (t_1) . . . . . . = ...

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l(t_1 - t)} = \ldots\ldots\ldots$$

Powtórzcie to samo ćwiczenie z rurą, zrobioną z innego materjału.

Jeżeli początkowa temperatura mierzonego pręta jest 0^0, końcowa zaś t; jeżeli długość pręta w 0^0 oznaczymy przez l_0, w t^0 przez l, to wzór (1) napiszemy tak

$$\lambda = \frac{l - l_0}{l_0 \cdot t}, \qquad \ldots\ldots\ldots \qquad (2)$$

co będzie wyrażało spółczynnik rozszerzalności linjowej danego materjału w granicach od 0^0 do t^0.

Na końcu książki podane są wartości tych spółczynników dla różnych materjałów. Zauważmy, iż naogół dla ciał stałych spółczynnik ten mało się różni dla różnych granic temperatury, wobec czego granice te nie są w tablicy podane. Np. dla miedzi spółczynnik ten wynosi 0,000017, t. j. pręt miedziany, ogrzany o 1^0, wydłuża się o 0,000017 swej długości (przy oziębieniu o 1^0 odpowiednio się kurczy); pręt miedziany długości 1 m, ogrzany o 1^0, wydłuża się zatem o 0,000017.100 cm = 0,017 mm. W każdym przedmiocie, zrobionym z miedzi, zmienia się przy zmianach temperatury odpowiednio wzięta w tym czy innym kierunku długość. Nic dziwnego, że zmian takich gołem okiem nie dostrzegamy.

Ze wzoru (2) otrzymujemy

$$l = l_0 (1 + \lambda t). \qquad \ldots\ldots\ldots \qquad (3)$$

Wzór (3), często bardzo używany, pozwala podać wartość długości jakiegokolwiek przedmiotu w dowolnej temperaturze t, jeżeli znana jest jego długość w 0^0 (l_0) i spółczynnik rozszerzalności linjowej (λ). Czynnik $(1 + \lambda t)$ nazywa się *dwumianem rozszerzalności linjowej.*

79. Spółczynnik rozszerzalności objętościowej.

Przypuśćmy, iż v_0 oznacza objętość ciała w 0^0, v zaś objętość tegoż ciała w t^0. *Przyrost bezwzględny* objętości przy zmianie temperatury od 0^0 do t^0 wynosi zatem

$$v - v_0$$

i wyraża się, oczywiście, w jednostkach objętości, np. w cm^3; w granicach danej zmiany temperatury przyrost ten jest tem większy, im większa jest objętość ciała.

Przyrostem względnym objętości nazywamy stosunek jej przyrostu bezwzględnego do objętości początkowej, t. j.

$$\frac{v - v_0}{v_0};$$

wyraża się on liczbą oderwaną i wskazuje, o jaką część swej początkowej wartości zmienia się objętość ciała przy danej zmianie cieplnej. Wielkość jego nie zależy od wartości początkowej objętości, podobnie jak to wytłumaczyliśmy w art. 78 o względnym przyroście linjowym.

Dzieląc przyrost względny objętości przez liczbę stopni, o które zmieniła się temperatura, t. j. przez t, otrzymamy t. zw. *średni spółczynnik rozszerzalności objętościowej* danego materjału w granicach temperatury od 0^0 do t^0

$$\alpha = \frac{v - v_0}{t \cdot v_0} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Spółczynnik ten α wskazuje, o jaką część wartości początkowej zmienia się przeciętnie objętość ciała przy zmianie temperatury o jeden stopień w granicach od 0^0 do t^0.

Ze wzoru (1) otrzymujemy

$$v = v_0 (1 + \alpha t); \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

wzór (2) pozwala obliczyć objętość ciała w dowolnej temperaturze, jeżeli znana jest jego objętość w 0^0 oraz znany spółczynnik rozszerzalności materjału, z którego ciało jest zrobione. Czynnik $(1 + \alpha t)$ nazywa się *dwumianem rozszerzalności objętościowej*.

Wystawmy teraz sobie sześcian z jakiegokolwiek materjału równokierunkowego, t. j. mającego we wszystkich kierunkach własności jednakowe. Przypuśćmy, iż długość krawędzi sześcianu w 0^0 jest l_0, a objętość w 0^0 jest $v_0 = l_0^3$. W temperaturze t^0 długość krawędzi sześcianu będzie

$$l = l_0 (1 + \lambda t),$$

gdzie λ oznacza spółczynnik rozszerzalności linjowej materjału sześcianu. Objętość sześcianu w t^0 będzie $v = l^3$, lub też, jeżeli podstawimy na l jego wartość,

$$v = l_0^3 (1 + \lambda t)^3 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Inaczej wyrazić możemy objętość sześcianu w t^0 w następujący sposób

$$v = v_0 (1 + \alpha t), \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

gdzie α oznacza spółczynnik rozszerzalności objętościowej materjału sześcianu. Porównywając wyrażenia (3) i (4) i uwzględniając, że $v_0 = l_0^3$, otrzymujemy

$$(1 + \alpha t) = (1 + \lambda t)^3,$$

$$1 + \alpha t = 1 + 3\lambda t + 3\lambda^2 t^2 + \lambda^3 t^3;$$

odejmując od obu części tej równości po 1 oraz odrzucając wyrazy z drugą i trzecią potęgą λ jako bardzo małe (λ jest wogóle bardzo małym ułamkiem), otrzymujemy

$$\alpha t = 3 \lambda t,$$

i ostatecznie

$$\alpha = 3 \lambda \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Dochodzimy w ten sposób do bardzo prostej i bardzo ważnej zależności między spółczynnikami rozszerzalności linjowej i objętościowej ciał równokierunkowych: *spółczynnik rozszerzalności objętościowej równa się potrójnemu spółczynnikowi rozszerzalności linjowej.*

Dodajmy ogólną uwagę, iż tam, gdzie się spotykamy z wyrażeniem „spółczynnik rozszerzalności“ bez dodania „linjowej“ czy „objętościowej“, rozumieć należy spółczynnik rozszerzalności objętościowej.

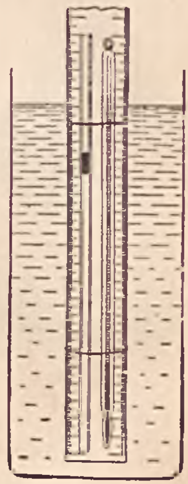
80. Wyznaczanie spółczynników rozszerzalności objętościowej.

Dla ciał stałych równokierunkowych nie mamy potrzeby stwarzać specjalnych sposobów wyznaczania spółczynników rozszerzalności objętościowej, umiejąc bowiem znaleźć spółczynnik rozszerzalności linjowej, otrzymujemy przez proste mnożenie tego ostatniego przez 3 spółczynnik rozszerzalności objętościowej. Tak np. dla miedzi $\lambda = 0{,}000017$, a zatem $\alpha = 0{,}000051$.

Spróbujmy wyznaczyć te spółczynniki dla cieczy i dla gazów.

Ćwiczenie 38. Złączcie z termometrem przy pomocy paru gumek rurkę szklaną długości 30 — 40 cm, o średnicy wewnętrznej 3 — 4 mm, zalutowaną u jednego końca i wypełnioną częściowo, jak to wskazuje rys. 171, badaną cieczą (naftą, alkoholem) *). Zanurzcie całe to urządzenie w słoju z zimną wodą (tak, by ciecz w rurce była całkowicie zanurzona, ale aby tylko nie schował się pod wodę otwarty koniec rurki!), a pomieszawszy niem ostrożnie, jak mieszadłem, czas jakiś wodę, by mieć pewność, że cała ta kąpiel, zarówno jak badana ciecz, mają tę samą temperaturę, ustawcie rurkę z termometrem pionowo, odczytajcie temperaturę, którą wskazuje termometr, oraz zanotujcie kreskę na skali termometru, do której sięga poziom cieczy w rurce. Dolewajcie powoli do słoja gorącej wody, albo ogrzewajcie cały słój, by stopniowo doprowadzić w słoju wodę do wyższej temperatury. Przerwawszy ogrzewanie lub dolewanie wody, znowu zamieszajcie, tak jak wyżej, wodę w słoju; ustawcie rurkę z termometrem pionowo i odczytajcie zarówno temperaturę, jak też do jakiej kreski termometru teraz sięga poziom cieczy w rurce. Powtórzcie to wszystko jeszcze raz, mając w słoju wodę jeszcze bardziej ogrzaną.

Rys. 171.



Rys. 172.

Korzystając z tego, że rozszerzalność cieplna cieczy jest znacznie większa, niż ciał stałych, możecie zaniedbać dla uproszczenia rozszerzanie się rurki szklanej i będziecie uważali, że objętości słupków cieczy w rurce w poszczególnych temperaturach są proporcjonalne do ich wysokości. Wysokości te, t. j. odległości od dolnego końca rurki do zanotowanych kolejno kresek skali termometrycznej, do których za każdym razem sięgała ciecz w rurce, zmierzycie przy pomocy skali milimetrowej (oczywiście, po wyjęciu rurki z termometrem z kąpieli).

Na podstawie tych danych obliczcie spółczynnik rozszerzalności objętościowej użytej cieczy w notowanych granicach temperatur. Porównajcie go z wartością tego spółczynnika, który znajdziecie w odpowiedniej tablicy na końcu książki. Zauważcie, iż w tablicy tej zarówno dla cieczy, jak dla gazów wymienione są temperatury, dla których odpowiednie wartości są ważne; uczynione to jest dlatego, iż w cieczach i gazach wartości tych spółczynników znacznie się różnią dla różnych granic temperatury (nie tak, jak dla ciał stałych, gdzie można tych różnic praktycznie nie uwzględniać).

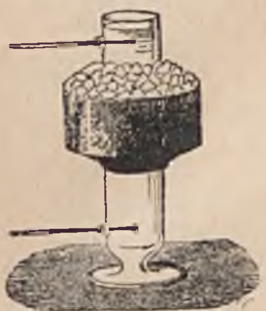
Ćwiczenie 39. Umocujcie na linjale z podziałką milimetrową przy pomocy gumek termometr i zalutowaną u jednego końca rurkę włoskowatą długości 20 — 25 cm i średnicy wewnętrznego przekroju ok. 1 mm (rys. 172). Do rurki włoskowatej wprowadźcie uprzednio, używając wyżej wskazanego sposobu (art. 66, ćwicz. 33), trochę rtęci tak, by długość tego słupka wynosiła nie więcej ponad kilka mm. Będziecie mieli przy położeniu pionowem rurki zamknięte pod rtęcią powietrze, pozostające pod ciśnieniem atmosferycznem, zwiększonem o ciśnienie tego malutkiego słupka rtęci. Ciśnienie to możecie uważać za stałe podczas niedługo trwającego pomiaru. Zważcie, że objętość zawartego w rurce powietrza jest pro-

*) Złączenie to winno być o tyle mocne, by się rurka nie mogła ślizgać wzdłuż termometru.

porcjonalna do długości zajmowanej przezeń części rurki. Zanurzcie sporządzony przez was przyrząd pokolei w wodzie o różnej temperaturze, zaprotokółujcie wyniki i obliczcie według podanego w art. poprzednim wzoru *spółczynnik rozszerzalności powietrza pod stałem ciśnieniem;* porównajcie znalezioną wartość z wartością, podaną w tablicach.

81. Rozszerzalność wody.

Doświadczenie I. Wypełniamy wodą, mającą temperaturę pokojową, słój szklany (rys. 173), zaopatrzony w dwa otwory boczne, przez które wetknięte są termometry, oraz otoczony w środkowej części pomiędzy obu termometrami koszem, zawierającym lód. Stwierdzamy, że termometr dolny zaczyna prędko opadać, podczas gdy górny narazie prawie nie wykazuje zmian; gdy jednak dolny zaczyna pokazywać 4°C, dalsze jego opadanie ustaje i zaczyna opadać termometr górny. Tłumaczymy to sobie w ten sposób, iż oziębianie wody przez otaczający lód w środkowej części naczynia warunkuje zmniejszanie się objętości wody, a więc wzrost jej gęstości, dzięki czemu opada ona na dół, a cieplejsza woda stamtąd podąża na jej miejsce i zaczyna się oziębiać; stąd coraz niższe wskazania termometru dolnego. Ale oto widocznie w *4° C* woda osiąga *największą gęstość,* gdyż dalej oziębiana woda już nie leci w dół; zachodzi tylko obniżanie się temperatury wody, znajdującej się w górnej części słoja. Przy oziębianiu zatem wody poniżej 4° C nie otrzymujemy dalszego kurczenia się jej, jeno rozszerzanie się.



Rys. 173.

Doświadczenie II. Wypełniamy dokładnie wodą, oziębioną uprzednio mniej więcej do 4° C, kulę z lanego żelaza o grubości ścian około 1 cm, dającą się szczelnie zamknąć przy pomocy wkręcanej do niej śruby (rys. 174). Kulę tę wkładamy do mieszaniny mrożącej, utworzonej z drobno tłuczonego lodu albo śniegu (jeżeli jest pod ręką) i soli kuchennej*). Po kilku albo kilkunastu minutach (zależnie od temperatury mieszaniny mrożącej) kula pęka z hukiem.

Rys. 174.

To efektowne doświadczenie świadczy, że woda, krzepnąc, w dalszym ciągu się rozszerza, t. j. gęstość

*) Po paru próbach z łatwością dobierzecie proporcję mieszaniny, która będzie miała temperaturę nie wyższą ponad — 18° C.

jej się przytem zmniejsza; to też lód pływa na wodzie. W życiu codziennem mogła się wam zdarzyć obserwacja, że butelka, zatkana korkiem i wypełniona szczelnie wodą, pęka, gdy woda w niej krzepnie. Krzepnąc w szparach skalnych, woda rozsadza skały.

82. Spółczynnik prężności gazów.

D o ś w i a d c z e n i e. Bierzemy przyrząd, którym posługiwaliśmy się w celu wykazania prawa Boyle-Mariotte'a (rys. 138), a doprowadziwszy przy otwartym kurku h rtęć w obu ramionach do którejkolwiek kreski skali (np. 90-ej, jak na rysunku), zamykamy kurek. Bierzemy teraz ręką ten koniec rurki, gdzie zostało zamknięte powietrze, tak jednak, by było widać poziom rtęci, i w ten sposób ogrzewamy zawarte w rurce powietrze. Stwierdzamy natychmiast, że rtęć w lewem ramieniu rurki obniża się, w prawem zaś podnosi. Skutkiem ogrzania zmienia się zatem zarówno objętość jak ciśnienie zawartego w rurce powietrza. Wszakże, podnosząc do góry prawe ruchome ramię, możemy doprowadzić rtęć w lewem ramieniu do tej samej kreski, krórej ona sięgała początkowo (90-ej), t. j. do początkowej objętości. W ten sposób skutkiem zmiany temperatury jest teraz *jedynie zmiana ciśnienia,* mierzona różnicą wysokości poziomów rtęci w obu rurkach. Oznaczamy początkową temperaturę powietrza, zamkniętego w rurce, przez t, a jego ciśnienie przez p (równe ciśnieniu atmosferycznemu); oznaczamy przez t' temperaturę wyższą, do której ogrzaliśmy powietrze, przez p' zaś ciśnienie w tej wyższej temperaturze (równe ciśnieniu atmosferycznemu + ciśnienie słupa rtęci wysokości, równej odległości między poziomami rtęci w rurkach). Zatem przyrostowi temperatury $t' - t$ odpowiada *w niezmiennej objętości* *) bezwzględny przyrost ciśnienia $p' - p$ względny zaś (w stosunku do ciśnienia początkowego) $\frac{p'-p}{p}$. *Stosunek względnego przyrostu ciśnienia gazu do różnicy temperatur, w których to granicach zmiana ta zachodzi,* t. j.

$$\beta = \frac{p' - p}{p(t' - t)}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

nazywamy spółczynnikiem prężności gazu w danych granicach temperatury.

Gdybyśmy, robiąc dokładne pomiary przy pomocy odpowiednio

*) Właściwie przy ogrzaniu pojemność naczynia, zawierającego powietrze, zwiększa się, ale względnie tak nieznacznie, że dla uproszczenia sprawy pomijamy to.

przystosowanego do zmian temperatury przyrządu, wzięli za temperaturę początkową 0° (temperaturę topniejącego lodu), czemu odpowiadałoby ciśnienie gazu p_0, potem zaś doprowadzili go do dowolnej temperatury t, której odpowiadałoby ciśnienie p (bez zmiany objętości!), wypadłoby zamiast wzoru (1) napisać następujący, który się zazwyczaj używa:

$$\beta = \frac{p - p_0}{p_0 \cdot t} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Ze wzoru (2) otrzymujemy

$$p = p_0 (1 + \beta t) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

W tej postaci wzór pozwala, o ile znamy ciśnienie gazu w 0°, zawartego w określonej objętości, oraz spółczynnik jego prężności, podać ciśnienie tegoż gazu w tejże objętości w innej jakiejkolwiek temperaturze t. Trudno jest nie zauważyć podobieństwa wzoru (3) do wzoru (2) z art. 79 (por. także ćwicz. 39). Tam mowa była o pozostających w związku ze zmianami temperatury zmianach objętości gazu pod stałem ciśnieniem, tu — o zmianach ciśnienia w stałej objętości. Tam wyprowadziliśmy sobie pojęcie o *spółczynniku rozszerzalności* gazu, tu — o jego *spółczynniku prężności*.

Zajrzyjcie teraz do tablic na końcu książki i zauważcie, że wprawdzie zarówno spółczynniki rozszerzalności, jak prężności są nieco różne dla jednego i tego samego gazu w tej samej i w różnych temperaturach, że są różne dla różnych gazów, to jednak różnice te są niewielkie. Znowu zatem, jak przy omawianiu prawa Boyle-Mariotte'a, uderzyć nas musi podobieństwo w zachowywaniu się różnych gazów, co się wiąże niewątpliwie z podobieństwem i względną prostotą ich budowy. Spółczynniki rozszerzalności i prężności różnych gazów, które mniej więcej stosują się do prawa Boyle-Mariotte'a, niewiele się różnią od $\frac{1}{273}$. Możemy tedy wartość tę przypisać *gazowi doskonałemu,* którego pojęcie wprowadziliśmy w art. 66, w granicach zaś błędów, dopuszczalnych technicznie, możemy często wartość tę przypisywać gazom rzeczywistym, jak tlen, wodór, azot, powietrze.

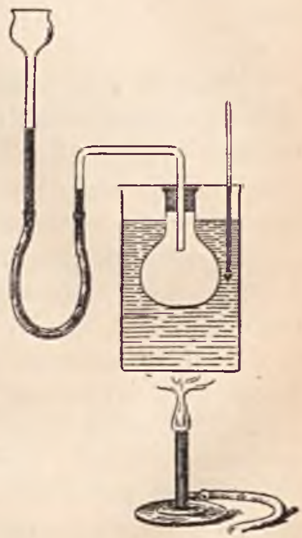
Przyjmiemy zatem krótko dla gazów, z powyższem zastrzeżeniem,

$$\alpha = \beta = \frac{1}{273}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

co oznacza, że, j e ż e l i g a z o g r z e w a m y p o d s t a ł e m c i ś n i e n i e m, p r z y r o s t o w i j e g o t e m p e r a t u r y o 1° o d p o w i a d a p r z y r o s t j e g o o b j ę t o ś c i o $\frac{1}{273}$ w a r t ości początkowej; jeżeli zaś gaz ogrzewamy w stałej objętości, przyrostowi jego temperatury o 1^0 odpowiada przyrost jego ciśnienia o $\frac{1}{273}$ wartości początkowej.

Pamiętajmy jednak, iż ściśle to dotyczy jedynie gazu doskonałego i tylko w przybliżeniu daje się twierdzić o gazach rzeczywistych.

Ćwiczenie 40 Sporządźcie przyrząd taki, jaki przedstawia rys. 175. Macie tam kolbę z powietrzem, którego spółczynnik prężności chcecie wyznaczyć. Termometr, zanurzony do wody, da wam za każdym razem temperaturę powietrza; połączony z kolbą manometr rtęciowy — zmiany ciśnienia. Prawda, powietrze ogrzewa się tylko w kolbie, a nie ogrzewa się w rurce, łączącej kolbę z manometrem i znajdującej się poza kąpielą; oczywiście, jest w tem źródło błędu, ale, jeżeli użyjecie możliwie krótkiej rurki o małym przekroju, by ilość zawartego w niej powietrza była mała w porównaniu z ilością powietrza, mieszczącego się w kolbie, błędu tego możecie nie brać pod uwagę. Wrzućcie do wody, w której zanurzacie kolbę (palnik wtedy jest, oczywiście, zbyteczny), tyle lodu, by się otrzymała woda w 0^0. Zróbcie kreskę (skrawek papieru, gumka) na prawem ramieniu manometru i, obniżając, wzgl. podnosząc lewe ramię manometru, co umożliwi środkowa gumowa część rurki manometrycznej, ustawcie rtęć w prawem ramieniu na zrobionej kresce. Zanotujcie różnicę poziomów rtęci w manometrze, zmierzoną przy pomocy skali milimetrowej; odczytajcie na barometrze, jakie jest w tej chwili ciśnienie atmosferyczne i, obliczywszy, jak w art. 66, ciśnienie powietrza w kolbie, zanotujcie tę wartość. Podstawcie palnik pod naczynie z wodą, ogrzejcie ją do dowolnej temperatury, np. około 50^0, a po usunięciu palnika dobrze wymieszajcie wodę termometrem, zanotujcie temperaturę, podnieście lewe ramię manometru tak, by w prawem rtęć znowu dosięgła kreski, zmierzcie różnicę poziomów rtęci w manometrze i znowu zanotujcie ciśnienie. Będziecie zatem mieli ciśnienie p_0 powietrza w kolbie w temperaturze 0^0 oraz ciśnienie p tegoż powietrza w tej samej objętości *) w temperaturze t. Obliczcie według tych danych i wskazań na str. 175 wartość spółczynnika prężności powietrza (jako drugą temperaturę (t) możecie obrać temperaturę wrzenia wody, dogrzewając ją odpowiednio palnikiem; wtedy usuwać palnika przy mierzeniu różnicy poziomów rtęci w manometrze nie należy **). Pomyślcie i zestawcie wszystkie źródła błędów tego pomiaru. Porównywając otrzymany wynik ze znaną wartością spółczynnika prężności powietrza, wyznaczcie popełniony błąd w %.



Rys. 175.

*) Zmiany pojemności kolby przy ogrzewaniu zaniedbujemy.

**) Między naczyniem z wodą a manometrem umieścić należy niezaznaczoną na rysunku osłonę, np. kawał tektury lub lepiej azbestu (dlaczego?).

83. Temperatura bezwzględna.

Podstawmy do wzoru na ciśnienie gazów, uwzględniając, że przyjąć możemy $\beta = \alpha$,

$$p = p_0 (1 + \alpha t) \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (1)$$

wartość $\alpha = \frac{1}{273}$. Otrzymujemy

$$p = p_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right) \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (2)$$

albo

$$p = \frac{p_0}{273} (273 + t) \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (3)$$

Ciśnienie gazu doskonałego w stałej objętości zmniejsza się według tego wzoru wraz z obniżaniem się temperatury. Dla $t = -273^0$ C ciśnienie to staje się $= 0$. Tę temperaturę, leżącą w naszej skali o 273^0 poniżej temperatury topnienia lodu, przyjętej za 0^0 w praktyce codziennej, nazywamy temperaturą *zera bezwzględnego*.

W doświadczeniach z gazami skroplonemi udało się uzyskać temperaturę około 1^0 zaledwie wyższą od temperatury zera bezwzględnego.

Ustalając skalę temperatur, przyjęliśmy za 0^0 temperaturę topniejącego lodu, umawiając się uważać temperatury wyższe od 0^0 za dodatnie (+), niższe zaś za ujemne (—). Moglibyśmy wszakże obrać za 0^0 temperaturę inną — uczynił tak np. Fahrenheit.

Przyjęte jest w wielu razach przy wyznaczaniu temperatury liczyć stopnie właśnie od wytłumaczonego przed chwilą *zera bezwzględnego*, leżącego o 273^0 poniżej temperatury topniejącego lodu.

W ten sposób liczoną temperaturę nazywamy *temperaturą bezwzględną*. Tu już, oczywiście, nie mamy temperatur ujemnych, a tylko dodatnie. Każdą temperaturę, wziętą w używanej przez nas codziennie skali, podać możemy w skali bezwzględnej, dodając tylko liczbę 273; np. jeżeli temperatura wody, wyznaczona w naszej codziennej skali, wynosi 20^0 C, jej temperatura bezwzględna jest $20^0 + 273^0 = 293^0$.

84. Równanie zasadnicze gazu doskonałego.

Przypuśćmy, iż v_0 i p_0 oznaczają odpowiednio objętość i ciśnienie danej ilości gazu w 0^0; niech v i p oznaczają odpowiednio objętość i ciśnienie tejże ilości gazu w t^0. O ilebyśmy ten gaz ogrzewali od 0^0 do t^0, nie pozwalając mu powiększyć swej objętości, wówczas w t^0 ciśnienie gazu byłoby jakieś inne p'. Zanotujmy sobie to wszystko w tabelce:

0^0	v_0	p_0
t^0	v	p
t^0	v_0	p'

Pierwszy i trzeci wiersz tej tabelki podają wartości ciśnienia danego gazu p_0 i p' w temperaturach 0^0 i t^0 w niezmiennej objętości v_0; zgodnie zatem ze wzorem (1) art. 83 możemy napisać

$$p' = p_0 (1 + \alpha t), \quad \ldots \ldots \ldots \quad (1)$$

gdzie $\alpha = \frac{1}{273}$.

Wiersze drugi i trzeci tabelki podają wartości różnych objętości i odpowiadających im ciśnień gazu w stałej temperaturze t^0; zakładając, iż gaz jest doskonały, t. j. stosuje się ściśle do prawa Boyle-Mariotte'a, możemy napisać

$$p v = p' v_0 \quad \ldots \ldots \ldots \quad (2)$$

Mnożąc odpowiednio lewą i prawą część równości (1) przez lewą i prawą część równości (2), otrzymujemy ważny wzór,

$$p v = p_0 v_0 (1 + \alpha t). \quad \ldots \ldots \ldots \quad (3)$$

Wzór ten wyraża zależność objętości i ciśnienia gazu doskonałego (a w przybliżeniu gazu rzeczywistego) w t^0 od objętości i ciśnienia w 0^0.

Napiszmy zamiast α we wzorze (3) jego wartość $\frac{1}{273}$; będziemy mieli

$$p v = \frac{p_0 v_0}{273} (273 + t).$$

Zgodnie z tem, cośmy powiedzieli w art. poprzednim, $273 + t$ oznacza *temperaturę bezwzględną* T gazu. Mamy więc

$$p v = \frac{p_0 v_0}{273} T,$$

lub, oznaczając stałą wielkość $\frac{p_0 v_0}{273}$ *) przez A, otrzymujemy ostatecznie

$$p v = A T \quad \ldots \ldots \ldots \quad (4)$$

*) Objętość danej ilości gazu w 0^0 pod danem ciśnieniem jest zupełnie określona; zatem iloczyn $v_0 p_0$ jest wielkością stałą; stałym więc jest iloraz tego iloczynu przez 273.

W tej postaci t. zw. wzór Clapeyrona wyraża, iż iloczyn z objętości danej ilości gazu doskonałego przez ciśnienie jest proporcjonalny do temperatury bezwzględnej gazu. W stałej temperaturze (T = const.) jest, oczywiście, pv = const., co wyraża znane nam prawo Boyle-Mariotte'a (art. 66).

W równaniu (4) lub też innej jego formie (3) zawarte jest wszystko, co się daje powiedzieć o zmianach objętości i ciśnienia gazu doskonałego, towarzyszących zmianom temperatury. Z tego powodu równanie to nazywa się równaniem zasadniczem gazu doskonałego. Widzieliśmy przed chwilą, że obejmuje ono jako przypadek szczególny prawo Boyle-Mariotte'a.

Zadania*).

84. Pręt miedziany ma długość 2,14 m w temperaturze 18° C. Jaka będzie długość tego pręta w temperaturze 100°?

85. Przekrój zlewki szklanej = 98 cm² w temperaturze 5°. Jaki jest przekrój tej zlewki, gdy w niej wrze woda, jeżeli ciśnienie jest normalne?

86. Bryła miedzi posiada objętość 428 cm³ w temperaturze 18°. Jaka będzie objętość tej bryły w temperaturze topniejącego lodu?

87. Pojemność kolby szklanej do kreski, zrobionej na szyjce, wynosi w temperaturze 15° dokładnie 1 litr. Jaka będzie objętość cieczy, mającej temperaturę 72° i wypełniającej kolbę do wymienionej kreski? (dla danego gatunku szkła α = 0,000009).

88. Mierzymy długość rurki mosiężnej w temperaturze 25° przy pomocy skali, zrobionej na stalowym pręcie i ścisłej dla 0°. Jako wynik pomiaru otrzymujemy 2,27 m. Jaka jest dokładna długość mierzonej rurki w danej temperaturze oraz w 0°?

89. Odczytujemy wysokość słupa barometrycznego 752,6 mm w temperaturze 17° C. Jaka jest ta wysokość, zredukowana do 0°, jeżeli barometr posiada oprawę mosiężną, na której zrobiona jest skala?

90. Kula szklana o pojemności dokładnie 50 cm³ w temperaturze 0° połączona jest z długą pionową rurką szklaną o średnicy 2,5 cm (wymiar dokładny w tejże temperaturze 0°). Jeżeli wypełnimy kulę rtęcią tak, by sięgała dokładnie do początku rurki w temperaturze 0°, jak wysoko stać będzie rtęć w rurce w temperaturze 100°?

91. Objętość gazu w temperaturze 28° pod ciśnieniem słupa rtęci 1024 mm wynosi 5 litrów; jaka będzie objętość tego gazu w temperaturze 0° pod normalnem ciśnieniem 760 mm?

92. Czy w pokoju, w którym raz mamy temperaturę t^0, innym razem t'^0, mieszczą się za każdym razem te same ilości powietrza, jeżeli w obu razach ciśnienie barometryczne jest jednakowe. Jeżeli nie, jaka jest zmiana ilościowa?

---

*) Dane cyfrowe, potrzebne do rozwiązania tych zadań, czytelnik znajdzie w odpowiednich tablicach na końcu książki.

93. Butelkę otwartą, zawierającą powietrze, wstawiono do wrzącej wody i po kilku minutach zatkano szczelnie korkiem. Jakie ciśnienie powietrza będziemy mieli w butelce, gdy po wyjęciu z kąpieli oziębimy ją do 15^0 C?

94. Balon szklany, wypełniony w temperaturze 0^0 czystym tlenkiem węgla pod ciśnieniem 735,7 mm, posiada masę 57,956 gr; po najdokładniejszem zaś usunięciu z niego gazu masa jego wynosi 57,34 gr. Tenże balon, wypełniony wodą dystylowaną w 15^0, posiada masę 564,725 gr. Znaleźć gęstość normalną (w 0^0 i pod ciśnieniem 760 mm) tlenku węgla.

Rozdział III. O mierzeniu ilości ciepła.

85. Pojęcie ilości ciepła. Ciepło właściwe.

Doświadczenie I. Nalewamy do dwu zlewek odmierzone ilości wody, np. 520 gr i 360 gr, przytem nie do pełna, by móc potem przelać do jednej ze zlewek wodę, zawartą w drugiej. Jedną ze zlewek trzymamy czas jakiś nad palnikiem, by ogrzać w niej wodę. Po usunięciu tej zlewki z ponad płomienia wyznaczamy prędko temperaturę wody w obu zlewkach, mieszając ją ostrożnie termometrem — okazuje się np., że 520 gr wody w jednej zlewce ma 16^0, 360 gr zaś w drugiej ma 48^0. Wlewamy prędko wodę cieplejszą do zimniejszej (można byłoby uczynić odwrotnie) i, mieszając znowu całą tę ilość wody termometrem, notujemy temperaturę, która się ustala ostatecznie w tej mieszaninie; okazuje się, że wynosi ona w danym razie ok. $28^0.5$.

W celu wyjaśnienia zaobserwowanego zjawiska, rozumujemy w następujący sposób (p. art. 74). Przy ustaleniu połączenia cieplnego między dwiema masami wody w różnych temperaturach, cieplejsza woda *oddaje ciepło* chłodniejszej, przez co temperatura jej się obniża, chłodniejsza pobiera oddane ciepło, przez co temperatura jej się podnosi *). Zakładamy, iż na to, by 1 gr wody ogrzać o jeden stopień, trzeba mu udzielić pewnej *ilości ciepła;* przeciwnie, gdy mu tę *ilość ciepła* odbierzemy, temperatura jego obniży się o jeden stopień. Dla ogrzania 2, 3, 10, ... gr o jeden stopień trzeba odpowiednio 2, 3, 10, ... razy większej ilości ciepła; podobnie obniżeniu się temperatury 2, 3, 10, ... gr wody o jeden stopień towarzyszy odpowiednio 2, 3, 10, ... razy większa utrata ciepła, niż to zachodzi dla jednego grama.

Obierzmy *za jednostkę ilości ciepła tę jego ilość, której udzielenie, wzgl. odebranie jednemu gramowi wody dystylowanej warunkuje pod-*

*) Dla uproszczenia narazie rozumowania zaniedbujemy fakt, że w połączeniu cieplnem pozostaje też zlewka. Im cieńsza jest zlewka, im jej masa jest mniejsza w porównaniu z masą wody, tem bardziej to uproszczenie jest dopuszczalne.

niesienie się, wzgl. obniżenie temperatury wody o jeden stopień. Jednostkę tę nazwijmy *kalorją*.

Posługując się tem nowem pojęciem, powiemy, iż w zaobserwowanem zjawisku 360 gr wody, oziębiając się od 48^0 do $28^0,5$, t. j. o $19^0,5$, utraciło 360.19,5 kaloryj = 7020 kaloryj, zaś 520 gr wody, ogrzewając się od 16^0 do $28^0,5$, t. j. o 12^05, pobrało 520.12,5 kaloryj = 6500 kaloryj. Gdyby w grę wchodziły tu tylko te dwie masy wody, wówczas ilość ciepła, oddanego przez jedną masę, musiałaby się ściśle równać ilości ciepła, pobranego przez drugą. Ale wszak nie braliśmy pod uwagę, że część ciepła musiała pochłonąć zlewka, podstawa, na której zlewka stoi, otaczające powietrze....

Ściślejsze badania wykazały, że jeden gram wody dystylowanej, ogrzewając się, wzgl. oziębiając o 1^0, pochłania, wzgl. traci niejednakowe ilości ciepła, w zależności od tego, w jakich mianowicie granicach temperatury ta zmiana zachodzi (np. 20^0—21^0 albo 5^0—6^0 albo 121^0—122^0 i t. d.). Skutkiem tego ściśle *określamy kalorję, jako ilość ciepła, pochłanianą, wzgl. oddawaną przez 1 gr wody dystylowanej przy zmianie temperatury o 1^0 w 15^0, t. j. w granicach $14^0,5$—$15^0,5$.*

Czasem określaną w powyższy sposób jednostkę ilości ciepła nazywają *gramstopniem;* czasem znów *kalorją małą* w odróżnieniu od *kalorji wielkiej* = 1000 kaloryj małych (określenie się nie zmienia, tylko dotyczy ono nie 1 gr, lecz 1 Kg wody dystylowanej). Używając w dalszym ciągu słowa „kalorja", będziemy mieli zawsze na myśli kalorję małą.

D o ś w i a d c z e n i e II. Umieszczamy jednocześnie nad płomieniami dwu jednakowych palników dwie jednakowe zlewki szklane, z których jedna zawiera np. 500 gr wody, a druga 500 gr kwasu octowego. Jeżeli przed postawieniem tych zlewek nad palnikami temperatury obu cieczy są jednakowe, przekonywamy się, iż po kilku minutach ogrzewania temperatura kwasu octowego jest znacznie wyższa od temperatury wody. Dla przekonania się, iż fakt ten nie jest uwarunkowany przez pewną różnicę w palnikach, możemy powtórzyć doświadczenie, umieszczając zlewkę z wodą nad tym palnikiem, nad którym mieścił się poprzednio kwas octowy, i odwrotnie — wynik otrzymujemy ten sam. Fakt ten możemy sobie tłumaczyć jedynie w ten sposób, że 1 gr kwasu octowego, ogrzewając się o 1^0, pochłania mniej ciepła, niż 1 gr wody; odpowiednio 1 gr kwasu octowego, gdy się temperatura jego obniża o 1^0, traci mniej ciepła, niż 1 gr wody przy takiem samem oziębieniu.

Proste to doświadczenie nasuwa nam myśl, że wogóle różne substancje pod tym względem mogą się różnić, że równe ich masy (np. 1 gr wody, 1 gr nafty, 1 gr miedzi, 1 gr żelaza i t. d.) pochłaniają różne ilości ciepła, gdy temperatura ich podnosi się w tych samych granicach, a odpowiednio i oddają różne ilości ciepła, gdy się temperatura ich jednakowo obniża.

Dochodzimy w ten sposób do ważnego bardzo pojęcia *ciepła właściwego*.

Jeżeli m gr pewnej substancji, ogrzewając się od t_1^0 do t_2^0 (wzgl. oziębiając się od t_2^0 do t_1^0), pochłania (wzgl. traci) q kaloryj, wówczas stosunek

$$c = \frac{q}{m\,(t_2 - t_1)}$$

nazywamy ciepłem właściwem danej substancji w danych granicach temperatury (od t_1^0 do t_2^0).

Zatem ciepło właściwe danej substancji w t^0 wskazuje, ile kaloryj w danej temperaturze t^0 pochłania 1 gr tej substancji, wzgl. oddaje, gdy temperatura jego w t^0 wzrasta o 1^0 (t. j. gdy się zmienia od $t^0 - {}^1/_2{}^0$ do $t^0 + {}^1/_2{}^0$), wzgl. obniża się o 1^0 (t. j. zmienia się od $t^0 + {}^1/_2{}^0$ do $t^0 - {}^1/_2{}^0$). Określając wyżej *kalorję*, przyjęliśmy przez to samo ciepło właściwe wody dystylowanej za równe *jedności* w 15^0 C. Podobnie jak ciepło właściwe wody, ciepło właściwe innych ciał jest naogół różne w różnych temperaturach.

Na końcu książki czytelnik znajdzie w tablicach wartości ciepła właściwego niektórych ciał. Musi nas przytem uderzyć wysoka względnie wartość ciepła właściwego wody. Pewna masa wody, ogrzewając się w określonych granicach temperatury, pochłania znacznie więcej ciepła, a odpowiednio, oziębiając się w tych samych granicach temperatury, oddaje znacznie więcej ciepła, niż taka sama masa żelaza, miedzi. Fakt ten odgrywa wielką rolę w zjawiskach przyrody, np. różnica klimatów lądowego i morskiego zależy w znacznej mierze od tego; fakt ten znajduje także zastosowania techniczne, np. przy ogrzewaniu wodnem: stygnąc, woda oddaje ciepło otoczeniu, czyli je ogrzewa; bryła żelaza o tej samej masie, stygnąc w tych samych granicach temperatury, oddałaby blisko 10 razy mniej ciepła.

86. Kalorymetr. Mierzenie ciepła właściwego ciał stałych i cieczy.

Przyrządy, które służą do mierzenia ilości ciepła, w szczególności zaś do wyznaczania ciepła właściwego, nazywają się *kalorymetrami*. Urządzenia ich bywają różne. Rys. 176 przedstawia w przekroju jeden z najprostszych kalorymetrów, który najpierw rozpatrzymy w zastosowaniu do mierzenia ciepła właściwego ciał stałych. Naczynie o pojemności ok. litra, zawierające określoną ilość np. M gr wody dystylowanej, spoczywa na 3-ch niewielkich płytkach korkowych w innem naczyniu. Odważoną ilość m gr ciała badanego, najlepiej w postaci rozdrobnionej (np. opiłek), trzymamy czas dłuższy w próbówce, zatkanej kawałkiem waty, we wrzącej wodzie (ewent. innej kąpieli o stałej temperaturze). Po pewnym czasie, gdy już mamy pewność, że ciało posiada temperaturę tej kąpieli $t_2{}^0$, wyznaczamy przy pomocy termometru, podzielonego co najmniej na dziesiąte części stopnia, temperaturę wody w kalorymetrze $t_1{}^0$; wyjmujemy następnie próbówkę z kąpieli, owijamy ją przygotowanym większym kawałkiem waty, otwieramy i wsypujemy zawartość do kalorymetru, wykonywając całą tę czynność jak najprędzej, by podczas tego przenoszenia temperatura badanego ciała nie spadła (wata wchłania przylegającą do próbówki ciecz, chroni próbówkę i zawarte w niej ciało od stygnięcia, a zarazem pozwala ująć dolną część próbówki ręką bez narażenia jej na oparzenie). Teraz, mieszając wciąż wodę w kalorymetrze termometrem (używają się też specjalne mieszadła), obserwujemy podnoszenie się jej temperatury, notując ostatecznie najwyższą wartość, po której osiągnięciu woda w kalorymetrze zaczyna stygnąć. Przypuśćmy, iż ta końcowa, najwyższa temperatura jest t^0; jest to zarazem końcowa temperatura ciała badanego; nastąpiło tu bowiem zrównanie temperatur tego ciała i wody. Oznaczmy przez x nieznane ciepło właściwe ciała badanego; m gr tego ciała, oziębiając się od $t_2{}^0$ do t^0, t. j. o $(t_2—t)$ stopni, traci $mx\ (t_2—t)$ kaloryj; M gr wody, ogrzewając się od $t_1{}^0$ do t^0, t. j. o $(t—t_1)$ stopni, pochłania $M\ (t—t_1)$ kaloryj. Poza tem wszakże ogrzewa się od $t_1{}^0$ do t^0 samo naczynie kalorymetryczne, ew. mieszadło, przykrywa i t. d. Aby to uwzględnić, wyznaczamy raz na zawsze dla danego kalorymetru jego t. zw. *równoważnik wodny,* t. j. ilość wody dystylowanej (w gramach), która w danych warunkach pochłania tyleż ciepła, co naczynie kalorymetryczne wraz z mieszadłem, termometrem, ewent. przykrywą; w rachunku tę liczbę gramów dodajemy do masy wody, mieszczącej się w kalorymetrze. Dajmy na to, wyznaczyliśmy ten równoważnik wodny danego kalorymetru i wynosi on M'. Zatem kalorymetr pochłania w danym przypadku $M'(t—t_1)$ kaloryj. Przyjmując, iż ciepło, utracone przez ciało badane, w zupełności zostało pochłonięte przez wodę kalorymetru i kalorymetr (pomijamy wszelką inną utratę ciepła nazewnątrz), napiszemy:

Rys. 176.

$$m\,x\,(t_2 - t) = (M + M')\,(t - t_1),$$

skąd
$$x = \frac{(M + M')\,(t - t_1)}{m\,(t_2 - t)}; \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

znajdujemy w ten sposób szukaną wartość ciepła właściwego.

P r z y k ł a d. Szukamy ciepła właściwego miedzi: 200 gr opiłek miedzianych ogrzewamy, jak wyżej, we wrzącej wodzie; zatem $m = 200$ gr, $t_2 = 100^0$. Przypuśćmy, iż początkowa temperatura wody kalorymetru $t_1 = 14^0$, końcowa zaś $t = 17^0$; przytem masa tej wody wraz z równoważnikiem wodnym kalorymetru $M + M' = 500$ gr. Mamy więc

$$x = \frac{500\,.\,(17 - 14)}{200\,.\,(100 - 17)} = \frac{500\,.\,3}{200\,.\,83} = 0{,}09.$$

Czytelnik powinien wiedzieć z nauki początkowej o przyrodzie, co się nazywa dobrym, a co złym przewodnikiem ciepła. Otóż korek, powietrze są to bardzo złe przewodniki ciepła — dlatego naczynie kalorymetryczne *izolowaliśmy* w opisany wyżej sposób. Dla lepszej izolacji cieplnej (lepszego odosobnienia) wody kalorymetru od otaczającego powietrza dobrze jest przykryć kalorymetr po wrzuceniu doń badanego ciała grubą warstwą waty, przez którą przechodziłby swobodnie termometr, służący do obserwowania temperatury.

Im prędzej nastąpi zrównanie temperatur ciała badanego i wody kalorymetru, tem mniejsze będą owe szkodliwe straty ciepła w otoczeniu; właśnie dla przyśpieszenia wymiany ciepła między ciałem badanem a wodą bierzemy to ciało w postaci sproszkowanej.

Ć w i c z e n i e 41. Wyznaczcie równoważnik wodny naczynia kalorymetrycznego (naczynie wewnętrzne na rys. 176) w sposób następujący. Przygotujcie w zlewce tyle wody, aby po wlaniu do kalorymetru wypełniła go mniej więcej do $^1/_3$ jego pojemności. Zważcie naczynie kalorymetryczne i zanotujcie jego masę. Odczytajcie temperaturę powietrza w pokoju, przyjmując, że taką samą temperaturę posiada kalorymetr, i zanotujcie ją. Umieśćcie w niewielkiej (ok. 70 cm) odległości od kalorymetru palnik, osłaniając kalorymetr kawałkiem tektury, i ogrzewajcie nad nim wodę w zlewce, by się ogrzała mniej więcej do 40^0. Usuńcie wtedy albo zgaście palnik, a, mieszając termometrem z podziałką na $^1/_{10}$ stopnia wodę w zlewce, zauważcie jej temperaturę i prędko wlejcie do kalorymetru, mieszając w dalszym ciągu termometrem i obserwując wskazania termometru. Z początku temperatura wody prędko zacznie opadać, potem na krótko się ustali, następnie zaś będzie spadać dalej. Zanotujcie temperaturę wody, gdy właśnie się ustaliła; odpowiada to chwili zrównania się temperatur kalorymetru i wody. Zważcie wreszcie kalorymetr (wewnętrzne naczynie z rys. 176) wraz z wodą, a potrąciwszy znalezioną uprzednio masę kalorymetru, zanotujcie masę wlanej do kalorymetru wody.

Gdybyście do wody w tej temperaturze, którą ona posiadała w chwili, gdyście ją wlewali do kalorymetru, wlali określoną ilość wody w temperaturze pokojowej, a więc tej, którą miał początkowo kalorymetr, otrzymalibyście takie samo obniżenie się temperatury wody, jakie obserwujecie po wlaniu jej do kalorymetru. Ta ilość wody, narazie nieznana, którą oznaczycie przez x. jest właśnie szukanym równoważnikiem wodnym kalorymetru.

Opierając się na rozumowaniu, przytoczonem przy doświadczeniu 1 art. 85, napiszcie równanie, z którego znajdziecie x.

Ćwiczenie 42. Mając kalorymetr o znanej wartości równoważnika wodnego, wyznaczcie metodą, wyjaśnioną na początku tego art., ciepło właściwe żelaza, ołowiu, cynku (p. wzór 1).

Tego samego naczynia kalorymetrycznego możemy użyć do mierzenia ciepła właściwego cieczy. Wlewamy M gr cieczy badanej do tego naczynia; ogrzewamy jak wyżej m gr jakiejś nie rozpuszczającej się w danej cieczy substancji stałej, o znanem cieple właściwem c, do temperatury kąpieli t_2^0. Wyznaczamy temperaturę początkową t_1^0 badanej cieczy w kalorymetrze, wrzucamy do kalorymetru owe m gr ciała stałego i wyznaczamy temperaturę końcową t^0 po zrównaniu się temperatur. Oznaczamy ciepło właściwe cieczy przez x, równoważnik zaś wodny kalorymetru przez M'. Piszemy więc:

$$M x (t - t_1) + M' (t - t_1) = m c (t_2 - t),$$

skąd

$$x = \frac{m c (t_2 - t_1) - M' (t - t_1)}{M (t - t_1)} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (2)$$

Ćwiczenie 43. Wyznaczcie metodą opisaną, posługując się wzorem (2), ciepło właściwe nafty, terpentyny, oleju parafinowego.

87. Ciepło właściwe gazów (c_p i c_v).

Widzieliśmy wyżej, iż można ogrzewać gaz, pozostawiając przytem bez zmiany albo jego objętość, albo jego ciśnienie. W jednym i drugim razie jednostka masy danego gazu, ogrzewając się o 1^0 C, pochłania określoną ilość ciepła, co stanowi miarę ciepła właściwego gazu (i tu można mówić albo o przeciętnej wartości ciepła właściwego w pewnych szerszych granicach temperatury, albo — co będzie dokładniejsze — o wartości ciepła właściwego w pewnej określonej temperaturze). Z dokładnych pomiarów, których tu opisywać nie będziemy, wynika, iż ciepło właściwe każdego gazu pod stałem ciśnieniem jest większe, niż ciepło właściwe tegoż gazu w stałej objętości; jeżeli zatem pierwsze oznaczymy przez c_p, drugie zaś przez c_v, będziemy mieli zawsze

$$c_p > c_v \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (1)$$

W tablicach czytelnik znajdzie wartości ciepła właściwego niektórych gazów. Zwróci tam jego uwagę niezwykle wysoka wartość ciepła właściwego wodoru $\left(c_p = 3{,}41 \frac{\text{kal}}{\text{gr}}\right)$.

Zadania.

95. Ile kaloryj pochłania 3 Kg miedzi, ogrzewając się od 18^0 do 105^0?

96. Ile ciepła udzielić należy 2 litrom wody, by ogrzać je od 15^0 do temperatury wrzenia pod ciśnieniem normalnem?

97. Jaką temperaturę mieć będzie mieszanina, utworzona z trzech litrów wody w temperaturze 42^0 z dwoma litrami wody w temperaturze 5^0?

98. Ile zmieszać należy wody w temperaturze wrzenia z wodą w temperaturze 5^0, by otrzymać 5 litrów wody w temperaturze 20^0?

99. Do 2 Kg wody w 30^0 wrzucamy 300 gr miedzi, ogrzanych do 100^0. W jakiej temperaturze będą te ciała, gdy się temperatury zrównają (naczynia, zawierającego wodę, nie uwzględniamy)?

100. Naczynie miedziane, doskonale izolowane, posiada masę 72 gr i zawiera 500 gr wody w temperaturze 16^0. Wrzucamy do wody kawałek miedzi o masie 68 gr, ogrzany do temperatury 100^0. Jaka się ustali temperatura?

101. Naczynie prostego kalorymetru, jak na rys. 176, jest mosiężne i posiada masę 375 gr. Jaki jest równoważnik wodny tego kalorymetru?

102. Szukając równoważnika wodnego kalorymetru, znajdujemy, że masa naczynia kalorymetrycznego jest 58,5 gr; masa kalorymetru wypełnionego wodą jest 308,25 gr; początkowa temperatura wody jest 12^0; po wlaniu pewnej ilości wrzącej wody ustala się temperatura $15^0{,}4$, masa zaś kalorymetru wraz z tą nową zawartością wody wynosi 318,6 gr. Jaki jest szukany równoważnik?

103. 200 gr miedzi w temperaturze 100^0 wrzucamy do 100 gr alkoholu w temperaturze 8^0, mieszczącego się w kalorymetrze miedzianym, którego masa jest 25 gr. Temperatura alkoholu podnosi się do $28^0{,}5$. Znaleźć ciepło właściwe alkoholu.

104. Do 100 gr wody w temperaturze 10^0 zaczynamy stopniowo dolewać wodę w 100^0. Przedstawić zapomocą wykresu temperaturę mieszaniny jako funkcję ilości dolanej gorącej wody.

105. W celu wyznaczenia temperatury pieca ogrzano w nim kulę platynową o masie 100 gr i wrzucono ją do 500 gr wody w temp. 12^0, zawartej w miedzianym kalorymetrze o masie 117 gr. Temperatura wody w kalorymetrze podniosła się do $19^0{,}2$. Jaka jest temperatura pieca, jeżeli ciepło właściwe platyny $= 0{,}032 \frac{\text{kal}}{\text{gr}}$?

106. Ile ciepła potrzeba, by ogrzać od $8^0{,}4$ do 12^0 powietrze w pokoju o wymiarach 7 m $\times$ 5 m $\times$ 4 m, jeżeli ciśnienie barometryczne mierzy się słupem rtęci 743 mm?

Rozdział IV. O zmianie faz.

88. Pojęcie o fazach.

Wodę nazywamy cieczą, jako z cieczą bowiem przeważnie mamy z nią do czynienia w życiu codziennem. Wiemy wszakże, iż można ją również nazywać ciałem stałem, gdy występuje w postaci lodu, a także ciałem gazowem, o ile mamy na myśli parę wodną. Powiadamy tedy, iż woda występuje w trzech *fazach*: stałej, ciekłej i gazowej. Bywa, iż wszystkie te trzy fazy istnieją równocześnie; np. w zimie, gdy zbiorniki wody bieżącej lub stojącej są zamarznięte, mamy w nich wodę w dwu fazach — stałej i ciekłej, ponad niemi zaś w powietrzu zawarta jest zawsze w pewnej ilości para wodna, a więc mamy trzecią jej fazę — gazową. Udzielanie lub odbieranie wodzie ciepła warunkuje zmiany faz: przez ogrzewanie lodu topimy go na wodę, przez ogrzewanie wody zmieniamy ją na parę wodną; przeciwnie przez oziębianie pary skraplamy ją, a przez dalsze oziębianie otrzymujemy z niej lód. Bardzo wiele innych ciał występuje w tych samych fazach; parafina, wosk, naftalina, metale i t. d., które w potocznej mowie nazywamy ciałami stałemi, dają się topić, t. j. występują w fazie ciekłej, a także parują, t. j. przechodzą w fazę gazową. Zazwyczaj się myśli, iż faza ciekła jest niezbędnym etapem pośrednim pomiędzy fazą stałą a gazową. Nie jest to jednak słuszne, znamy bowiem dobrze bezpośrednie zmiany fazy stałej na gazową (i odwrotnie). Zjawisko tego rodzaju nosi nazwę *sublimacji* (między innemi ciałami własność tę wykazuje sublimat); sublimuje np. naftalina, kamfora (mówi się „znikł jak kamfora“); sublimuje również lód — para wodna tworzy się bezpośrednio z lodu bez uprzedniego jego topnienia.

D o ś w i a d c z e n i e. W długiej próbówce szklanej umieszczamy nieco naftaliny i zanurzamy dolny koniec próbówki w wodzie o temperaturze około 40° C, trzymając próbówkę nieco pochyło, by górny jej koniec pozostawał odchylony na bok i w ten sposób nie ulegał ogrzewaniu przez ciepły prąd powietrza, unoszący się nad wodą. Po kilku minutach spostrzegamy na ścianach próbówki w górnej jej części piękne kryształki, które występują w coraz to większej ilości w miarę trwania doświadczenia — to właśnie naftalina przechodzi podczas ogrzewania bezpośrednio z fazy stałej w gazową, w zetknięciu się zaś z chłodną ścianą górnej części rurki odwrotnie z fazy gazowej w stałą (próbówkę zatykamy przytem kawałkiem waty, by zapobiec uchodzeniu z niej pary naftaliny).

Gdy mamy w naczyniu roztwór nasycony jakiejkolwiek soli, np. wodny roztwór soli kuchennej, na dnie pewną ilość soli nierozpuszczonej, nad roztworem zaś zawsze pewną ilość pary wodnej — powiadamy, iż dane w tym razie dwie substancje (woda i sól) występują w 3-ch fazach: sól nierozpuszczona, roztwór i para. Podobnie więc jak w wyżej przytoczonym przykładzie rozróżnialiśmy pewne jednorodne części niejednorodnego układu (lód, wodę, parę), tak tu również wyodrębniamy jednorodne części niejednorodnego układu; części te graniczą ze sobą, dają się zarówno w myśli jak doświadczalnie oddzielić środkami mechanicznemi — każdą taką jednorodną część oznaczamy mianem *fazy*.

89. Topnienie. Krzepnięcie.

Ćwiczenie 44. Wsypcie do kubka metalowego (albo do zlewki) sporą garść drobno tłuczonego lodu i, wstawiwszy weń termometr, by kuleczka jego i część słupka poniżej 0^0 całkowicie były otoczone lodem, zanotujcie temperaturę, gdy opadający słupek rtęci w termometrze się zatrzyma. Przez kilka minut co minutę notujcie temperaturę. Wlejcie teraz do kubka trochę wody i, mieszając ostrożnie termometrem mieszaninę, notujcie dalej temperaturę. Przez cały czas tworzy się w kubku (zlewce) coraz więcej wody, natomiast ilość lodu maleje — zachodzi *topnienie lodu*. Zanim jeszcze lód stopi się całkowicie, umieśćcie kubek nad palnikiem (ostrożnie ze zlewką!) i, ogrzewając powoli mieszaninę, poruszajcie ją w dalszym ciągu termometrem i notujcie, jak wyżej, temperaturę. Kontynuujcie odczytywanie temperatury, gdy lód się całkowicie stopi, trzymając w dalszym ciągu kubek nad palnikiem. Przedstawcie zanotowany przebieg temperatury przy pomocy wykresu.

Ćwiczenie 45. Nalejcie do kubka metalowego (zlewki, szerokiej próbówki) wody, mającej temperaturę pokojową, wstawcie to naczynie do uprzednio przygotowanej mieszaniny mrożącej (p. art. 81, dośw. II) i, mieszając oziębianą w ten sposób wodę termometrem, notujcie w równych odstępach czasu (np. co minutę) temperaturę, zanim ścinająca się w lód woda nie utrudni zbytnio ruchów termometru *) (rys. 177). Przedstawcie przebieg zmian temperatury wykreślnie podczas obserwowanego tu *krzepnięcia* wody.

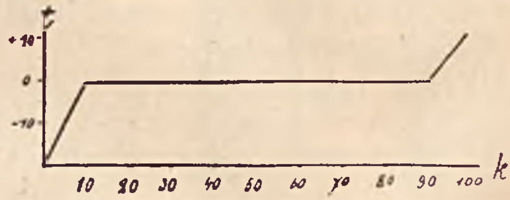
---

*) Właściwie dobrze byłoby, abyście dali możność termometrowi pozostać w wodzie, gdy woda całkowicie skrzepnie i kontynuowali odczytywanie temperatury dalej. Z tej jednak części doświadczenia nie zawsze termometr wyjdzie cało.

Ćwiczenie 46. Wsypcie do długiej i szerokiej próbówki naftaliny; wstawcie w nią termometr, by całkowicie jego kuleczka i dolna część słupka rtęci otoczone były zewsząd naftaliną; wstawcie próbówkę do wrzącej wody i notujcie, jak wyżej, przytrzymując ręką termometr, temperaturę naftaliny, zanim się nie stopi, oraz czas jakiś po stopieniu. Potem, wyjąwszy próbówkę z wrzącej wody, pozwólcie jej wraz z naftaliną stygnąć w powietrzu i znowu notujcie temperaturę naftaliny, zanim nie skrzepnie i jeszcze czas jakiś po skrzepnięciu. Przedstawcie wyniki obu seryj obserwacyj wykreślnie.

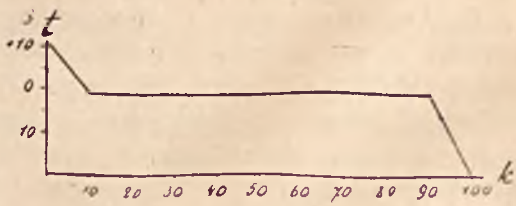
Rys. 177.

Ćwiczenie 47. Wrzućcie do długiej szerokiej próbówki kilka kawałków wosku i dajcie mu się stopić przez zanurzenie próbówki w gorącej wodzie, mającej powyżej 80°. Gdy wosk stanie się zupełnie ciekły, wyjmijcie próbówkę z wody, wstawcie do wosku termometr i, przytrzymując go ręką, zaczekajcie, aż wosk skrzepnie i termometr pozostanie w nim tkwiący tak, jak na rys. 177. Przez cały czas od chwili wstawienia termometru do ciekłego wosku aż do zupełnego jego skrzepnięcia, a także czas jakiś potem notujcie temperaturę wosku. Następnie wstawcie znowu próbówkę do gorącej (jak wyżej) wody i, przytrzymując ręką termometr, znowu notujcie zmiany temperatury, zanim wosk się całkowicie stopi, a także czas jakiś jeszcze potem. Przedstawcie wyniki obu seryj notowań przy pomocy wykresu.



Rys. 178.

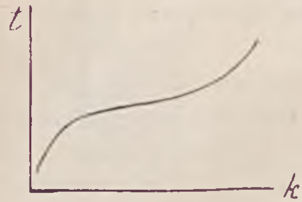
W ćwiczeniach powyższych zdobywacie bliższą znajomość zjawisk *topnienia* i *krzepnięcia*. Stwierdzacie, że istnieją takie ciała, jak lód, dla których ta temperatura jest ściśle określona — są to ciała *krystaliczne*. Gdy ciało takie przez ogrzewanie doprowadzamy do tej temperatury, zaczyna się topnienie i podczas trwania jego cały czas temperatura pozostaje bez zmiany; dopiero, gdy *całkowicie* ciało to stanie się ciekłem, dalsze dostarczanie mu ciepła powoduje podnoszenie się temperatury. Odwrotnie, gdy ciału temu, będącemu w fazie ciekłej, odbieramy ciepło, temperatura jego się obniża, lecz przestaje się obniżać w chwili, gdy ciecz zaczyna krzepnąć; przez cały czas krzepnięcia temperatura pozostaje niezmienna (ta sama, co temperatura topnienia) i dopiero gdy *w całości* ciecz skrzepnie, dalsze odbieranie ciepła temu



Rys. 179.

ciału powoduje obniżanie się temperatury. Wykreślnie rzecz przedstawia się tak, jak to widać na rys. 178 dla procesu topnienia lodu, na rys. 179 zaś dla procesu krzepnięcia wody.

Poza tem istnieją ciała takie, jak wosk, dla których ściśle nie możemy podać wartości temperatury topnienia — najpierw ciała te mięknią i stopniowo nabierają własności, dla których nazywamy je pospolicie cieczami. Podobnie z fazy ciekłej te ciała przechodzą w fazę stałą, gęstniejąc stopniowo. Wykreślnie rzecz się przedstawia tak, jak na rys. 180 w przypadku topnienia wosku.



Rys. 180.

Na wszystkich tych wykresach na osi *y-ów* odmierzane są wartości temperatury na osi *x-ów* ilości doprowadzanego wzgl. odbieranego ciepła — ilości te można dla uproszczenia uważać za proporcjonalne do czasu trwania doświadczenia, jeżeli ogrzewanie wzgl. oziębianie odbywa się w sposób możliwie jednostajny.

W tablicach na końcu książki znajdziecie podane temperatury topnienia niektórych substancyj.

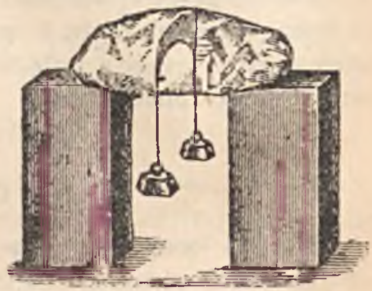
Czasem ciecz daje się oziębić poniżej temperatury krzepnięcia, a krzepnięcie wbrew oczekiwaniu nie następuje; takie *przechłodzenie* cieczy można zaobserwować przeważnie wtedy tylko, gdy jest ona bardzo czysta, nie zawiera obcych domieszek, przytem nie ulega wstrząsaniu podczas oziębiania. Np. oziębiając ostrożnie wodę dystylowaną (bez wstrząśnień i bez mieszania), można temperaturę jej obniżyć do — 10° C, a woda nie skrzepnie; wystarczy jednak wstrząsnąć wtedy ciecz lub wrzucić do niej kryształek lodu, a prędko pocznie krzepnąć, przyczem temperatura jej podniesie się do 0° *).

D o ś w i a d c z e n i e I. Wsypujemy do próbówki tiosiarczanu sodowego (t. zw. utrwalacza fotograficznego) i zanurzamy próbówkę w wodzie gorącej (70°—80°), jak na rys. 177. W sposób, którego używaliśmy w ćwiczeniach powyższych, wyznaczamy temperaturę topnienia tej substancji; wynosi ona 48°, przebieg zaś zjawiska przedstawia się wykresem tego typu, który mamy na rys. 178 (jest to ciało krystaliczne). Następnie wyjmujemy próbówkę z wody i pozwalamy ciekłemu tiosiarczanowi stygnąć w powietrzu. Okazuje się, że ostyga on do temperatury pokojowej, ale nie krzepnie — możemy nawet dość mocno potrząsać próbówką, a krzepnięcie nie zachodzi. Mamy więc tu ciecz

*) Mieszanie termometrem wody podczas jej krzepnięcia zapobiega zjawisku przechłodzenia.

przechłodzoną. Wystarcza jednak wrzucić do przechłodzonego tiosiarczanu sodowego malutki kryształek tej substancji, a ciecz prędko zaczyna krzepnąć dokoła wrzuconego kryształka, jako zarodka, i w krótkim czasie krzepnie w całej swej masie, przyczem temperatura podnosi się do 48° (ten skok temperatury wyczuwamy ręką, w której trzymamy próbówkę).

Przy wyznaczaniu temperatury krzepnięcia różnych substancyj zwracać należy uwagę na to, by nie otrzymać zjawiska przechłodzenia; pamiętajmy wszakże, iż żadna substancja w fazie ciekłej nie może być przechłodzona, jeżeli znajduje się w niej choć odrobina tej samej substancji w fazie stałej. Wyznaczając np. obniżanie się temperatury ciekłego tiosiarczanu sodowego, moglibyśmy błędnie wnosić, iż temperatura jego krzepnięcia jest niższa od temperatury pokojowej; jeżeli jednak podczas stygnięcia ciekłego tiosiarczanu wrzucamy doń kryształki stałego tiosiarczanu, krzepnięcie rozpoczyna się bez wszelkiego opóźnienia i termometr wskazuje nam dokładnie szukaną temperaturę.


Rys. 181.

D o ś w i a d c z e n i e II. Przez podpartą na dwu końcach bryłę lodową przerzucamy drut, obciążony znacznym ciężarem, np. odważnikami o masie kilku Kg (rys. 181). Drut ten wrzyna się coraz głębiej w lód, wreszcie przechodzi przezeń nawylot, pozostawiając wyraźny ślad rozcięcia bryły, pomimo iż na całem tem przecięciu bryła jest spojoną. Pod ciśnieniem drutu lód się topi, przez co drut wchodzi w bryłę coraz głębiej; ponad drutem powstała woda w szparze krzepnie znowu — w ten sposób właśnie odbywa się rozcinanie bryły wraz z towarzyszącem mu spajaniem.

Doświadczenie to dowodzi, że zjawisko topnienia zależy od ciśnienia. Jest to zupełnie zrozumiałe. Większość ciał zmniejsza się w objętości podczas krzepnięcia, niektóre jednak ciała zwiększają przytem swą objętość — do tych ostatnich należy, jak wiemy, woda. Ponieważ zwiększenie ciśnienia zewnętrznego ma jako bezpośredni skutek zmniejszenie objętości ciała, przeto jest rzeczą oczywistą, iż dla pierwszych ciał zwiększenie ciśnienia, że tak powiemy, sprzyja krzepnięciu, dla drugich zaś odwrotnie sprzyja topnieniu. Dla stopienia więc któregokolwiek z ciał pierwszej kategorji pod zwiększonem ciśnieniem trzeba je ogrzać do wyższej temperatury, niż to potrzebne jest przy ciśnieniu normalnem; natomiast topnienie któregoś z ciał drugiej kategorji pod zwiększonem ciśnieniem zachodzi w niższej temperaturze, niż pod ciśnieniem normalnem. Doświadczenie potwierdza takie rozumowanie w zupełności; wyjaśniają to następujące dane ścisłych pomiarów.

ciśnienie	1 Atm.	500 Atm.	1000 Atm.	2000 Atm.
lód	0^0	-4^0	$-8^0,5$	-19^0
siarka	120^0	130^0	143^0	166^0

Jak widzimy, wahania ciśnienia atmosferycznego, jako bardzo nieznaczne, nie mogą warunkować zmian dostrzegalnych w temperaturze topnienia ciał. Dlatego właśnie nie braliśmy tego czynnika pod uwagę w powyższych ćwiczeniach.

W art. 53 mówiliśmy o lodowcach; rola ciśnienia w zjawisku *spływania* lodowców jest oczywista.

Rozumiemy też, dlaczego jest tak łatwe poruszanie się łyżwiarza na lodzie, sani na śniegu — powstająca skutkiem ciśnienia warstewka wody między łyżwą a taflą lodową, między płozami sani a śniegiem, zmniejsza znakomicie tarcie.

90. Ciepło topnienia.

Podczas topnienia ciało pochłania pewną ilość ciepła; możemy powiedzieć, iż kosztem tego ciepła topnienie się odbywa. Ilość ciepła, pochłoniętego na topnienie, jest oczywiście tem większa, im większa jest masa ciała, poza tem zależeć musi od indywidualnych własności substancji.

By wywołać krzepnięcie, t. j. przechodzenie ciała z jego fazy ciekłej w stałą, oziębiamy ciało, odbieramy mu ciepło. Jeżeli dana masa podczas topnienia pochłania tyle a tyle kaloryj, to podczas krzepnięcia przy niezmiennych pozostałych warunkach fizycznych oddaje tyleż kaloryj.

Stosunek liczby kaloryj, pochłoniętych przez ciało podczas topnienia, do masy ciała $\left(\frac{q}{m}\right)$ *nazywamy jego ciepłem topnienia;* liczbowo ten stosunek wyraża, ile kaloryj pochłania 1 gr danej substancji podczas topnienia, względnie oddaje podczas krzepnięcia.

Ćwiczenie 48. Znajdźcie ciepło topnienia lodu. W tym celu wrzućcie do kalorymetru, który zważyliście, którego równoważnik wodny M' wyznaczyliście uprzednio i który zawiera M gr wody w temperaturze t^0, kilka kawałków lodu, osuszonych bibułką przed samem wrzuceniem. Lód ten czas pewien pozostawał już w pokoju, a więc ma temperaturę topnienia t. j. 0^0. Mieszając wciąż wodę termometrem i obserwując co jakie pół minuty, albo częściej, temperaturę, zauważcie, iż temperatura się obniża, i zanotujcie najniższą temperaturę t_1^0, otrzymaną, gdy lód się całkowicie stopi. Zważenie kalorymetru wraz z wodą po stopieniu się lodu, wobec znanej masy kalorymetru wraz z wodą przed wrzuceniem lodu, da wam masę m gr stopionego lodu. Oznaczając przez x nieznane ciepło topnienia lodu, rozumujcie jak następuje: m gr lodu, topniejąc, pochłania mx kaloryj; otrzymane z m gr lodu m gr wody, ogrzewając się dalej od 0^0 do t_1^0, pochłania mt_1 kaloryj; ciepła tego dostarcza woda w kalorymetrze wraz z kalorymetrem, a więc $(M + M')$ gr wody, oziębiającej się od t^0 do t_1^0. Zatem

$$(M + M')(t - t_1) = mx + mt_1;$$

stąd znajdziecie x, podstawiając zanotowane dane.

W tej samej tablicy na końcu książki, gdzie podane są temperatury topnienia różnych substancyj, znajdziecie też wartości ciepła topnienia niektórych. Ciepło topnienia lodu $\left(\text{prawie } 80\ \frac{\text{kal}}{\text{gr}}\right)$ jest względnie bardzo znaczne. Stopienie więc znacznych ilości lodu (śniegu) wymaga wielkich ilości ciepła; tłumaczy to nam wielki wpływ klimatyczny lodów i śniegów.

91. Parowanie. Wrzenie.

Znamy dobrze zjawisko *wysychania* cieczy — woda, rozlana na stole, wysycha; ciecze w otwartych naczyniach zmniejszają się wciąż w swej ilości; owo wysychanie cieczy jest jej parowaniem, zmianą fazy ciekłej na gazową. W art. 88 wskazaliśmy na to, że i ciała stałe parują (zjawisko sublimacji). Prawdopodobnie we wszelkiej temperaturze parują wszystkie ciała stałe i ciekłe; parowanie to zachodzi *na powierzchni ciała.*

W pewnych warunkach ciecz paruje nie tylko na powierzchni, ale i w całej swej masie: tworzą się pęcherzyki pary *wewnątrz cieczy* i wydostają się z niej ponad powierzchnię. Ten szczególny rodzaj parowania o burzliwym charakterze nazywa się *wrzeniem cieczy.*

D o ś w i a d c z e n i e 1. Mieszając termometrem wodę w zlewce, umieszczonej nad palnikiem, stwierdzamy, że temperatura wody stopniowo się podnosi, z chwilą wszakże gdy się rozpoczyna wrzenie, temperatura podczas trwania wrzenia pozostaje niezmienną. Podobnie jak w przypadku topnienia, z chwilą rozpoczęcia się wrzenia, kosztem dostarczanego dalej wodzie ciepła zachodzi nie ogrzewanie się wody do coraz wyższej temperatury, lecz tylko zmiana fazy *).

*) Czasem obserwuje się zjawisko t. zw. *przegrzania* cieczy; np. woda dystylowana lub poprostu przegotowana może być ogrzana ostrożnie do temperatury wyższej, niż temperatura wrzenia, a zjawisko wrzenia nie następuje; wystarczy jednak

Pęcherzyki pary, wydostające się podczas wrzenia cieczy z jej wnętrza ponad powierzchnię, muszą przytem, oczywiście, pokonywać ciśnienie zewnętrzne, pod którem ciecz pozostaje, a które w zwykłych warunkach jest ciśnieniem atmosferycznem. Jest rzeczą tedy jasną, iż zjawisko wrzenia zależy od ciśnienia zewnętrznego.

Doświadczenie II. Umieszczamy pod kloszem pompy powietrznej zlewkę z wodą o temperaturze pokojowej; gdy ciśnienie pod kloszem zmniejszamy dostatecznie, woda w zlewce poczyna wrzeć, mając temperaturę zaledwie kilkunastu stopni.

Doświadczenie III. Zagotowujemy wodę w kolbce i po paru minutach jej wrzenia, gdy przypuszczać już możemy, że nad powierzchnią wody w kolbie jest tylko para wodna, powietrze zaś zostało przez wydobywającą się wciąż parę wypędzone, zakorkowujemy kolbę, usuwając ją jednocześnie z ponad palnika (by się nie sparzyć, owijamy szyjkę kolby ręcznikiem lub watą). Odwracamy teraz kolbę tak, jak to przedstawione jest na rys. 182 i spostrzegamy, iż wrzenie nie ustaje, pomimo że wody dalej nie ogrzewamy; co ciekawsze, wrzenie odbywa się gwałtowniej, gdy kolbę polewamy chłodną wodą lub dotykamy jej umoczoną w zimnej wodzie watą lub ręcznikiem. Para wodna nad powierzchnią wody w kolbie skrapla się, przy oziębianiu robi się jej tam mniej, a więc ciśnienie się zmniejsza; wrzenie wody odbywa się pod tem zmniejszonem ciśnieniem w temperaturze niższej od 100^0.

Rys. 182.

Odpowiednio temperatura wrzenia wody jest wyższa pod ciśnieniem większem, niż normalne ciśnienie atmosferyczne.

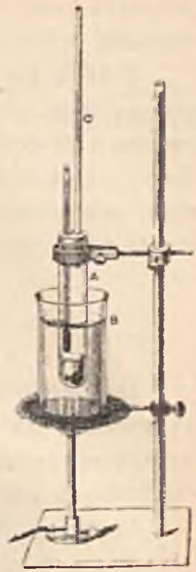
Na górach, skutkiem mniejszego ciśnienia, temperatura wrzenia wody jest niższa od 100^0. Z temperatury tej można wnosić o wysokości miejsca obserwacji ponad po-

wstrząśnienia albo wrzucenia do cieczy ciała obcego, a woda zagotowuje się gwałtownie, przyczem temperatura jej spada do wartości, normalnej dla wrzenia. Takie przegrzanie wody bywa niebezpieczne dla kotłów parowych — wielka ilość pary, tworzącej się w chwili opóźnionego a gwałtownego zagotowania się wody, może rozsadzić kocioł.

ziomem morza; na tem polega jeden ze sposobów mierzenia wysokości gór.

Wrzenie wody (podobnie innych cieczy) pod tem samem nawet ciśnieniem zachodzi w temperaturach nieco różnych w zależności od rozpuszczonych w niej substancyj (np. soli). Natomiast, jak już mówiliśmy w art. 77, temperatura pary, wydobywającej się z wody podczas wrzenia, ma wartość zupełnie określoną dla określonego ciśnienia. Dlatego właśnie przy wyznaczaniu jednego ze stałych punktów (rys. 167, str. 164) umieszczaliśmy termometr nie w wodzie, lecz ponad nią, w parze.

Zależność temperatury wrzenia od ciśnienia jest bezporównania większa, niż temperatury topnienia. Tak np. pod ciśnieniem, mierzonem słupem rtęci 525 mm, temperatura wrzenia wody wynosi tylko 90^0; pod ciśnieniem natomiast 2 atmosfer — jest już $120^0,6$.



Rys. 183.

Ćwiczenie 49. Sporządźcie przyrząd, przedstawiony na rys. 183 i znajdźcie przy jego pomocy temperaturę wrzenia alkoholu pod zwykłem ciśnieniem. Próbówkę z alkoholem umieszczacie we wrzącej wodzie. Próbówka zamknięta jest korkiem, w którym zrobione są dwa otwory; przez jeden przetknięty jest termometr, przez drugi zaś długa rurka, odprowadzająca parę alkoholu (bądźcie ostrożni z tym palnym materjałem!). Po zanurzeniu próbówki we wrzącej wodzie notujcie w równych odstępach czasu temperaturę alkoholu, zanim zacznie się wrzenie, i czas jakiś podczas trwania wrzenia. Przedstawcie wynik obserwacji zapomocą wykresu i porównajcie z wykresami, które otrzymywaliście, obserwując zjawisko topnienia.

Gdy z pod kociołka lub zlewki, w których wre woda, usuwamy palnik, wrzenie ustaje; dla podtrzymywania zatem wrzenia konieczny jest nieustanny dopływ ciepła.

W doświadczeniu wszakże z wrzeniem pod ciśnieniem zmniejszonem pod kloszem pompy nie stosowaliśmy specjalnego sposobu ogrzewania wody w zlewce. Powtarzając to samo doświadczenie, ale tym razem wstawiając do wody w zlewce termometr, przekonywamy się, iż temperatura jej podczas wrzenia obniża się — wrzenie więc odbywa się tu kosztem własnego ciepła cieczy.

Dlaczego jednak nie zachodzi to samo z wodą, wrzącą pod zwykłem ciśnieniem, gdy z pod naczynia, mieszczącego ją, usuwamy palnik? Łatwo to zrozumieć. Wrzenie kosztem ciepła własnego sprowadza obniżenie temperatury, pod danem zaś ciśnieniem, jak wiemy, wrzenie zachodzić może tylko w danej temperaturze. Pod kloszem natomiast temperatura wody wprawdzie spada, ale odpowiednio zmniejszamy wciąż ciśnienie, czyniąc możliwym proces wrzenia.

Jednak nie tylko wrzenie, lecz parowanie wogóle odbywa się kosztem ciepła, czego dowodem jest obniżanie się temperatury ciała parującego, o ile doń nie dopływają z otoczenia ilości ciepła, pokrywające te straty. Gdy rękę zwilżymy wodą, a jeszcze lepiej alkoholem lub eterem, uczuwamy chłód — parowanie cieczy odbywa się tu kosztem ciepła ręki (alkohol, a zwłaszcza eter parują prędzej, niż woda).

92. Ciepło parowania.

Ogrzewanie pod stałem ciśnieniem cieczy, posiadającej temperaturę wrzenia, jak widzieliśmy, nie wpływa wcale na zmianę jej temperatury, podtrzymuje natomiast tylko wrzenie; pochłanianie zatem przez ciecz ciepła ma tutaj jako jedyny skutek parowanie.

Stosunek ilości ciepła, pochłoniętego przez ciecz podczas jej przejścia w fazę gazową, do masy cieczy $\left(\frac{q}{m}\right)$ *nazywa się ciepłem parowania w danej temperaturze pod danem ciśnieniem.* Liczbowo ciepło parowania wskazuje, ile kaloryj pochłania 1 gr cieczy, przechodząc w parę w danej temperaturze pod danem ciśnieniem.

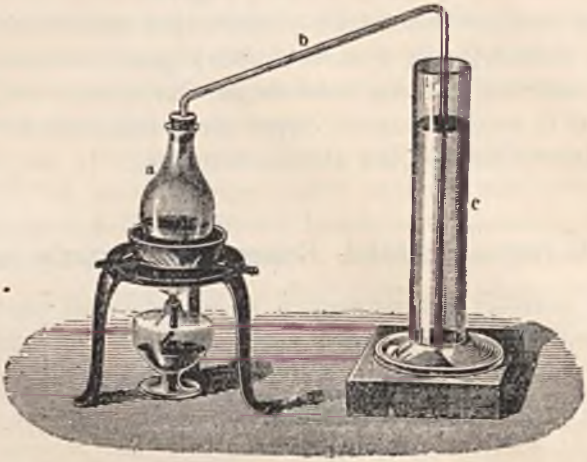
Odwrotnie, biorąc parę cieczy w danej temperaturze i pod danem ciśnieniem, np. parę wodną w 100^0 pod normalnem ciśnieniem atmosferycznem, i oziębiając ją, t. j. odbierając jej ciepło, skroplimy ją. Ilość ciepła, którą 1 gr pary oddaje, zmieniając się na 1 gr cieczy w tej samej temperaturze, jest ta sama, jaką 1 gr cieczy pochłania przy zmianie wręcz odwrotnej, którą tylko co rozpatrywaliśmy.

Ćwiczenie 50. Znajdźcie ciepło parowania wody podczas wrzenia. W tym celu sporządźcie przyrząd, przedstawiony na rys. 184. Zważcie słój pusty i napełniony wodą tak, jak na rysunku, i zanotujcie masę M wody, zawartej w słoju; albo jeszcze lepiej weźcie zamiast słoja kalorymetr o znanym równoważniku wodnym, oznaczając już przez M sumę masy wody i równoważnika kalorymetru. Zagotujcie wodę w kolbie a i czas pewien podtrzymujcie to wrzenie, by para, uchodząc przez rurkę b, ogrzała ją do temperatury, którą sama posiada, t. j. do 100^0C *). Wtedy, nie przerywając wrzenia, zanotujcie temperaturę t^0 wody w słoju c i podstawcie słój pod koniec rurki b, by z zanurzonego końca rurki para wchodziła do wody i tam się skraplała, oddając swe „ciepło parowania" (słój albo kalorymetr, jeżeli go używacie, osłońcie ekranem, nie zaznaczonym na rysunku, przed bezpośrednim działaniem palnika i kolby z wrzącą wodą). Po kilku minutach przerwijcie

---

*) Z początku zetknięcie się pary z chłodną rurką warunkuje skroplenie pary — ściany rurki szklanej mętnieją, pokrywając się kropelkami wody; potem w miarę ogrzewania rurki zmętnienie to znika.

połączenie rurki b ze słojem, wyznaczcie temperaturę t_1^0 wody w słoju, a przez ważenie słoja (kalorymetru) po doświadczeniu obliczcie, ile przybyło w nim wody, t. j., ile pary skropliło się i oziębiło do temperatury t_1^0. Przypuśćmy, że masa skroplonej pary jest m. Oznaczając nieznane ciepło parowania wody w danej temperaturze przez x, rozumujcie w następujący sposób: m gr pary w 100^0, skraplając



Rys. 184.

się na m gr wody w 100^0, oddaje mx kaloryj; m gr wody, oziębiając się od 100^0 do temperatury końcowej t_1^0, oddaje $m\,(100 - t_1)$ kaloryj; razem więc owe m gr pary, skraplając się i stygnąc następnie do t_1^0, oddaje $[mx + m\,(100 - t_1)]$ kaloryj, które to ciepło pochłania woda w słoju; ponieważ M gr wody, ogrzewając się od t^0 do t_1^0, pochłania $M\,(t_1 - t)$ kaloryj, przeto

$$mx + m\,(100 - t_1) = M\,(t_1 - t),$$

$$x = \frac{M\,(t_1 - t) - m\,(100 - t_1)}{m} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (1)$$

Po obliczeniu według tego wzoru ciepła parowania w 100^0 porównajcie otrzymany wynik z wartością, którą znajdziecie w tablicach na końcu książki, gdzie podane są również temperatury wrzenia różnych substancyj, i obliczcie popełniony błąd w %. Spróbujcie wskazać ważniejsze źródła błędu waszego pomiaru.

Dokładne badanie zjawiska wrzenia pod innemi ciśnieniami niż normalne i mierzenie odpowiednich wartości ciepła parowania prowadzi do wniosku, że ciśnieniom mniejszym, a więc niższym temperaturom parowania odpowiadają większe wartości ciepła parowania; przeciwnie, ciśnieniom większym, t. j. wyższym temperaturom parowania— wartości mniejsze (p. tablice). Tak np. ciepło parowania wody w 100^0 jest 539 $\frac{\text{kal}}{\text{gr}}$, w temperaturze 20^0 więcej, gdyż 585 $\frac{\text{kal}}{\text{gr}}$, w 200^0 już mniej — tylko 468 $\frac{kal}{gr}$; a w *365° ciepło to równa się zeru.* Do tego szczególnego faktu wrócimy jeszcze w następnym rozdziale.

Przyglądając się tablicy ciepła parowania różnych substancyj, nie możemy nie zwrócić uwagi na wysoką względnie wartość ciepła parowania wody; na tej własności wody oparte jest ogrzewanie parowe — para wodna, skraplając się w rurach, oddaje przez ściany tych rur otaczającemu powietrzu znaczne ilości ciepła. Czy istotnie nie jest dla nas znakomite, że tę wysoką wartość ciepła parowania posiada właśnie ciało, tak rozpowszechnione i tak dla nas dostępne.

93. Ciepło rozpuszczalności. Krzepnięcie i wrzenie roztworów.

Mówiąc w części II o roztworach, zwracaliśmy już wtedy uwagę na zależność tworzenia się roztworu nasyconego od temperatury. Teraz należy podkreślić wyraźniej zachodzące w roztworach procesy cieplne.

Gdy rozważamy zjawiska rozpuszczania się ciała stałego w cieczy, nietrudno jest dostrzec pewne podobieństwo tego procesu do topnienia — wszak i tu, podobnie jak przy topnieniu, tworzy się nowa faza, w której ciało stałe jako takie znika, a powstaje ciecz o pewnych nowych własnościach. Podobieństwo jest tem większe, iż tworzeniu się roztworu towarzyszy zawsze pochłanianie ciepła.

Ćwiczenie 51. Wrzućcie do naczynia z wodą (do kalorymetru) soli kuchennej tyle, by się wytworzył roztwór nasycony. Zaobserwujcie obniżenie się temperatury, towarzyszące tworzeniu się roztworu. Powtórzcie to samo ćwiczenie, biorąc zamiast soli kuchennej azotan amonowy (w stosunku 60 części azotanu na 100 części wody).

W pierwszem z tych ćwiczeń obserwujecie obniżenie się temperatury ok. 2°, w drugiem ok. 30°. Ciekawe te fakty wskazują zarazem na różnicę między rozpuszczaniem się a topnieniem — topnienie odbywa się zawsze w określonej temperaturze kosztem ciepła, doprowadzonego z zewnątrz (gdyby zachodziło kosztem ciepła własnego, temperatura spadałaby, a zatem znikałby niezbędny warunek zachodzenia zjawiska), natomiast rozpuszczanie się może zachodzić w różnych temperaturach, a więc i kosztem ciepła własnego ciał, tworzących roztwór (stąd właśnie obniżanie się temperatury). Oczywiście, straty te możemy pokryć, dostarczając tym ciałom ciepła, a przez to zapobiegając obniżaniu się temperatury; w związku z tem stoi fakt, że wyższym temperaturom odpowiada większa zawartość ciała rozpuszczonego w roztworze nasyconym.

Są wprawdzie wypadki, gdy tworzeniu się roztworu towarzyszy nie obniżanie się, lecz podnoszenie się temperatury — ciepło się wywiązuje, a nie pochłania; za przykład może służyć pozorne rozpuszczanie się cynku w kwasie siarkowym. W tych jednak razach zachodzą pewne *zmiany chemiczne,* warunkujące owo wywiązywanie się ciepła. Gdy przez ogrzewanie odparujemy roztwór wodny soli kuchennej, z roztworu wykrystalizuje się sól; gdy natomiast ogrzewać będziemy kwas siarkowy, w którym się pozornie rozpuścił cynk, nie otrzymamy już cynku, a wykrystalizuje się siarczan cynkowy.

Podobnie jak wyżej wprowadziliśmy pojęcie ciepła topnienia i ciepła parowania, tak samo tu wprowadzić możemy analogiczne pojęcie *ciepła rozpuszczalności* — liczbowo będzie ono wyrażało, ile kaloryj zostaje pochłonięte przy rozpuszczaniu się 1 gr danego ciała w danej temperaturze (musi być ona podtrzymywana przez ogrzewanie!) w określonej ilości rozpuszczalnika. Wartość ciepła rozpuszczalności dla jednej i tej samej substancji jest zależna od rodzaju rozpuszczalnika, od jego ilości, a także od temperatury. Można przewidzieć, co potwierdza doświadczenie, iż ciepło to jest tem większe, im bardziej rozcieńczony otrzymujemy roztwór — wszak coraz większe rozcieńczanie jest wciąż dalej trwającem rozpuszczaniem się, a więc pochłania się przytem coraz więcej ciepła.

Ponieważ, im wyższa jest temperatura, w której tworzy się roztwór nasycony, tem więcej roztwór ten zawiera substancji rozpuszczonej, przeto, jeżeli taki roztwór nasycony oziębiamy, wydziela się z niego substancja rozpuszczona i odpowiednio zmniejsza się zawartość jej w roztworze. To wydzielanie się czasem się opóźnia — powstaje roztwór *przesycony* dla danej temperatury; wszakże wystarczy wrzucenie najdrobniejszej bryłki danej substancji do takiego przesyconego roztworu, a nadmiar jej wydzieli się natychmiast, przyczem temperatura roztworu się podniesie (por. art. 89, str. 192, gdzie mowa była o cieczy przechłodzonej).

Jeżeli jednak oziębiać będziemy roztwór bardzo rozcieńczony, spowoduje to wydzielanie się nie substancji rozpuszczonej, lecz czystego rozpuszczalnika. Np. gdy zamarza roztwór wodny soli kuchennej (woda morska), wydziela się czysty lód. Temperatura krzepnięcia roztworów jest zawsze niższa od temperatury krzepnięcia czystego rozpuszczalnika, przytem to obniżenie jest tem większe, im bardziej jest roztwór stężony. W ten sposób, jeżeli zaczniemy oziębiać daną ilość jakiegoś roztworu rozcieńczonego i rozpocznie się krzepnięcie, nie będzie ono przebiegało w stałej temperaturze — w miarę wydzielania się zestalonego rozpuszczalnika roztwór stawać się będzie coraz bardziej stężony, dążąc do stanu nasycenia, a więc coraz niższa będzie jego temperatura krzepnięcia.

Ponieważ z drugiej strony, jak już wiemy, w coraz niższych temperaturach potrzeba coraz mniejszych ilości rozpuszczonej substancji dla otrzymania roztworu nasyconego, oziębianiu zaś roztworu nasyconego towarzyszy wydzielanie się rozpuszczonej substancji, przeto przewidywać możemy, iż w pewnej, dostatecznie niskiej temperaturze dalsze oziębianie roztworu powodować będzie zarówno wydzielanie się z roztworu rozpuszczalnika, jak rozpuszczonej substancji — tu już dalej stężenie nie będzie ulegało zmianie, a więc i temperatura krzepnięcia będzie stała.

Roztwór takiego stężenia, posiadający stałą temperaturę krzepnięcia, nazywa się roztworem *eutektycznym*. Temperatura ta jest, oczywiście, najniższa, w jakiej roztwór danej substancji w danym rozpuszczalniku może istnieć jako ciecz. Dla wodnego roztworu soli kuchennej temperatura ta jest prawie — 22° C.

Temperatura wrzenia roztworów jest pod tem samem ciśnieniem inna, niż czystego rozpuszczalnika. Podobnie jak w stosunku do stężenia temperatura krzepnięcia obniża się, tak temperatura wrzenia się podnosi. Np. temperatura wrzenia wodnego roztworu nasyconego soli kuchennej wynosi pod normalnem ciśnieniem 180° C.

Na tych faktach opiera się między innemi przygotowywanie *mieszanin mrożących*, któremiśmy się wyżej posługiwali. Gdy mieszamy tłuczony lód z solą, lód się topi, a zarazem stwierdzamy znaczne obniżenie się temperatury mieszaniny — to właśnie tworzy się roztwór wodny soli kuchennej (o niższej temperaturze krzepnięcia) kosztem własnego ciepła mieszanych tu ciał. Z poprzedniego wynika, iż tą drogą nie można otrzymać temperatury niższej od temperatury krzepnięcia roztworu eutektycznego, t. j. niższej od — 22°.

Zadania.

107. Ile gr pary wodnej w 100° wprowadzić należy do 16 Kg wody w 0°, w której pływa kawał lodu o masie 4 Kg, by układ cały doprowadzić do temperatury 30°?

108. Ile kaloryj potrzeba, by 100 gr wody w 15° ogrzać do temperatury wrzenia i, podtrzymując wrzenie, całkowicie zmienić na parę?

109. Rozwiązać poprzednie zadanie, zakładając, iż dane jest nie 100 gr wody, lecz 100 gr alkoholu.

110. Wytłumaczyć, dlaczego termometr wykazuje natychmiast znaczne obniżenie się temperatury, gdy kuleczkę jego zwilżymy eterem; natomiast nie obserwu-

jemy takiego zjawiska, zanurzając termometr w większej ilości eteru, którym zwilżaliśmy uprzednio kuleczkę.

111. Do 100 gr wody w 14^0 wprowadzamy parę wrzącego alkoholu (schemat jak na rysunku 184), skutkiem czego temperatura otrzymanego roztworu alkoholu staje się 23^0. Iluprocentowy roztwór zostaje w ten sposób otrzymany?

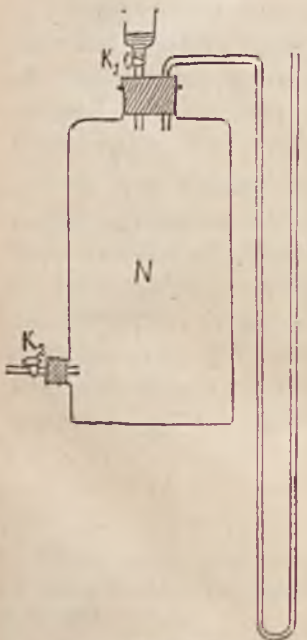
112. Ile kaloryj potrzeba, by zmienić 10 gr lodu w -10^0 na parę w 140^0 (ciepło wł. pary pod stałem ciśnieniem $= 0{,}46 \frac{\text{kal}}{\text{gr}}$)?

113. 500 gr ołowiu, stopionego w temperaturze 327^0, wlano do śniegu w 0^0. Znaleźć ilość stopionego śniegu (ciepło topnienia ołowiu $= 5{,}6 \frac{\text{kal}}{\text{gr}}$, ciepło właściwe ołowiu $= 0{,}032 \frac{\text{kal}}{\text{gr}}$).

Rozdział V. O własnościach par.

94. Para nienasycona i nasycona.

D o ś w i a d c z e n i e. Zbiornik szklany N (rys. 185) zaopatrzony jest u góry w otwór z lejkiem; ciecz, mieszczącą się w lejku, wpuszczać można do zbiornika, otwierając kurek K_1; przez rurkę, również zaopatrzoną w kurek K_2, łączyć można zbiornik z pompą powietrzną; połączony ze zbiornikiem manometr rtęciowy M pozwala mierzyć panujące w zbiorniku ciśnienie.



Rys. 185.

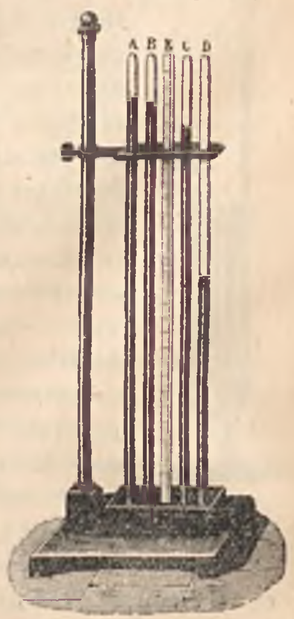
Wypompowujemy powietrze ze zbiornika N, podczas gdy kurek K_1 jest zamknięty. Doprowadzamy ciśnienie w zbiorniku do wartości, mierzonej słupem rtęci paru mm ($b—h$, jeżeli b oznacza wysokość słupa barometrycznego, h zaś — różnicę poziomów rtęci w M). Zamykamy teraz kurek K_2, a otwierając ostrożnie na bardzo krótko K_1, wpuszczamy z lejka do zbiornika N parę kropel mieszczącego się w lejku eteru. Wpuszczona ciecz natychmiast znika dla naszego oka — zmienia się na parę, a obniżenie się słupka rtęci w lewem ramieniu manometru z towarzyszącem temu wzniesieniem rtęci w prawem pozwala nam wyznaczyć prężność pary eteru w zbiorniku N. Ponownie otwieramy na chwilę kurek K_1 i wpuszczamy znowu parę kropel eteru; i znowu wpuszczony do zbiornika eter natychmiast wyparowuje, a nowe przesunięcie się rtęci w manometrze pozwala nam ocenić zwiększoną wartość ciśnienia pary eteru. Gdy w ten sposób postępujemy dalej, przekonywamy się, iż po dojściu prężności pary eteru do jakichś 400 mm (zależy to, jak dalej zobaczymy, od temperatury) dalsze wpuszczanie eteru przez kurek K_1 nie powoduje już zwiększania się ciśnienia; zarazem wpuszczany teraz eter nie ulatnia się, jak to się działo z jego pierwszemi porcjami, lecz zbiera się na dnie zbiornika, tworząc ciekłą warstwę.

Podobne doświadczenie z alkoholem, wodą i t. p. w takiej samej temperaturze pokojowej daje ten sam wynik z jego strony jakościowej, ilościowo zaś różniący się tem, że owa największa wartość prężności pary jest znacznie mniejsza niż dla eteru (dla alkoholu około 40 mm, dla wody około 15 mm).

Z doświadczeń tych wynika, iż w danej ograniczonej przestrzeni w danej temperaturze nie mogą się mieścić dowolne ilości pary tej czy innej cieczy; że tworzeniu się nowych ilości pary kładzie się kres, gdy prężność pary dochodzi do określonej dla każdej cieczy wartości. Gdy kres ten jest osiągnięty, powiadamy, że para jest *nasycona*; gdy natomiast ciśnienie pary nie dosięga jeszcze owej granicznej wartości, a więc gdy jeszcze możliwe jest tworzenie się nowej ilości pary, a przez to wzrost jej ciśnienia, parę nazywamy *nienasyconą*.

95. Prężność pary nasyconej; zależność tej prężności od temperatury.

D o ś w i a d c z e n i e I. Przygotowujemy i napełniamy rtęcią kilka rurek barometrycznych A, B, C, D (rys. 186); we wszystkich słupy rtęci są jednakowej wysokości, w każdej zaś nad powierzchnią rtęci znajduje się para rtęci. Wprowadzamy do rurki B z pod spodu przy pomocy pipetki trochę wody tak, by woda ta wypłynęła na powierzchnię rtęci w rurce; słup rtęci natychmiast się obniża o jakie 1,5 cm. Woda po przedostaniu się do owej „próżni Torricelli'ego" paruje dopóty, dopóki się nie otrzyma para nasycona. Dlatego wprowadzamy nieco więcej wody, by pozostała na powierzchni rtęci warstewka wody obecnością swą świadczyła, że para ponad nią jest nasycona (gdyby wprowadzona do rurki woda całkowicie wyparowała, nie moglibyśmy powiedzieć, czy para jest *już* nasycona, czy też nie). Paromilimetrowa warstewka wody ciężarem swym nie może, oczywiście, spowodować tak znaczne-



Rys. 186.

go obniżenia się rtęci w rurce B (niech czytelnik przypomni sobie, jaka jest gęstość rtęci i jakiemu to słupowi rtęci równoważny jest dany słupek wody); obniżenie się poziomu rtęci w rurce B wskazuje, jaka jest wartość *prężności pary nasyconej* wody.

Podobnie, wprowadzamy do rurki C alkohol, do D eter, w dostatecznych ilościach, by po utworzeniu się pary nasyconej pozostawały na powierzchni rtęci warstewki tych cieczy; rtęć w rurkach opada (w C ok. 4 cm, w D ok. 40 cm) i w ten sposób znajdujemy, czemu się równa prężność pary nasyconej alkoholu, eteru w danej temperaturze.

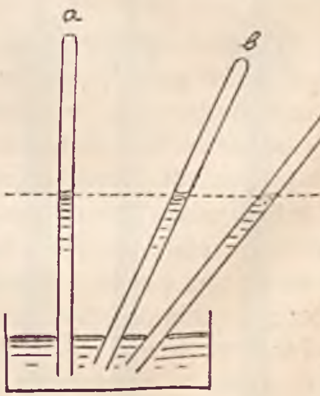
Rys. 187.

D o ś w i a d c z e n i e II. W celu zaobserwowania, czy i w jakiej mierze prężność pary nasyconej zależy od temperatury, używamy przyrządu, przedstawionego na rysunku 187. Ma on kształt barometru lewarowego — w szerszem ramieniu z prawej strony mamy na powierzchni rtęci warstewkę wody, w lewem wysokiem ramieniu nad powierzchnią rtęci mamy t. zw. próżnię Torricelli'ego; oba ramiona są zalutowane. Prawe ramię jest otoczone szerszą rurą, przez którą przepuszczamy parę wrzącej wody, otrzymując w ten sposób w danem ramieniu parę nasyconą wody w coraz wyższej temperaturze. Okazuje się, iż przy coraz wyższej temperaturze pary w prawem ramieniu przyrządu słup rtęci się obniża, natomiast słup rtęci w lewem ramieniu się podnosi, prężność więc pary nasyconej staje się większa — tworzy się więcej pary, mniej zaś pozostaje substancji w fazie ciekłej w prawem ramieniu. Wreszcie stwierdzamy, iż rtęć w lewem ramieniu przestaje się podnosić; odpowiada to najwyższej temperaturze 100°, do której podnieść możemy wodę w prawem ramieniu przyrządu. Mierząc wysokość tego słupa, przekonywamy się, iż równa się ona wysokości słupa barometrycznego, a ponieważ 100° jest temperaturą wrzenia wody, wyciągamy stąd wniosek, który jest słuszny dla wszelkich innych cieczy, że *prężność pary nasyconej w temperaturze wrzenia równa się ciśnieniu, pod którem pozostaje ciecz wrząca.* Zwracaliśmy już uwagę na zależność temperatury wrzenia od ciśnienia w art. 77. Na końcu książki mieści się tablica, gdzie są podane dla kilku cieczy wartości prężności pary nasyconej w różnych temperaturach. I tak widzimy, że dla wody w 100°, dla eteru w 34°,9, dla alkoholu w 78°,3, t. j. dla wszystkich tych cieczy w temperaturach, które są temperaturami ich wrzenia pod *normalnem* ciśnieniem, prężność pary nasyconej równa się 760 mm, t. j. równa się normalnemu ciśnieniu atmosferycznemu.

Teraz zrozumiałą się staje ta znaczna wartość prężności pary nasyconej eteru, w porównaniu z prężnością pary nasyconej wody lub alkoholu, która uderzyć nas musiała podczas ostatnich doświadczeń. W temperaturze pokojowej eter jest bez porównania bliżej swej temperatury wrzenia (34°,9), niż alkohol (78°,3) lub woda (100°).

96. Prężność pary nasyconej danej substancji zależy tylko od temperatury.

D o ś w i a d c z e n i e. Wprowadzamy do rurki barometrycznej sposobem wyżej podanym taką ilość eteru, by, po utworzeniu się jego pary i znanem już nam obniżeniu się słupka rtęci, pozostała na powierzchni rtęci warstewka ciekłego eteru. Mamy więc w rurce parę nasyconą eteru. Jeżeli rurkę z położenia pionowego *a* (rys. 188) przechylamy w położenie *b* lub *c*, rtęć w rurce przesuwa się tak, że objętość pary się zmniejsza, wszakże wysokość poziomu rtęci w rurce względem poziomu rtęci w naczyniu pozostaje bez zmiany, co świadczy, że ciśnienie pary nie ulega przy tem zmianie. Spostrzegamy zarazem, że, im mniejsza jest objętość pary, tem grubsza jest warstewka ciekłego eteru na powierzchni rtęci. Podniesienie rurki do położenia pionowego *a* sprowadza objętość pary i grubość warstewki ciekłej do wartości pierwotnej.



Rys. 188.

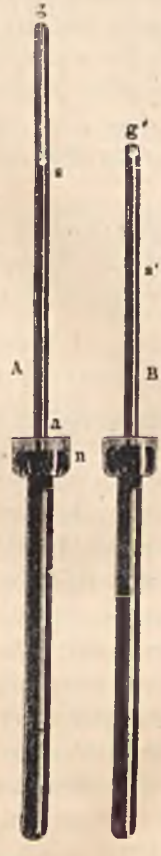
Procesy, które zachodzą w niezmiennej temperaturze, nazywamy *izotermicznemi.* Ponieważ w naszem doświadczeniu temperatura pary nie ulega zmianie, przeto wynik jego możemy wyrazić w ten sposób, iż izotermiczne zmniejszanie objętości pary nasyconej ma jako jedyny skutek skraplanie się tej pary — ciśnienie zmniejszonej ilości pary w zmniejszonej objętości pozostaje bez zmiany; przeciwnie izotermiczne zwiększanie tej objętości przy zasobie tej samej substancji w fazie ciekłej ma za skutek przejście pewnej ilości cieczy w fazę gazową, przyczem znowu większa ilość pary w większej objętości wywiera takie samo ciśnienie, jakie para wywierała przedtem. Prężność więc pary nasyconej danej substancji w danej temperaturze jest wielkością zupełnie określoną, zależną tylko od temperatury (nie od objętości!).

97. Prężność pary nienasyconej zależy od jej objętości.

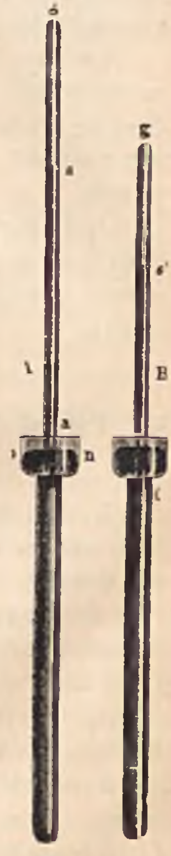
Doświadczenie. Wstawiamy rurkę barometryczną nie do płytkiego naczynia z rtęcią, jak to uczyniliśmy wyżej, lecz do wysokiego naczynia walcowego z rtęcią, w którem daje się zanurzać dowolnie głęboko (rys. 189). Wprowadzamy do rurki zapomocą pipety, jak uprzednio, parę kropel eteru. Rtęć w rurce opada, wskazując obniżeniem się w stosunku do wysokości słupa barometrycznego wartość prężności pary eteru w rurce. Wpuściliśmy tyle cieczy, że na powierzchni rtęci daje się widzieć warstewka ciekłego eteru; mamy więc pewność, iż para jest nasycona. Zanurzajmy rurkę w zewnętrznem naczyniu coraz głębiej; słupek ciekłego eteru na powierzchni rtęci staje się coraz większy — para się skrapla; wszakże wysokość słupa rtęci w rurce (oczywiście, w stosunku do poziomu rtęci w naczyniu zewnętrznem) nie ulega przytem zmianie — prężność pary eteru pozostaje niezmienna (rys. 189*b*). Podnośmy teraz stopniowo rurkę do góry; słupek eteru ciekłego maleje — coraz więcej pary się tworzy, wypełniając większą objętość rurki; ale znowu słup rtęci w rurce pozostaje ten sam — prężność pary pozostaje ta sama.

Wszystko zachodzi tu w sposób już nam znany, ale tylko dopóty, dopóki przy podnoszeniu rurki barometrycznej na powierzchni rtęci w rurce dostrzegamy warstewkę cieczy. Lecz oto ślady tej warstewki przy odpowiedniem podniesieniu rurki znikają; słupek rtęci wciąż pozostaje jeszcze tej samej wysokości — eter wyparował całkowicie, mamy jednak wciąż jeszcze jego parę nasyconą. Podnośmy wszakże rurkę w dalszym ciągu do góry. Objętość, zajmowana przez parę, wzrasta, ale niema już cieczy, z której mogłyby się tworzyć nowe ilości pary; to też para przestaje być nasyconą, a jednocześnie widzimy, iż słupek rtęci w rurce wznosi się ku górze w miarę wysuwania rurki. Świadczy to, iż w miarę zwiększania objętości pary nienasyconej, prężność jej maleje i z wysokości słupa rtęci w rurce oraz ciśnienia barometrycznego łatwo wnosić możemy o wartości tej zmiany. Rys. 189c przedstawia nam właśnie doświadczenie w tym przypadku, gdy para eteru w rurce jest nienasycona. Gdy zaczynamy rurkę znów obniżać, wsuwając ją coraz głębiej do szerszego naczynia z rtęcią, słupek rtęci w rurce poczyna się obniżać, co świadczy o wzroście prężności pary nienasyconej w miarę zmniejszania się jej objętości, aż wreszcie otrzymujemy pierwotną wysokość słupka rtęci, w chwili gdy doprowadzamy parę do tej objętości, w której staje się nasycona. Poczynając od tego momentu, przy dalszem obniżaniu rurki wysokość słupka rtęci nie ulega zmianie, tylko na powierzchni rtęci w rurce tworzy się coraz więk-

Rys. 189 a.



Rys. 189 b.



Rys. 189 c.

sza warstewka cieczy. Podkreślmy, iż dokonywamy doświadczenia w pewnej stałej temperaturze. W każdej innej temperaturze przebieg zjawiska będzie jakościowo ten sam, ilościowo jednak inny.

Należy zauważyć, iż, rozpoczynając doświadczenie, wpuścić należy do rurki niezbyt wielką ilość cieczy, inaczej bowiem nawet przy całkowitem niemal wysunięciu rurki z naczynia szerszego mieć będziemy parę nasyconą. Z drugiej strony, jeżeli nam chodzi wyłącznie o badanie pary nienasyconej, wpuścić możemy odrazu odpowiednio małą ilość cieczy. W szczegółach tych łatwo się podczas doświadczenia orjentować.

A więc, o ile zmiana objętości pary nienasyconej nie czyni jeszcze z niej pary nasyconej w danej temperaturze (nastąpić to, oczywiście, może tylko przy zmniejszaniu objętości), to te zmiany izotermiczne objętości wywołują zmiany prężności w ten sposób, że przy zmniejszeniu objętości prężność wzrasta, przy zwiększeniu zaś — maleje.

Badania dokładne wykazują, że im dalej para się znajduje od stanu nasycenia, tem bliżej zmiany izotermiczne jej objętości i prężności dają się wyrazić przez wzór Boyle Mariotte'a, t. j. tem bliżej zależność prężności od objętości daje się traktować jako odwrotna proporcjonalność.

Jeżeli gazy, jak powietrze, wodór, tlen, dość blisko, jak widzieliśmy, stosują się do prawa Boyle Mariotte'a, nasuwa to nam myśl, że i one są parami pewnych substancyj, przytem parami, dalekiemi od stanu nasycenia.

98. Para może się skraplać nieinaczej, jak przechodząc przez stan nasycenia.

Z tego, czegośmy się dowiedzieli w ostatnich artykułach, wyciągamy ważny wniosek, że przejście jakiejkolwiek substancji z fazy gazowej w ciekłą nie może się odbyć z pominięciem stanu nasycenia. Tylko para nasycona daje się skroplić, czy to przez zniżenie temperatury, czy też zmniejszenie objętości; gdy natomiast chodzi o skroplenie substancji, danej nam w postaci pary nienasyconej, musimy z niej wpierw przez oziębianie lub zmniejszanie jej objętości uczynić parę nasyconą, a wtedy dopiero nastąpić może skroplenie.

Przypuśćmy, iż w rurce barometrycznej, jak wyżej, mamy parę nasyconą — na powierzchni rtęci mieści się warstewka cieczy. Jeżeli z położenia pionowego *a*, jak na rys. 188, przechylamy rurkę do położenia *b*, ilość cieczy w rurce wzrasta, jak wiemy, t. j. izotermiczne zmniejszenie objętości pary powoduje jej częściowe skroplenie. Możemy jednak otrzymać skroplenie danej pary nasyconej inaczej, a mianowicie przez oziębienie jej. Jeżeli rurkę w jej położeniu pionowem *a* otoczymy szerszą rurą i, stosując odpowiednią kąpiel, obniżymy temperaturę pary, spostrzeżemy, iż rtęć w rurce się wzniesie, na powierzchni zaś rtęci warstewka cieczy stanie się grubszą: to część pary się skropli, a ciśnienie jej spadnie do wartości, odpowiadającej tej niższej temperaturze.

Jeżeli dana jest nam para nienasycona, możemy z niej uczynić parę nasyconą, czy to zmniejszając jej objętość, czy też zniżając jej temperaturę; skraplać się wszakże będzie tylko para już *nasycona.*

Powstaje pytanie, czy z pary nienasyconej można zawsze jednym albo drugim sposobem, t. j. przez zmniejszenie jej objętości lub obniżenie temperatury otrzymać parę nasyconą. Rozstrzygnięcie tego pytania jest bardzo ważne, tą drogą bowiem wyjaśniamy gruntownie kwestję skraplania par wogóle. Pożądaną odpowiedź znajdziemy, poznając, czem jest t. zw. *temperatura krytyczna.*

99. Temperatura krytyczna.

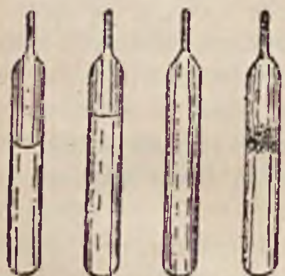
Znamy już zależność między temperaturą wrzenia cieczy a tem ciśnieniem zewnętrznem, pod którem ciecz pozostaje (p. art. 91 i 95). Wiemy więc, że, jeżeli doprowadzamy ciecz do temperatury, w której poczyna ona wrzeć pod danem ciśnieniem, i zwiększamy to ciśnienie, to wrzenie ustaje; chcąc, by wrzenie się odbywało pod tem zwiększonem ciśnieniem, musielibyśmy ogrzać ciecz do temperatury odpowiednio wyższej; o ilebyśmy znowu zwiększyli ciśnienie na ciecz w tej wyższej temperaturze, znów powstrzymalibyśmy proces wrzenia, a dla otrzymania go musielibyśmy ogrzać ciecz do jeszcze wyższej temperatury i t. d. Zamiast takich zmian kolejnych temperatury i ciśnienia, odbywających się, że tak powiemy, *skokami,* możemy otrzymać podobny proces o nieprzerwanym charakterze, ogrzewając ciecz w naczyniu zamkniętem: podnosimy tu temperaturę cieczy, zwiększająca się zaś skutkiem parowania ilość jej pary nad powierzchnią cieczy daje rosnące wciąż ciśnienie na jej powierzchnię.

Z wielu względów zależy na rozstrzygnięciu pytania, czy jesteśmy w stanie powstrzymać w ten sposób proces wrzenia cieczy w każdej temperaturze, stosując tylko odpowiednio wielkie ciśnienie, a właściwie chodzi nam o odpowiedź na pytanie, czy wogóle substancję można utrzymać w jej fazie ciekłej we wszelkiej temperaturze, stosując tylko odpowiednio wielkie ciśnienie. Rzecz rozstrzyga następujące zarówno proste, jak piękne doświadczenie.

D o ś w i a d c z e n i e. Rurkę szklaną 7—8 cm długości i około 1 cm średnicy o grubości ścian $1^1/_2$—2 mm wypełniamy częściowo eterem, a po zagotowaniu eteru i wypędzeniu przez jego parę powietrza z rurki lutujemy ją tak, by nad powierzchnią eteru w rurce pozostawała tylko para eteru. Rurkę tę zanurzamy na imadle drucianem albo wprost na sznurku w dość szerokiej próbówce (rys. 190), zawierającej olej waselinowy. Ogrzewając ostrożnie olej, ogrzewamy przez to stopniowo eter w zamkniętem naczyniu, poddając w ten sposób ciecz w rurce rosnącemu wciąż ciśnieniu jej pary nasyconej. Obserwować to, co się dzieje w rurce, możemy albo bezpośrednio, albo rzucając przy pomocy latarni obraz rurki na ekran, co przedstawia tę wygodę, 1° że obserwacji dokonywać może naraz większa liczba osób, 2° że przez osłonięcie próbówki blaszaną zasłoną z wąskiemi, niezbędnemi dla przejścia światła okienkami i przez obserwację zjawiska z większej odległości nie narażamy się na skutki ewentualnego pęknięcia rurki, które nastąpić może przy zbytnim wzroście ciśnienia wewnątrz rurki, jeżeli rurka nie jest dość mocna.


Rys. 190.

To, co kolejno dostrzegamy, daje się opisać, jak następuje. Z początku w temperaturze pokojowej wyraźnie się zarysowuje wklęsła powierzchnia eteru, oddzielająca ciecz od jej pary — różnica cieczy i pary pod względem optycznym warunkuje, iż ciecz zaznacza się na ekranie szeroką, para zaś wąską smugą świetlną (rys. 191 *a*) W miarę jak temperatura wzrasta, powierzchnia cieczy podnosi się w rurce — ciecz się rozszerza; zarazem powierzchnia staje się coraz bardziej płaską (o czem to świadczy?); smuga świetlna, którą nam daje ciecz na ekranie, robi się węższa, smuga zaś pary — szersza (rys. 191 *b*). Przy rozszerzaniu się cieczy skutkiem ogrzewania następuje zmniejszenie się jej gęstości; przeciwnie, gęstość pary skutkiem zwiększania się jej ilości nad powierzchnią cieczy staje się większa; fazy ciekła i gazowa stopniowo jakgdyby się zbliżają ku sobie własnościami, co między innemi objawia się w zmniejszaniu się różnicy ich własności optycznych (coraz mniejsza różnica w szerokości smug, dawanych na ekranie przez ciecz i parę). Wreszcie przy dalszem ogrzewaniu osiągamy temperaturę, w której różnica między fazą ciekłą a gazową danej substancji znika zupełnie — znika charakterystyczna swobodna powierzchnia cieczy i rurka cała przedstawia się jako wypełniona jednolitą substancją (rys. 191 *c*). Przed nastąpieniem tego momentu dostrzegamy w pobliżu istniejącej jeszcze powierzchni cieczy wyraźne objawy wrzenia. Dochodzimy więc do pewnej temperatury (notując podczas doświadczenia temperaturę oleju, wyznaczamy tę charakterystyczną jej wartość), w której, nie zważając na to, iż ciśnienie pary, nagromadzonej stopniowo w rurce, musi być



Rys. 191.

bardzo znaczne, ciśnieniem tem nie możemy utrzymać pozostałej części substancji w jej fazie ciekłej. Jak wypada nazwać to, co teraz mamy w rurce: parą czy cieczą? użyć możemy jednej i drugiej nazwy, przy danych bowiem warunkach następuje wyrównanie własności cieczy i pary; powyżej znalezionej tu temperatury różnica faz ciekłej i gazowej nie istnieje wcale, zatem obie nazwy są tu na miejscu. W większości wszakże wypadków tę swoistą fazę substancji nazywają fazą gazową, albo parą, a to z powodu, że nie cechuje jej charakterystyczna dla fazy ciekłej *powierzchnia swobodna.*

Wróćmy jednak do doświadczenia. Potem jak nastąpiło owo zrównanie się faz ciekłej i gazowej, chwilę jeszcze trzymamy palnik pod próbówką, by temperatura kąpieli jeszcze się cokolwiek podniosła, a następnie palnik usuwamy i obserwujemy, co następuje podczas stygnięcia kąpieli. I oto w pewnym momencie, który, jak możemy się przekonać, odpowiada tej samej charakterystycznej temperaturze, na jasnej smudze obrazu naszej rurki zjawia się gęsty kłębiący się obłok (rys. 191 *d*), który stopniowo się rozprasza, i oczom naszym ukazuje się znów płaska swobodna powierzchnia cieczy, zarysowującej się na ekranie jako smuga cokolwiek szersza od smugi nad tą powierzchnią, dawanej przez parę. W miarę obniżania się temperatury smugi te świetlne coraz bardziej różnią się szerokością; poziom cieczy wciąż się obniża i staje się stopniowo wklęsły — słowem, w porządku odwrotnym powraca wszystko do tego stanu, jaki mieliśmy na początku doświadczenia (najpierw rys. *b*, potem rys. *a*).

Można się przekonać, że dla każdej cieczy istnieje taka charakterystyczna temperatura, w której znika różnica między fazami ciekłą i gazową, t. j. *powyżej której dana substancja nie może istnieć w tych dwu fazach, występuje zaś w jednej tylko swoistej.*

Ta właśnie *temperatura charakterystyczna, w której znika różnica faz ciekłej i gazowej danej substancji, nazywa się temperaturą krytyczną tej substancji.*

Jasne jest, na co zresztą zwracaliśmy już uwagę, iż ciśnienie, pod którem pozostaje ciecz w rurce w tego rodzaju doświadczeniach (prężność pary nasyconej), rośnie wraz z temperaturą i przy jej wartości krytycznej dosięga pewnej charakterystycznej wielkości; jest to t. zw. *ciśnienie krytyczne.* Przedstawia ono graniczną wartość ciśnienia, któremu poddać należy substancję tuż poniżej temperatury jej krytycznej, by utrzymać ją w fazie ciekłej. Inaczej, jest to graniczna wartość prężności pary nasyconej dla temperatury, powyżej której dana substancja już jako para nasycona istnieć nie może.

Dokładne pomiary dają dla eteru na wartość temperatury krytycznej + 193°,8, na wartość zaś ciśnienia krytycznego 35,6 atmosfer (dla innych ciał czytelnik znajdzie odpowiednie wartości w tablicach).

A więc w powyższem doświadczeniu w chwili, gdy eter dosięga temperatury krytycznej 193°,8, panuje w rurce ciśnienie ok. 36 atmosfer; przy dalszem ogrzewaniu ciśnienie to jeszcze wzrasta; dlatego zwracaliśmy uwagę na konieczność zachowania pewnych ostrożności podczas doświadczenia.

Teraz powinny być zrozumiałe także zmiany, którym ulega wartość ciepła parowania cieczy wraz ze zmianami temperatury, o czem mówiliśmy w art. 92. Im temperatura jest wyższa, tem mniej różnią się fazy ciekła i gazowa danej substancji; w temperaturze krytycznej różnica ta znikła zupełnie. W temperaturze więc krytycznej niema już właściwie mowy o parowaniu, zatem ciepło parowania ma wartość *zero*; dla temperatur niższych ciepło parowania jest tem większe, im niżej temperatura ta leży względem temperatury krytycznej.

100. Niezbędny warunek dla otrzymania fazy ciekłej. Skraplanie gazów.

Widzieliśmy wyżej, że przez izotermiczne zmniejszanie objętości pary nasyconej osiągamy jej skraplanie. Im wyższa jest temperatura, tem większa jest prężność pary nasyconej, tem większego potrzeba ciśnienia zewnętrznego, by spowodować zmniejszenie się objętości pary, a co za tem idzie — skroplenie. Dla skroplenia pary nasyconej wody w temperaturze 20°C wystarczy stosować ciśnienie równe mniej więcej $^1/_{40}$ ciśnienia atmosferycznego; dla otrzymania tego samego w 100°C należy już użyć ciśnienia 1 atmosfery; w temperaturach wyższych potrzebne jest ciśnienie jeszcze większe, a gdy dochodzimy do temperatury krytycznej wody (365°), ciśnienie niezbędne przekracza wartość 200 atmosfer.

Powyżej temperatury krytycznej nie może być mowy o skraplaniu; mając zatem czy to wodę, czy inną substancję w temperaturze wyższej, niż krytyczna, nie jesteśmy w stanie otrzymać substancji tej w fazie ciekłej, chociażbyśmy stosowali największe dostępne naszemu doświadczeniu ciśnienia. Niezbędnym zatem warunkiem skroplenia pewnej substancji, danej nam w fazie gazowej, jest to, *by temperatura jej była niższa od krytycznej*. Stosując wtedy odpowiednio wielkie ciśnienie (zależne od temperatury), otrzymamy pożądane skroplenie. W razie zaś, gdybyśmy nie rozporządzali ciśnieniami powyżej pewnej wartości, dopomóc sobie możemy przez oziębienie danej substancji do takiej temperatury, w której ciśnienie, jakiem rozporządzamy, okaże się wystarczające.

Próby skraplania powietrza, tlenu, azotu, wodoru przez poddawanie tych gazów ciśnieniu, nie dały żadnych wyników, pomimo olbrzymich wartości stosowanych ciśnień. Niepowodzenia te zrodziły wyobrażenie, iż wymienione gazy są „gazami trwałemi", że nie poddają się one skropleniu. Potem jednak, gdy znakomity fizyk Andrews dokonał swych epokowych badań i ustalił pojęcie temperatury krytycznej, mniemanie o istnieniu gazów trwałych prysło. Zrozumiano, że, jeżeli np. bezwodnik węglowy daje się skroplić pod odpowiedniem ciśnieniem w zwykłej temperaturze pokojowej, dzieje się tak dlatego, że jego temperatura krytyczna leży powyżej tej temperatury pokojowej; jeżeli z drugiej strony owe domniemane gazy trwałe nie dają się w taki sam sposób skroplić, wskazuje to, iż temperatury krytyczne tych ciał leżą poniżej temperatur, w których stosowano ciśnienia. Istotnie, w tablicy widzimy, iż temperatura krytyczna bezwodnika węglowego jest $+ 31^0,35$, tlenu zaś np. $— 118^0,8$, wodoru $— 241^0$. Chcąc zatem skroplić tlen, musimy przedewszystkiem obniżyć jego temperaturę poniżej $— 119^0$, wodór zaś oziębić do temperatury $— 241^0$ lub jeszcze bardziej. Dopiero więc kombinacja ciśnienia z odpowiedniem oziębieniem sprowadzić tu może wynik pożądany. Istotnie, tą drogą skroplono wszystkie gazy, łącznie z najoporniejszym ze znanych nam gazów, mającym najniższą temperaturę krytyczną ($— 268^0$), helem.

101. Wilgotność powietrza.

Powietrze zawiera zawsze mniejsze lub większe ilości pary wodnej, która, zgodnie z prawem Daltona, daje pewną nieznaczną naogół część ciśnienia atmosferycznego. Para wodna w powietrzu może być nienasycona lub nasycona, zależnie od ilości i wielkości zbiorników wody w danej miejscowości, oraz od temperatury powietrza, opadów, wiatrów (same opady warunkują się skraplaniem, wzgl. krzepnięciem pary w górnych warstwach atmosfery w określonej temperaturze).

Mokre przedmioty schną prędko, zwłaszcza na przewiewie, w powietrzu suchem, t. j. właściwie zawierającem parę, daleką od stanu nasycenia; trudno je natomiast wysuszyć przy parze nasyconej w powietrzu np. po dłuższym deszczu. W mieszkaniach, podczas gdy mamy w nich parę wodną nienasyconą, otrzymujemy nieraz skroplenie jej na przedmiotach w temperaturze niższej, niż temperatura pokojowa: na szybach okien, które się pocą lub pokrywają szronem, na szkłach binokli lub okularów u osób, wchodzących w zimie do pokoju ze dworu. Znajdująca się w powietrzu para ma wszędzie w pokoju prężność jednakową; podczas gdy prężność ta dla danej temperatury pokojowej jest mniejsza, niż prężność pary nasyconej w tej temperaturze (dlatego właśnie para jest nienasycona), ta sama prężność jest większa, niż prężność pary nasyconej w temperaturze niższej, którą przybiera powietrze w bezpośredniem zetknięciu z przedmiotem chłodnym; dlatego to w bezpośredniem sąsiedztwie z takim przedmiotem para nienasycona staje się nasyconą i część jej się skrapla.

Ilość pary wodnej, zmierzona w gramach, a przypadająca na 1 m^3 powietrza, daje nam miarę t. zw. *wilgotności bezwzględnej powietrza.* Stosunek ilości pary wodnej, mieszczącej się w danej objętości powietrza, do ilości pary wodnej, która byłaby nasyconą w danej objętości i danej temperaturze, stanowi miarę t. zw. *wilgotności względnej* powietrza. Wilgotność zatem względna mierzy się zazwyczaj ułamkiem właściwym; wartość 0 posiada wilgotność powietrza bezwzględnie suchego, t. j. nie zawierającego zupełnie pary wodnej; wartość 1 odpowiada wypadkowi, gdy w powietrzu mamy parę nasyconą. Mnożąc daną wartość wilgotności względnej przez 100, wyrażamy ją w procentach; zamiast mówić, iż wilgotność wynosi $^3/_4$, oznaczamy ją przez $75^0/_0$; przy parze nasyconej w powietrzu mamy $100^0/_0$ i t. d.

Organizm nasz nie znosi suchego powietrza; gdy wilgotność jest poniżej $50^0/_0$, powietrze jest dla nas, praktycznie rzecz biorąc, suche i wpływa szkodliwie; wartość wilgotności najkorzystniejsza z punktu widzenia higjeny jest ok. $70^0/_0$.

Przyrządy, które służą do mierzenia wilgotności powierza, nazywają się *higrometrami*: o ile zaś wskazują tylko zmiany wilgotności bez zaznaczenia ilościowej strony zjawiska — *higroskopami.*

Rys. 192.

Rys. 193.

Bardzo rozpowszechniony jest *higrometr włosowy* (rys. 192). Włos odtłuszczony ma tę własność, iż zmienia długość przy zmianach wilgotności powietrza (wchłaniając wodę lub tracąc ją przy wysychaniu). Włos taki, przytwierdzony górnym końcem do ramy przyrządu i obciążony na dolnym, okręcony jest na wałcu, który się łączy ze wskazówką; za pośrednictwem wałca wskazówka porusza się przy zmianach długości włosa, pokazując na podziałce z odpowiednią numeracją wartość wilgotności względnej. Są też inne higrometry wskazówkowe, naogół mniej dokładne, niż włosowy; wszystkie one wymagają cechowania, którego można dokonać np. zapomocą t. zw. *metody rosy.*

Rys. 193 wyobraża jeden ze służących do tego przyrządów (higro metr Lambrechta). Posrebrzone metalowe naczyńko zawiera eter; wdmuchując pompką powietrze do eteru, przyśpieszamy jego parowanie i warunkujemy tem obniżanie się jego temperatury, co notować możemy przy pomocy widocznego na rysunku termometru. W określonej chwili na posrebrzonej ściance naczyńka ukazują się kropelki rosy: chodzi właśnie o zanotowanie temperatury eteru, a więc i naczynia, w tym momencie ukazania się rosy. Podobne skraplanie się pary wodnej na powierzchni przedmiotu, chłodniejszego od otaczającego powietrza, wskazuje, iż para wodna, zawarta w powietrzu, wpobliżu tego przedmiotu staje się nasyconą. Przypuśćmy np., że rosa ukazuje się, gdy termometr, zanurzony w eterze, wskazuje 7^0; w temperaturze zatem 7^0 para wodna, zawarta w powietrzu, staje się nasyconą. W tablicach. otrzymanych z pomiarów wilgotności bezwzględnej (sposób tych pomiarów pomijamy), znajdujemy, że w 7^0 para wodna jest nasycona, jeżeli jej mieści się 7,7 gr w jednym metrze sześciennym; innemi słowy w danem powietrzu przypada 7,7 gramów na każdy metr sześcienny. Przypuśćmy dalej, iż temperatura powietrza wynosi 14^0, co odczytać należy na innym termometrze, umieszczonym w tej przestrzeni, gdzie wyznaczamy wilgotność. W tablicach widzimy, iż w 14^0 metr sześcienny powietrza winien zawierać 12 gr pary, by była nasycona. Zatem wilgotność względna w danym razie wynosi w procentach

$$\frac{7{,}7}{12} \cdot 100 = 64\%.$$

Jeżeli wskazówka zawieszonego w tej samej przestrzeni higrometru włosowego stoi na 64-ej kresce, świadczy to, iż wskazanie higrometru włosowego jest dobre; gdyby stała na 62, oznaczałoby to, iż higrometr w tem miejscu swojej skali pokazuje o 2% za mało. W ten sposób można wycechować higrometr włosowy dla różnych miejsc jego skali i wyznaczyć odpowiednie poprawki do jego wskazań.

Zadania.

114. Bezpośrednio odczytana wysokość słupa barometrycznego w temperaturze 20^0 przy pomocy skali mosiężnej wynosi 749 mm. Wyznaczyć wartość ciśnienia atmosferycznego, redukując odczytaną wysokość do 0^0 i uwzględniając prężność pary rtęci w rurce barometrycznej.

115. Do rurki barometrycznej wpuszczono, jak w doświadczeniach, o których mowa na str. 205 i 206, najpierw wody, a potem alkoholu w takiej ilości, iż na powierzchni rtęci po ustaleniu się równowagi pozostała cienka warstewka roztworu wodnego alkoholu: doświadczenia dokonano w temperaturze 20^0. O ile się obniżył słup rtęci?

116. Do rurki barometrycznej, jak w zadaniu poprzedniem, wprowadzony został eter, poczem słup rtęci obniżył się o 30,5 cm; doświadczenie zostało dokonane w 20°. Czy para eteru w rurce jest nasycona? Czy na powierzchni rtęci da się obserwować warstewka ciekłego eteru?

117. Na szczycie pewnej góry woda wre przeciętnie w temperaturze 92°. Co uczynić ma ten, ktoby chciał tam w celu należytego ugotowania pokarmu otrzymać wodę, wrzącą w 100°.

118. Temperatura krytyczna etylenu wynosi + 9°,5, ciśnienie zaś krytyczne 50,7 Atm. Podać warunki, jakim winno się uczynić zadość w celu skroplenia etylenu.

119. Dlaczego szyby w oknach pokrywają się w zimie lodem? Jakiemi sposobami daje się temu zapobiec?

120. Na higrometrze Lambrechta rosa ukazuje się, gdy termometr, zanurzony w eterze, wskazuje 6°,5; temperatura powietrza otaczającego jest 18°. Jaka jest wilgotność względna powietrza? (p. tabli. XV).

121. Dlaczego, mając wilgotną rękę, uczuwamy w niej większy chłód, gdy nią poruszamy?

Rozdział VI. O ruchu ciepła.

102. Przewodzenie i unoszenie ciepła.

Mówiliśmy wyżej często o udzielaniu ciepła przez jedne ciała innym ciałom; nie zastanawialiśmy się jednak bliżej nad tem, jak ten proces się odbywa. Uczynimy to teraz.

Doświadczenie I. Pręt metalowy zanurzamy jednym końcem w płomieniu, a drugim w naczyniu z lodem. Wywołujemy tem topnienie lodu. Doprowadzamy tu zapomocą owego pręta ciepło płomienia do lodu; mówimy, że pręt *przewodzi* ciepło, że jest *przewodnikiem* ciepła, że przez pręt przechodzi *prąd cieplny*.

Doświadczenie II. Ustawiamy palnik pod zlewką i ogrzewamy wodę w zlewce, dolawszy uprzednio do wody trochę atramentu albo dosypawszy i wymieszawszy trochę drobnych opiłek. Spostrzegamy, iż w wodzie tworzą się *prądy* — z dołu woda unosi się ku górze, natomiast górne warstwy opadają; ruchy te uwarunkowane są różnicą gęstości cieczy, ogrzanej u dołu, zimniejszej u góry. Tutaj ogrzana ciecz, podnosząc się do góry, unosi ze sobą zawarte w niej ciepło.

Podobnie, gdy napalimy w piecu, w powietrzu, wypełniającem pokój, tworzą się prądy — powietrze, ogrzewając się w zetknięciu z piecem, podąża do góry, dołem zaś dopływa do pieca powietrze chłodniejsze, opadające z góry; i tu więc powietrze unosi ze sobą zawarte w niem ciepło.

Tego rodzaju ruch ciepła wraz z ciałami, zawierającemi to ciepło, nazywamy *unoszeniem ciepła*.

Unoszenie ciepła jest zjawiskiem bardzo pospolitem, a zarazem ważnem (wystarczy przypomnieć znaczenie klimatyczne prądów morskich — Golfstrom, Kuro-Siwo; wiatrów wschodnich u nas w lecie i zimie i t. d.); wszakże o własnościach cieplnych różnych ciał, biorących udział w tem unoszeniu, zjawisko to nas nie informuje. Gdy natomiast rozważamy przewodzenie ciepła w różnych ciałach, przekonywamy się, iż pod tym względem różne ciała wyraźnie się różnią.

D o ś w i a d c z e n i e III. W przyrządzie Ingenhouse'a (rys. 194) przez otworki w ściance bocznej naczynia metalowego, do którego nalewamy wrzącej wody, przetknięty jest szereg pokrytych woskiem prętów z różnych materjałów, osadzonych w korkach i zanurzonych jednym końcem w wodzie, drugim zaś wystających w powietrzu otaczającem. Mamy tam pręty: miedziany, żelazny, cynkowy, szklany, drewniany. Po chwili dostrzegamy, iż wosk zaczyna się topić na prętach, i, podczas gdy na miedzianym topnienie dochodzi już do końca pręta, na żelaznym topi się wosk zaledwie na nieznacznej części, a na drewnianym nawet śladu topnienia nie dostrzegamy.


Rys. 194.

Powiadamy tedy, iż miedź jest lepszym *przewodnikiem* ciepła, niż żelazo, to ostatnie zaś lepszym, niż drzewo. Możemy ułożyć tablicę użytych do doświadczenia materjałów w porządku coraz gorszego lub coraz lepszego przewodnictwa.

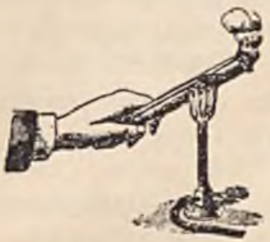

Rys. 195.

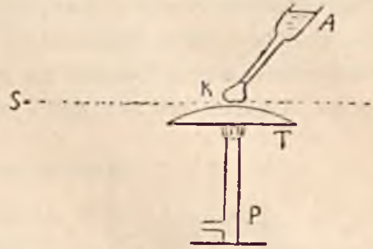
D o ś w i a d c z e n i e IV. Walec, złożony z dwu części drewnianej i metalowej (rys. 195), owijamy szczelnie papierem, sklejając brzegi papieru, i trzymamy nad płomieniem tak, jak to właśnie przedstawia rysunek. Papier zwęgla się na drzewie, nie zwęgla się na metalu. Wskazuje to na lepsze przewodnictwo cieplne metalu, niż drzewa — dopływające od płomienia ciepło rozchodzi się w bryle metalowej, skutkiem czego papier się tam nie ogrzewa; przeciwnie, mało tego ciepła wchodzi do drzewa, w tem miejscu więc papier mocno się ogrzewa i zwęgla.

Rys 196.

D o ś w i a d c z e n i e V. Przez ścianę naczynia blaszanego (rys. 196), zawierającego wodę, wstawiony jest termometr, tak że jego naczyńko z rtęcią przypada tuż pod powierzchnią cieczy. Na wodę nalewamy nieco eteru i zapalamy. Pomimo, iż naczyńko termometru jest przedzielone od płomienia cienką tylko warstewką cieczy, termometr nie wykazuje prawie przyrostu temperatury (ciecz ogrzewa się tu od góry, a więc unika się w ten sposób powstawania prądów, unoszących ciepło). Doświadczenie to wykazuje, że woda jest względnie złym przewodnikiem ciepła.

Doświadczenie VI. Na dnie próbówki z wodą umieszczamy kawałek lodu (rys. 197), przytrzymując go tam np. kawałkiem metalu, a następnie trzymamy próbówkę nad płomieniem tak, jak to właśnie przedstawia rysunek. W górnej części próbówki woda się zagotowuje, co jednak nie pociąga stopienia lodu, mieszczącego się na dnie próbówki. Mamy w tem nowy dowód złego przewodnictwa wody.


Rys. 197.

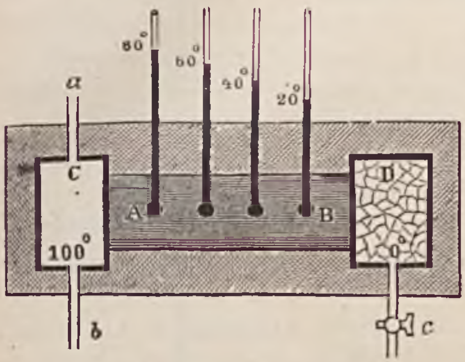


Rys. 198.

Doświadczenie VII. Na rozżarzoną do czerwoności poziomą płytę metalową lejemy wodę; ciecz dzieli się na niespokojnie poruszające się po tej powierzchni krople, które czas dłuższy pozostają na płycie, nie parując prędko w zetknięciu z gorącym metalem, jakbyśmy mogli tego oczekiwać. Uważna obserwacja wykazuje, iż każda taka kropla (mówimy, iż ciecz znajduje się tu w stanie *sferoidalnym)* nie dotyka bezpośrednio metalu, lecz przedzielona jest od niego warstewką wciąż odnawiającej się pary, która chroni resztę cieczy od zbyt prędkiego dopływu ciepła, a więc właśnie zapobiega prędkiemu parowaniu. Dowodzi to, że para jest złym przewodnikiem ciepła. Puśćmy ostrożnie z pipetki wodę na rozżarzony przez płomień palnika a odwrócony dnem do góry tygiel żelazny (rys. 198); z łatwością stwierdzamy, iż między kroplą a tyglem przechodzi swobodnie światło z odpowiednio umieszczonego źródła światła S. Gdy płyta metalowa nie jest tak rozżarzona, by się odrazu utworzyła ta ochronna warstewka pary, ciecz styka się bezpośrednio z metalem i niemal momentalnie paruje. W odlewniach robotnicy pokazują zwiedzającym osobom efektowne doświadczenie — zanurzają rękę po łokieć w stopionej masie metalu; niech czytelnik sam wytłumaczy to doświadczenie, uwzględniając, iż zazwyczaj robotnik przedtem zanurza rękę w wodzie, chyba, że bez tego ma rękę dość wilgotną.

Dokładne badanie przewodnictwa polega na wyznaczaniu ilości ciepła, przechodzącego w określonym czasie przez przekrój badanego ciała, np. pręta z danego materjału. Ilość ta jest tem większa przy pozostałych niezmiennych warunkach, im większy jest przekrój pręta s i im większy jest czas τ, w ciągu którego trwa prąd cieplny; poza tem jest proporcjonalna do t. zw. *spadu temperatury*, t. j. do stosunku $\frac{t_2-t_1}{l}$ różnicy temperatur w dwu przekrojach pręta do odległości l między temi przekrojami.

Dotykając ręką pręta, zanurzonego jednym końcem w płomieniu, drugim w lodzie, stwierdzamy, że pręt tem jest gorętszy, im bliżej płomienia go dotykamy. Dokładniej rzecz można zbadać tak, jak to jest przedstawione schematycznie na rys. 199; w pręcie badanym AB porobione są otworki, wypełnione rtęcią, w które wkładamy termometry; jeden koniec pręta przytyka do ściany naczynia metalowego C, przez które nieustannie płynie prąd pary wrzącej wody, a więc ten koniec pręta utrzymywany jest stale w temperaturze 100^0; drugi koniec pręta przytyka do ściany naczynia metalowego D, wypełnionego lodem, a więc mającego stałą temperaturę 0^0. Całość tego urządzenia osłonięta jest dookoła złym przewodnikiem ciepła, by uniknąć utraty ciepła przez ściany boczne pręta. Po pewnym czasie wskazania termometrów się ustalają i stwierdzamy jednostajny spad temperatury — jeżeli otworki z termometrami przypadają w równych odległościach od siebie i od końców pręta, termometry wskazują tak, jak to zaznaczone jest na rysunku. O ilości ciepła, przechodzącego przez pręt w określonym czasie, wnosić możemy z ilości stopionego w tym czasie lodu, innemi słowy z tej ilości wody, którą zbieramy, otwierając kurek c. Jak już powiedzieliśmy, ilość ta jest proporcjonalna do przekroju pręta s, do czasu τ i do spadu temperatury $\frac{t_2-t_1}{l}$, t. j.



Rys. 199.

$$q = k\,\frac{t_2-t_1}{l}\,s\,.\,\tau \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (1)$$

We wzorze (1) k jest pewnym spółczynnikiem proporcjonalności, różnym dla różnych substancyj. Przedstawia on t. zw. *przewodnictwo* *właściwe* materjału pręta; im większą wartość ma k, tem lepszym przewodnikiem jest dany materjał.

W tablicy XVI podane są wyniki pomiarów przewodnictwa, naogół bardzo trudnych i kłopotliwych, zwłaszcza przy badaniu cieczy i gazów, gdzie rzecz utrudnia niemożliwe do uniknięcia unoszenie ciepła. Najlepszemi przewodnikami są metale, z tych zaś srebro. Ciecze naogół są gorszemi przewodnikami, niż ciała stałe, gazy — gorszemi, niż ciecze; z gazów wodór jest względnie dobrym przewodnikiem.

Gdy chodzi o izolowanie jakiego ciała od dopływu doń ciepła, albo od utraty przezeń ciepła, otaczamy to ciało złemi przewodnikami. Wata, futro są bardzo dobremi izolatorami, gdyż między włoskami zawierają powietrze.

103. Promieniowanie.

Do faktów najbardziej popularnych należy ten, że *słońce grzeje*, t. j. że słońce dostarcza ciepła. W jaki sposób? Co jest tym przewodnikiem, po którym to ciepło dochodzi do nas; albo w jakiej to substancji tworzą się prądy, unoszące ku nam ciepło słoneczne? Wiemy z całą pewnością, iż między ziemią a słońcem niema żadnego pomostu materjalnego, w którym mogłoby zachodzić przewodzenie lub unoszenie ciepła. Jakże jednak przez tę *próżnię* przedostaje się do nas ciepło słońca? Dzieje się to przez *promieniowanie*. Słońce promieniuje, wysyłając między innemi rodzajami promieniowania światło. Promieniowanie jest czemś zgoła innem od ciepła. Promieniowanie rozchodzi się w próżni, podczas gdy ciepło może być i rozchodzić się tylko w ośrodkach materjalnych. Ruch ciepła, o ile zachodzi, odbywa się naogół bardzo powoli (uprzytomnijmy sobie, jak prędko uczujemy, iż ciepło dochodzi przez pręt metalowy do naszej ręki, w której trzymamy jeden koniec pręta, podczas gdy drugi zanurzamy w płomieniu); tymczasem promieniowanie rozchodzi się z olbrzymią prędkością — w próżni prędkość ta wynosi 300000 $\frac{\text{Km}}{\text{sek}}$, jak o tem mowa będzie później.

Niebawem omówimy szczegółowo przemiany pracy mechanicznej na ciepło (np. ogrzewanie ciał przez tarcie) i odwrotnie — ciepła na pracę mechaniczną, czego przykładem jest machina parowa. Skoro ciepło może z pracy powstać i w pracę się zamienić, jest całkiem uzasadnione uważanie ciepła za energję. Lecz nietylko z pracy mechanicznej ciepło może powstać i nietylko w pracę mechaniczną może się przeistoczyć. Z ciepła powstawać może promieniowanie i odwrotnie — jak to zaraz wytłumaczymy — promieniowanie może się w ciepło przekształcać.

Promieniowanie może się rozchodzić nietylko w próżni, ale i w ośrodkach materjalnych, przytem te ośrodki bywają w rozmaitym stopniu *przezroczyste*. Im mniej jest ośrodek przezroczysty, tem więcej — powiadamy — pochłania on rozchodzącej się w nim energji promienistej. Powietrze, otaczające ziemię, jest dość przezroczyste, to też nieznaczna część promieniowania słonecznego zostaje w powietrzu pochłonięta; reszta dochodzi do ziemi, przytem częściowo się odbija od powierzchni ziemi i znowu poprzez atmosferę ziemską uchodzi w przestwory wszechświatowe, częściowo przenika w nieprzezroczystą ziemię i zostaje pochłonięte. Otóż z tego promieniowania pochłoniętego tworzy się znowu ciepło — ciało, pochłaniające promienie, ogrzewa się. Ponieważ powietrze mało pochłania promieniowania, przeto i mało ciepła tworzy się przy przejściu przez powietrze — powietrze pozostaje chłodne. Ziemia natomiast pochłania promieniowanie, które nie zostało od jej powierzchni odbite — stąd ogrzewanie się ziemi pod naświetlaniem jej przez słońce. Od ziemi dopiero ogrzewa się stykające się z nią powietrze; im dalej więc od powierzchni ziemi, im wyżej, tem powietrze jest chłodniejsze. A zatem ogrzewanie ziemi przez słońce zachodzi w ten sposób, iż z ciepła słonecznego tworzy się promieniowanie, które przez próżnię dochodzi do ziemi i tu przy pochłanianiu znowu przekształca się na ciepło.

Podobnie, gdy w pewnej odległości od dobrze ogrzanego pieca lub innego gorącego przedmiotu trzymamy rękę, doznajemy wrażenia cieplnego i wnioskujemy, że piec lub ów przedmiot jest ciepły. Jeżeli między ręką a piecem stoi zasłona, np. kawałek tektury, wrażenia tego nie doznajemy, zachodzi jednak ono natychmiast, gdy usuwamy ową zasłonę. I tu gorące ciało (piec) promieniuje; promieniowanie przez przezroczyste powietrze dochodzi do naszej ręki (nie dochodzi przez nieprzezroczystą tekturę); częściowo następnie zostaje od ręki odbite, częściowo pochłonięte — z tej części pochłoniętej tworzy się ciepło, warunkujące ogrzewanie się ręki.

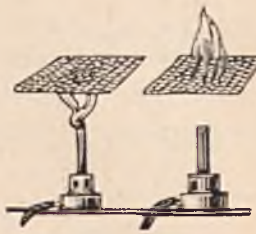
Poprzestajemy na tej krótkiej wzmiance o promieniowaniu oraz przemianach jego na ciepło i odwrotnie.

Zadania.

122. Uwzględniając rozmaitą wartość przewodnictwa cieplnego, wytłumaczyć, dlaczego różne ciała, mające tę samą temperaturę, np. mieszczące się czas dłuższy w tym samym pokoju, wydają się nam niejednakowo ciepłemi, gdy ich dotykamy ręką. W jakiej temperaturze przedmioty metalowe zdają się być chłodniejszemi, a w jakiej cieplejszemi od przedmiotów drewnianych?

123. Chcąc zachować czas dłuższy kawałek lodu w pokoju, umieszczamy go w trocinach. Dlaczego? Czy dobrze byłoby owinąć ten kawałek w tym samym celu watą?

124. Jeżeli, puściwszy gaz z palnika, nad którym trzymamy siatkę metalową, zapalimy gaz pod siatką, płomień będzie jakgdyby przytłoczony, nie mogąc się przedostać ponad siatkę. Jeżeli natomiast zapalimy gaz nad siatką, dopływający wciąż pod siatką gaz się nie zapali (rys. 200). Wytłumaczyć te zjawiska.



Rys. 200.

125. Powierzchnia szyby szklanej, przypadająca w pokoju, pozostaje w temperaturze 15°; powierzchnia jej nazewnątrz pozostaje w temperaturze —10°. Szyba ma 4 mm grubości, 1,5 m wysokości i 1 m szerokości. Ile ciepła traci na dobę pokój przez przewodnictwo w szybie w tych warunkach? (zakładamy, że mamy temperaturę w pokoju stałą, jak również temperatura nazewnątrz nie ulega zmianie; p. tabl. XVI).

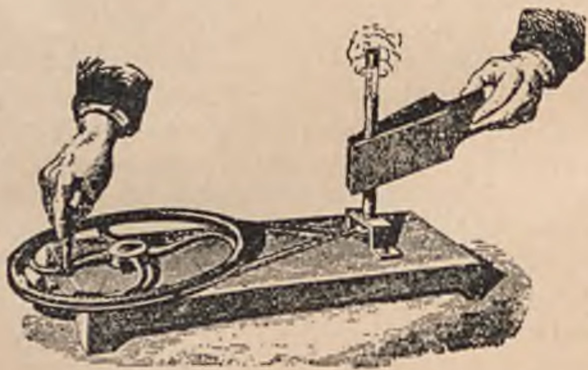
126. Kwadratowa płytka miedziana o krawędzi 20 cm i grubości 5 cm przedziela dwa naczynia, z których w jednem mieści się lód, a przez drugie płynie para wrzącej wody. Ile lodu stopi się w ciągu godziny w pierwszem z tych naczyń i ile pary się skropli w drugiem? (p. tabl. XVI).

127. W jakim celu ustawiają ekrany przed piecami lub kominkami?

Rozdział VII. O równoważności ciepła i innych rodzajów energji.

104. Dynamiczny równoważnik ciepła.

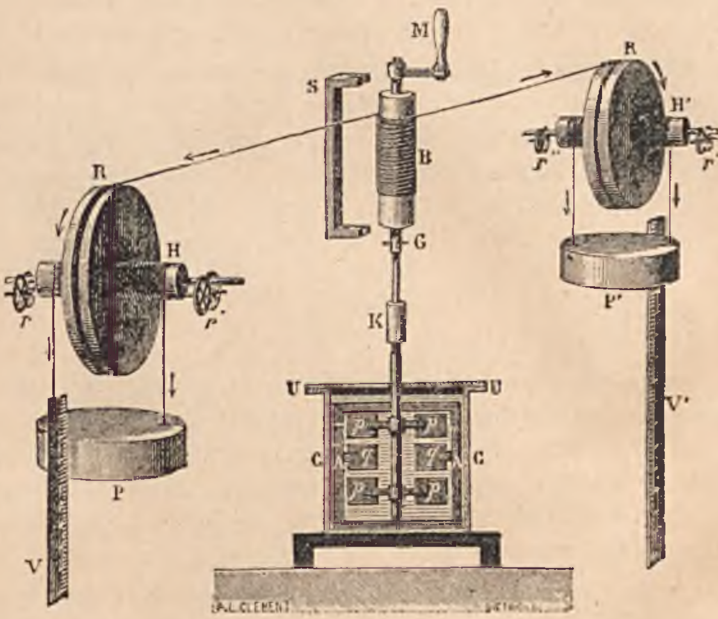
Jak już wspominaliśmy, ciała się ogrzewają, jeżeli je pocieramy lub uderzamy jedno o drugie; ze znajomości tego faktu robimy użytek, grzejąc sobie ręce przez pocieranie; przez szybko następujące po sobie uderzenia młota kowale potrafią rozżarzyć początkowo zimny kawałek żelaza do czerwoności; już w zamierzchłych czasach przedhistorycznych człowiek dziki rozniecał sobie ogień przez tarcie dwu kawałków drzewa jeden o drugi; tak niedawne jeszcze czasy, gdy się powszechnie posługiwano krzesiwem.



Rys. 201.

D o ś w i a d c z e n i e. Na t. zw. wirownicy (rys. 201) wprawiamy w ruch obrotowy zakorkowaną rurkę mosiężną w której mieści się trochę eteru. Rurkę zaciskamy lekko w kleszczach, by obrót zachodził z pokonywaniem tarcia. Po pewnym czasie para eteru wysadza korek — dowodzi to, iż w ten sposób doprowadzamy eter do wrzenia. Można zrobić inaczej: wstawić przez korek zwężoną u góry rurkę szklaną — wówczas wydostającą się z rurki parę eteru można zapalić; im prędzej rurka się obraca, tem wyższy otrzymujemy płomień przy reszcie warunków niezmiennych. Doświadczenie to wykazuje tworzenie się ciepła przez tarcie.

Już w końcu wieku XVIII zarysowywała się wyraźnie myśl, iż ciepło we wszystkich podobnych wypadkach powstaje kosztem pracy, którą wykonywamy, przezwyciężając tarcie ciał lub uderzając je; świtała też myśl o pewnej zależności ilościowej między ciepłem a pracą, z której ciepło powstaje. Myśl ta wszakże została dopiero wyraźnie



Rys. 202.

sformułowana w epokowej rozprawie lekarza niemieckiego Roberta Mayera (1842 r.), nie odrazu zrozumianej i ocenionej należycie. Mayer podał jednak zależność ilościową między ciepłem a pracą mechaniczną niedokładnie, nie rozporządzał bowiem wystarczającemi do tego danemi. Po raz pierwszy zależność ta znaleziona została dokładnie przez przemysłowca i fizyka angielskiego Joule'a w r. 1843.

Joule użył metody następującej. W kalorymetrze *C* (rysunek 202), zawierającym określoną ilość wody lub rtęci, porobione są przegródki *q*, między któremi przechodzą skrzydła *p* młynka, obracającego się na osi pionowej i wprawianego w ruch przez dwa spadające ciężary ***P*** i ***P'*** za pośrednictwem sznurka, nawiniętego na oś. Skrzydła młynka przezwyciężają tarcie w cieczy; przegródki zaś *q* zapobiegają wprawieniu przez młynek całej masy cieczy w ruch. Jak wskazuje termometr (nie przedstawiony na rysunku), temperatura cieczy w kalorymetrze podnosi się, gdy młynek w niej się obraca; z podniesienia się tej temperatury możemy łatwo obliczyć, ile tu ciepła powstaje z tarcia, skoro znamy masę cieczy w kalorymetrze oraz jej ciepło właściwe. Z drugiej strony, obserwując przy pomocy przystawionej skali (V, V'), jak spadają ciężary, poruszające młynek, wtedy, gdy w kalorymetrze cieczy niema, oraz wtedy, gdy ona jest—w tym ostatnim razie poruszają się one z przyśpieszeniem mniejszem — obliczyć możemy, jaka część energji tych spadających ciał zostaje użyta na pokonanie tarcia w cieczy.

Okazuje się z wielokrotnych pomiarów, iż między ilością ciepła otrzymanego, a ilością pracy, zużytej na jego zdobycie, zachodzi stały zupełnie stosunek, wahający się w takich granicach, jakie warunkują się nieuniknionemi błędami doświadczenia; a mianowicie okazuje się, iż *jedna kalorja mała otrzymuje się z pracy, równej 4,19 dżulów, na otrzymanie zaś jednej kalorji wielkiej zużyć trzeba 426,8 Kgm.* Liczby te $\left(4,19 \, \frac{\text{dżulów}}{\text{kal. mał.}}, \; 426,8 \, \frac{\text{kgm}}{\text{kal. wielk.}}\right)$ noszą nazwę *dynamicznego równoważnika ciepła.*

Z pracy mechanicznej nietylko daje się otrzymać ciepło; np. przy uderzeniu krzesiwa widzimy błysk — powstaje światło, inny jeszcze rodzaj energji; twierdzenie powyższe o równoważniku pracy i ciepła rozumieć należy tak, iż skoro z pracy mechanicznej powstaje *tylko ciepło,* wówczas z każdych $4,19 \cdot 10^7$ ergów tworzy się jedna mała kalorja, lub że z każdego erga powstaje $0,239 \cdot 10^{-7}$ kaloryj.

Odwrotnie, z ciepła powstawać może praca mechaniczna; przykładu na to dostarczają motory cieplne, np. machina parowa, co rozważymy niżej.

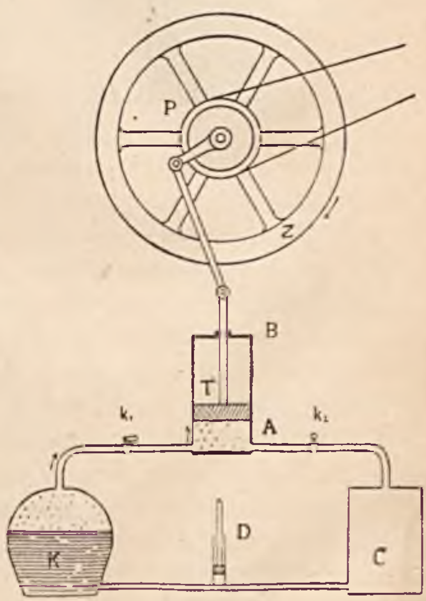
Ćwiczenie 52. Wyznaczcie dynamiczny równoważnik ciepła w sposób następujący. Sporządźcie z tektury rurę długości ok. 1 m, średnicy 5—6 cm; dobierzcie dwa korki, szczelnie wchodzące do obu końców rury. Odważcie w pudełku drewnianem lub tekturowem ok. 500 gr drobnego śrutu, a wetknąwszy do śrutu termometr z podziałką na $^1/_{10}{}^0$, zanotujcie temperaturę, gdy się ustali. Zamknąwszy korkiem jeden koniec rury, której temperatura jest ta sama co śrutu, jeżeli czas dłuższy rura i śrut pozostają w tym samym pokoju, wsypcie do rury śrut, zakorkujcie drugi koniec, a następnie odwracajcie rurę nagłym ruchem raz po raz to jednym, to drugim końcem do góry, nadając jej za każdym razem położenie pionowe (rys. 203). Przy każdem odwróceniu śrut spada z wysokości, równej odległości między korkami, którą z łatwością wymierzycie i, uderzając o dolny korek, tra-

Rys. 203.

ci swą energję kinetyczną, z której tworzy się ciepło (por. art. 46 i 47, str. 90 i 94). Dokonawszy prędko około 50 takich odwróceń, wysypcie śrut do tego pudełka, w którem on był początkowo, wstawcie znowu do śrutu termometr i wyznaczcie jego temperaturę, która się okaże wyższą *). Obliczcie, znając masę śrutu oraz wysokość spadu, całkowitą energję mechaniczną, która się tu zmienia na ciepło; obliczcie z drugiej strony, biorąc z tablic wartość ciepła właściwego ołowiu, ile kaloryj otrzymało się przy ogrzaniu danej ilości ołowiu o tyle stopni, ile wypadło z doświadczenia; obliczcie wreszcie dynamiczny równoważnik ciepła i porównajcie otrzymany wynik z podaną wyżej dokładną wartością tego równoważnika.

105. Przetwarzanie ciepła na pracę. Motory cieplne.

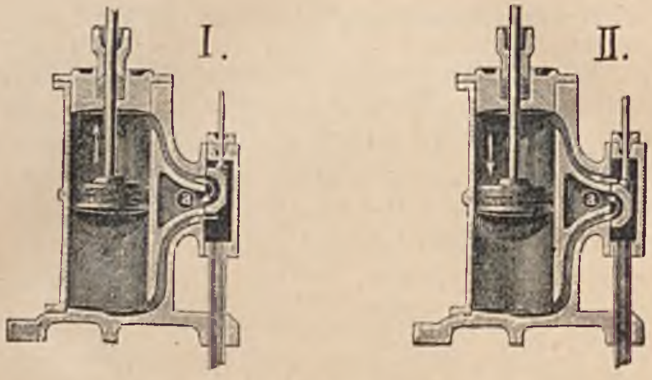
Rozpatrzmy działanie machiny parowej, najbardziej popularnego z pośród motorów cieplnych. Schematycznie urządzenie takiej machiny przedstawia rys. 204. W kotle K mamy wodę, wrzącą pod ciśnieniem, wynoszącem kilka lub kilkanaście atmosfer, a więc mającą temperaturę wyższą, niż 100^0. Nad powierzchnią wody znajduje się para wodna, wywierająca to właśnie ciśnienie. Gdy otworzymy kurek k_1, para podąży pod tłok, chodzący szczelnie w cylindrze, popchnie ten tłok do góry, pokonywając zewnętrzne ciśnienie atmosferyczne oraz tarcie. Gdy tłok w ten sposób podniesie się na pewną wysokość, zamknijmy kurek k_1 i otwórzmy kurek k_2, przez co przestrzeń pod tłokiem w cylindrze zostanie połączona z t. zw. chłodnicą C, t. j. ze zbiornikiem, utrzymywanym w odpowiedni sposób (np. przez polewanie strumieniem zimnej wody) w niższej względnie temperaturze; para będzie się ochładzała, skropli się i ciśnienie jej spadnie skutkiem tego poniżej ciśnienia atmosferycznego; wtedy tłok pod działaniem ciśnienia atmosferycznego zostanie przesunięty wdół. Zamknijmy teraz kurek k_2 i otwórzmy znowu kurek k_1, poczem powtarzajmy tę czynność wiele razy. Otrzymamy w ten sposób kolejne ruchy tłoka



Rys. 204.

*) Dlaczego nie doradzamy używać do tego pudełka metalowego?

wgórę i wdół, co możemy wyzyskać w ten sposób, iż wprawimy w ruch obrotowy (jak to nam wskazuje rys. 204) koło machiny, połączone z tym czy innym mechanizmem przy pomocy pasa bez końca. W machinach prawdziwych rolę chłodnicy odgrywa zazwyczaj otaczające machinę powietrze, dokąd bezpośrednio z cylindra podąża para. Zamiast niewygodnego zamykania i otwierania kurków mamy tu automatyczne łączenie cylindra z kotłem i z otaczającem powietrzem przy pomocy t. zw. suwaka, poruszającego się wraz z tłokiem, co wyjaśnia



Rys. 205.

rys. 205. Widzimy tam z prawej strony tłoka komorę, do której z dołu płynie przez rurę para z kotła; przy takiem położeniu suwaka, jak na (I), para wchodzi pod tłok i podnosi go, para zaś z ponad tłoka płynie przez *a* do chłodnicy (uchodzi w powietrze); przy takiem położeniu, jak na (II), przeciwnie para z kotła wchodzi od góry i popycha tłok ku dołowi, para zaś z dolnej części cylindra uchodzi przez *a* nazewnątrz.

Musimy się jednak zastanowić bliżej nad pytaniem, kosztem czego właściwie bierze się tutaj praca? Przedewszystkiem zwróćmy uwagę na to, iż w miarę działania machiny, w kotle (rys. 204) pozostaje coraz mniej wody, coraz więcej natomiast jej się gromadzi w chłodnicy. Wszakże ogólna ilość tej cieczy nie zmniejsza się wcale; moglibyśmy np. zapomocą dodatkowej pompki *D* przeprowadzić wodę z chłodnicy do kotła i mielibyśmy znowu stan rzeczy taki, jak na początku. Łatwo zrozumieć, że moglibyśmy zamiast wody użyć innej cieczy, a działanie machiny, teoretycznie rzecz biorąc, byłoby takie samo; można byłoby użyć również zamiast cieczy gazu np. powietrza. Słowem, rodzaj cieczy użytej lub gazu nie ma tu właściwie znaczenia, ciała te bowiem tylko krążą w całym tym procesie, powracając po szeregu zmian znów do stanu początkowego i grając tylko rolę jakiegoś pośrednika. Na czem wszakże to pośrednictwo polega? A oto na czem. W kotle woda pobiera ciepło, niezbędne do zamiany jej na parę, która następnie idzie pod tłok; potem para wchodzi do chłodnicy i skrapla się tam, oddając przytem, jak wiemy, ciepło (chcąc utrzymać chłodnicę w stałej temperaturze, musielibyśmy ją, jak to już wzmiankowałem, w odpowiedni sposób oziębiać). Zatem określona ilość wody, przechodząc z kotła do chłodnicy, pobiera w kotle pewną ilość ciepła Q i oddaje chłodnicy pewną ilość ciepła q. Otóż okazuje się, co można udowodnić odpowiedniemi pomiarami i co istotnie zostało udowodnione, że zawsze $Q > q$, t. j. przy tej wędrówce pary z kotła do chłodnicy znika gdzieś pewna ilość ciepła $Q - q$; *kosztem tego ciepła powstaje praca*, wykonywana przez motor. Co więcej, pomiary wykazały i tu równoważność ciepła i pracy: z każdej kalorji powstaje zupełnie określona ilość pracy, przyczem liczby wypadają zgodne z podanemi w poprzednim artykule.

106. Równoważność różnych postaci energji. Pierwsza zasada termodynamiki.

W art. 45 określiliśmy energję jako zasób pracy, w art. zaś 47 podaliśmy ogólną zasadę wielkiej doniosłości, że praca nie ginie i nie tworzy się z niczego. W ten sposób wygłosiliśmy t. zw. zasadę zachowania energji. Po tem, co zostało powiedziane w dwu poprzednich art., możemy znacznie rozszerzyć pojęcie energji. W rzeczy samej, z pracy mechanicznej tworzy się ciepło i to zawsze w ilości równoważnej, t. j. z każdego erga $0{,}239 \cdot 10^{-7}$ kaloryj. Odwrotnie, o ile ciepło przetwarza się na pracę mechaniczną (i to *tylko* na pracę) zachodzi tak samo określony stosunek ilościowy — z każdej kalorji tworzy się $4{,}19 \cdot 10^7$ ergów. Zatem 1 erg jest równoważny $0{,}239 \cdot 10^{-7}$ kalorjom, 1 kalorja zaś równoważna $4{,}19 \cdot 10^7$ ergom. Jeżeli więc uzupełnimy dane poprzednio określenie i umówimy się nazywać energją zasób pracy lub tego, co jest pracy równoważne, to w takim razie powiemy, iż ciepło jest energją i mierzy się w tych samych jednostkach, t. j. w jednostkach pracy (ergach, dżulach, Kgm); zamiast mówić, iż dane jest nam 3 kalorje, możemy powiedzieć, iż dana nam jest energja cieplna w ilości $3 \cdot 4{,}19 \cdot 10^7$ ergów.

Wszakże z ciepła powstawać może nietylko praca mechaniczna. Oto wiemy już (art. 103), że ciała kosztem ciepła promieniują—znika więc tutaj ciepło jako takie, wzamian powstaje promieniowanie. Rozszerzając wyżej powiedziane na ten przypadek, twierdzimy, iż, jeżeli zmiana taka zachodzi, z danej ilości ciepła powstaje zupełnie określona ilość owego promieniowania, t. j. że promieniowanie jest równoważne ciepłu, z którego powstaje. Mówiliśmy również, że gdy ciało jakie nieprzezroczyste pochłania promieniowanie, ogrzewa się przytem; i tu da się zastosować twierdzenie o równoważności — znika pewna ilość energji promienistej, natomiast powstaje ciepło, przytem zmiana taka zachodzi zawsze w określonym stosunku. Widzimy więc, o ile było uzasadnione powiedzenie, jakiego użyliśmy w poprzednim rozdziale, iż promieniowanie jest jednym z rodzajów energji; wynika z tego, że i ten rodzaj energji mierzyć możemy w ustalonych już jednostkach — ergach. W dalszym ciągu czeka nas systematyczna nauka o elektryczności, ale i teraz każdy z czytelników wie, iż przy pomocy prądu elektrycznego otrzymać można i ciepło, i światło, i pracę mechaniczną (motory elektryczne, tramwaje). Otóż i tu pomiędzy prądem elektrycznym a pracą, ciepłem lub promieniowaniem, zachodzi równoważność, innemi słowy do szeregu różnych rodzajów energji doliczyć możemy energję elektryczną, ściślej mówiąc elektromagnetyczną; ten rodzaj energji również mierzy się w tych samych jednostkach pracy mechanicznej (erg, dżul, Kgm).

Całokształt zjawisk, które rozważa fizyka, t. j. całokształt zjawisk fizycznych polega na przemianach energji z jednego rodzaju w inny; wyszczególniliśmy tymczasem następujące jej rodzaje: mechaniczną albo dynamiczną, cieplną, promienistą i elektromagnetyczną. Przytem ilekroć zmiana taka zachodzi i jeden rodzaj energji przekształca się w inny, liczba ergów, wyrażająca wartość pierwszej i drugiej, jest jedna i ta sama — nic z energji nie ginie i nic nowego nie powstaje. Najczęściej się zdarza, że przy zmianie takiej z jednego rodzaju energji tworzy się dwa nowe albo i więcej — wówczas suma tych równa się dokładnie pierwszej. Oto jak rozumieć należy w szerszem znaczeniu zasadę zachowania energji.

Twierdzenie, że ciepło jest równoważne pracy mechanicznej, względnie innego rodzaju energji, t. j. że z 1 kalorji daje się otrzymać ściśle określona ilość pracy (o ile z ciepła *tylko* praca powstaje), określona ilość energji promienistej (o ile z ciepła powstaje *tylko* energja promienista) i t. d., i odwrotnie 1 kalorja ciepła powstaje z przemiany określonej ilości pracy mechanicznej, określonej ilości energji promienistej i t. d. — twierdzenie to jest tą samą zasadą zachowania energji, ujętą pod kątem widzenia zjawisk cieplnych; w tej postaci zasada zachowania energji nosi nazwę *pierwszej zasady termodynamiki,* jako że termodynamiką nazywamy teorję zjawisk cieplnych.

107. Druga zasada termodynamiki. Rozpraszanie się energji.

Jak powiedzieliśmy na końcu art. poprzedniego, pierwsza zasada termodynamiki jest w szczególny sposób sformułowaną zasadą zachowania energji. Energja nie ginie i nie tworzy się z niczego. Skoro więc pewien rodzaj energji np. energja dynamiczna znika jako taka, wzamian powstaje inny rodzaj energji w ilości równoważnej: z pracy tworzy się ciepło, z ciepła — praca mechaniczna. Wszakże, jeśli mówimy, że, o ile zmiany takie zachodzą, dzieje się to zawsze z zachowaniem owej równoważności, nie rozstrzygamy jeszcze przez to, czy zmiany te zachodzić mogą w każdych okolicznościach, czy też w pewnych tylko szczególnych. Powstaje tedy pytanie, czy wystarcza samo istnienie określonej ilości pewnej energji, by dowolnie dała się ona zmienić na rodzaj inny, czy też zmiana taka wymaga spełnienia pewnych warunków.

Zastanowienie się nad tem pytaniem prowadzi nas do wniosku, że jednak istnieją pewne warunki, ograniczające te zmiany, i że, skoro chcemy w ogólnem sformułowaniu ująć zjawiska przemian energji, nie można poprzestać na pierwszej jedynie zasadzie termodynamiki, t. j. na twierdzeniu o zachowaniu energji.

Przypatrując się uważnie na rys. 204 schematowi motoru cieplnego, widzimy odrazu, że, gdyby chłodnica miała tę samą temperaturę, co kocioł, nie byłoby tu niezbędnego warunku przechodzenia pary lub ogrzanego powietrza z kotła do chłodnicy, a więc nie byłoby i ruchu tłoka. Im mniejsza jest różnica tych temperatur, tem mniej korzystne są warunki przekształcania się ciepła na pracę, a dowieść można, że jeżeli przez T_1 oznaczymy w bezwzględnej skali temperatur temperaturę kotła, przez T_2 zaś temperaturę chłodnicy, stosunek ilości ciepła, przetworzonego na pracę, do ogólnej ilości ciepła, pobranego z kotła — jest to t. zw. *wydajność* machiny parowej—nie może być większy od $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$ *) (pamiętajmy, że reszta ciepła oddaje się chłodnicy!). Wydajność wyraża się albo ułamkiem właściwym, albo w procentach. Nie dość więc jest mieć pewien zasób ciepła w kotle; trzeba jeszcze mieć chłodnicę o odpowiednio niskiej temperaturze na to, by móc prze-

*) Przypuśćmy, iż temperatura kotła = 150^0 (odpowiada to wrzeniu wody pod ciśnieniem ok. 5 atm.), temperatura zaś chłodnicy = 40^0; zatem $T_1 = 423^0$, $T_2 = 313^0$, w takim razie wydajność teoretyczna motoru będzie $\frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{110}{423}$ = ok. $\frac{1}{4}$. W rzeczywistości stosunek ten jest bezporównania mniejszy — jak widać z tego, machiny parowe są bardzo mało ekonomiczne. Dlatego technika ucieka się, gdzie się da, do motorów spalinowych oraz turbin parowych, których urządzeń rozważać tu nie będziemy.

kształcać ciepło na pracę mechaniczną. Różnica temperatur jest niezbędnym warunkiem do wyzyskania energji cieplnej w celu otrzymania z niej pracy. Zależy tu *nie tylko na ilości, ale i na jakości* energji — konieczne jest pewne *napięcie*, które się określa różnicą temperatur. Teoretycznie traktować możemy każde ciało jako kocioł — w każdem zawarta jest pewna ilość ciepła; na to jednak, by ciepło to można było wyzyskać dla otrzymania z niego pracy, trzeba ciało dane sprząc w pewien sposób z innem ciałem o temperaturze niższej — trzeba odpowiedniej chłodnicy. Im niższa jest temperatura kotła, tem trudniej taką chłodnicę dobrać, ewentualnie będzie ona bardzo kosztowna, jeżeli między nią a kotłem ma panować dostateczna różnica temperatur. Z drugiej strony ciepło, jak wiemy, przechodzi od ciał o temperaturze wyższej do ciał o temperaturze niższej, nigdy odwrotnie, i w ten sposób ostatecznie różnice temperatur ciał wyrównywają się.

Przekonamy się dalej, zapoznając się z innemi formami energji, że uwagi powyższe posiadają szersze znaczenie. Możemy więc w stosunku do zjawisk cieplnych wypowiedzieć zasadę, niezależną od zasady zachowania energji, a stanowiącą jej niezbędne uzupełnienie, że w zamkniętym układzie ciał, pozostających w jednej temperaturze, nie może zachodzić przemiana ciepła na pracę. Twierdzenie to stanowi t. zw. *drugą zasadę termodynamiki.*

Uważny przegląd odbywających się dokoła nas zjawisk wskazuje na pewną kierunkowość tych zjawisk, a mianowicie na dążenie do zrównania wszelkich napięć, wszelkich różnic, określających te napięcia. W połączonych ze sobą zbiornikach gazu wyrównywają się ciśnienia; w pozostających ze sobą w połączeniu cieplnem ciałach o różnych temperaturach następuje zrównanie temperatur. Nie spotykamy natomiast samorzutnego przebiegu zjawisk w kierunku wręcz odwrotnym. Znikanie zaś napięcia jest to znikanie warunku przekształcania się energji z jednej postaci w drugą, jest to więc zatem uniemożliwianie samego zjawiska przekształcania się. Stwierdzamy więc w przyrodzie tendencję do t. zw. rozpraszania się energji, połączonego z jej ubezwartościowieniem, jakkolwiek tendencja ta niezniszczalności energji nie zaprzecza.

W art. 47 mówiliśmy o nieudanych próbach zbudowania perpetuum mobile, t. j. przyrządu, wytwarzającego pracę z niczego. Nie udało się zaprzeczyć zasadzie zachowania energji — innemi słowy pierwszej zasadzie termodynamiki. Nie możemy również zaprzeczyć i 2-giej zasadzie termodynamiki. Gdyby to było możliwe, nie potrzebowalibyśmy wytwarzać energji z niczego: dość byłoby czerpać energję cieplną z olbrzymich zbiorników, jakiemi są np. oceany lub otaczająca nas atmosfera. Wszakże, zgodnie z drugą zasadą termodynamiki byłoby to możliwe wtedy, gdybyśmy te „kotły“ umieli sprząc z odpowiedniemi chłodnicami, a sporządzenie takich chłodnic byłoby niełatwe *). Oto dlaczego nieprzebrane zaiste zapasy energji cieplnej pozostają dla nas niedostępne do wyzyskania. Pomyślany a niedający się urzeczywistnić przyrząd, który pozwalałby zużytkować energję cieplną ciał bez sprzęgania ich z chłodnicami, t. j. wbrew drugiej zasadzie termodynamiki, uczeni nazwali *perpetuum mobile drugiego rodzaju,* pozostawiając nazwę *perpetuum mobile pierwszego rodzaju* przyrządowi, zaprzeczającemu zasadzie pierwszej. Twierdzimy tedy, iż perpetuum mobile zarówno pierwszego jak drugiego rodzaju jest niemożliwe do urzeczywistnienia.

Zadania.

128. Chcąc wywabić na ubraniu plamy, powstałe od kropel stearyny, uczynimy to z dobrym skutkiem, mocno pocierając splamione miejsca kawałkiem suchej waty. Wytłumaczyć, w jaki sposób plamy zostają usunięte?

129. Ile pracy należy użyć celem stopienia przez tarcie 1 Kg lodu w temperaturze 0^0?

130. Kawał ołowiu spada z wysokości 10 m w miejscu, gdzie $g = 981 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$ i ogrzewa się przy uderzeniu o podstawę. Znaleźć, o ile podnosi się temperatura ołowiu przy takiem uderzeniu, jeżeli założymy, że energja ruchu zmienia się tu całkowicie na ciepło?

131. Jaką prędkość powinna mieć kula ołowiana w 15^0, aby się stopiła wskutek uderzenia o tarczę?

132. Temperatura kotła machiny parowej wynosi 121^0, temperatura chłodnicy 40^0; średnica tłoka 15 cm, długość skoku tłoka 35 cm, liczba zaś pełnych skoków tłoka na minutę 180. Cylinder z tłokiem jest typu, przedstawionego na rys. 205. Znaleźć teoretyczną dzielność machiny.

133. Motor gazowy o dzielności 3 *HP* zużywa 0,75 Kg gazu na godzinę. Znaleźć wydajność motoru, jeżeli wiadomo, że przy spalaniu 1 Kg gazu wytwarza się 6000 kaloryj wielkich.

134. Motor parowy o dzielności 100 *HP* posiada spółczynnik wydajności 16%. Ile węgla zużywa ten motor w ciągu godziny, jeżeli wiadomo, że spalenie 1 gr węgla daje 7,5 kaloryj wielkich?

---

135. Uzasadnić znaczenie klimatyczne lodowców.

136. Wytłumaczyć, co głównie stanowi o różnicy klimatów morskiego i lądowego.

---

*) Nie możemy tu przemilczeć, że jest obecnie w opracowaniu olbrzymi projekt wyzyskania energji cieplnej oceanów przy uwzględnieniu różnicy temperatur warstw górnych wody oraz pozostających na odpowiedniej głębokości.

137. Czy rodzaj gleby może mieć wpływ na wahania dzienne temperatury?

138. W jaki sposób mogą się tworzyć prądy morskie?

139. W jaki sposób powstaje rosa, szron?

140. Czy pochmurne niebo sprzyja utracie przez ziemię ciepła przez promieniowanie, czy też zapobiega tej utracie?

141. Gdyby ziemia była stale otoczona gęstemi chmurami, czy miałoby to wpływ klimatyczny?

TABLICE.

I. Gęstość niektórych ciał.

Platyna	21,5 $\frac{gr}{cm^3}$
Złoto	19,32 „
Ołów	11,37 „
Srebro	10,53 „
Miedź	8,9 „
Mosiądz	8,1 — 8,6 „
Żelazo	7,86 „
Cynk	7,15 „
Glin	2,67 „
Szkło (lekkie)	2,4 — 2,7 „
„ (ciężkie, flint)	3,0 i więcej
Lód (0°)	0.917 „
Drzewo dębowe	0,82 „
Drzewo jodłowe	0,56 „
Korek	0,24 „
Rtęć (0°)	13,596 „
„ (18°)	13,552 „
Gliceryna (18°)	1,24 „
Olej terpentynowy (18°)	0,87 „
Alkohol etylowy (18°)	0.791 „
Eter etylowy (18°)	0,717 „
Bezwodnik węglowy (0°, 760 mm)	0,001965 „
Powietrze (0°, 760 mm)	0,001293 „
Tlen „	0,001429 „
Azot „	0,001251 „
Wodór „	0,000090 „

II. Gęstość względna wody dystylowanej w różnych temperaturach.

0°	0,99987	20°	0,99824
4°	1,00000	30°	0,99567
10°	0,99973	100°	0,95863

III. Gęstość względna niektórych gazów (względem wodoru).

$t = 0^0$ $b = 760$ mm.

Wodór	1	Powietrze	14,40
Tlen	15,91	Bezwodnik węglowy	21,86
Azot	13,92		

IV. Spółczynniki rozszerzalności linjowej niektórych ciał.

Miedź	$\lambda =$ 0,000017	Inwar (stop 64,3% stali i 35,7% niklu) ok.	0,0000009
Mosiądz	0,000019	Szkło (przeciętnie)	0,000009
Żelazo	0,000012	Kwarc ‖ do osi	0,0000074
Stal	0,0000105	„ ⊥ „ „	0,0000137
Cynk	0,000029		
Platyna	0,000009		

V. Spółczynniki rozszerzalności niektórych cieczy.

	t	α
Alkohol etylowy	-40^0	0,00097
„ „	$+10^0$	0,001051
„ „	30^0	0,001081
Eter	10^0	0,001518
„	20^0	0,001561
Dwusiarczek węgla	-30^0	0,001115
„ „	$+10^0$	0,001155
„ „	20^0	0,001175
Gliceryna	10^0	0,00049
Nafta	10^0	0,0009
Rtęć	10^0	0,00018180
„	20^0	0,00018181
„	30^0	0,00018183
„	40^0	0,00018186
„	50^0	0,00018189
„	60^0	0,00018193
„	70^0	0,00018198
„	80^0	0,00018203
„	90^0	0,00018209
„	100^0	0,00018216
„	130^0	0,00018241

VI. Spółczynniki rozszerzalności i prężności niektórych gazów.

	p		t	α	β
Powietrze	1	Atm.	100°	0,00367	0,003665
,, ...	20	,,	,,	0,00383	0,00386
,, ...	20	,,	— 145°	0,00450	0,00396
Wodór	1	,,	100°	0,00366	0,00366
Azot	,,	,,	,,	0,00367	0,003668
Bezw. węgl.	,,	,,	,,	0,00371	0,00371

VII. Ciepło właściwe niektórych ciał stałych i gazów.

	c	$\frac{\text{kal}}{\text{gr}}$
Lód (od — 20° do — 1°)	0,5	,,
Miedź (od 0° do 100°)	0,093	,,
Mosiądz	0,094	,,
Żelazo.	0,111	,,
Ołów	0,032	,,
Szkło	0,192	,,
Rtęć (od 0° do 100°)	0,033	,,
Alkohol (0°).	0,548	,,
,, (od 16° do 30°)	0,602	,,
Eter (od 0° do 30°)	0,54	,,
Woda (15°)	1,000	,,

VIII. Ciepło właściwe niektórych gazów.

	c_p	$\frac{c_p}{c_v}$
Bezwodnik węglowy (15° — 100°) . .	0,202	1,31
Powietrze (15° — 100°).	0,237	1,41
Azot (0° — 200°)	0,244	1,41
Tlen ,, ...	0,217	1,40
Wodór (20° — 100°).	3,409	1,40

IX. Temperatura topnienia i ciepło topnienia niektórych ciał.

	Temp. topn.	Ciepło topn.		Temp. topn.	Ciepło topn.
Wodór . .	— 259°		Alkohol . .	— 130°,5	
Azot . . .	— 210°,5		Rtęć . . .	— 38°,8	2,77 $\frac{\text{kal}}{\text{gr}}$

	Temp. topn.	Ciepło topn.		Temp. topn.	Ciepło topn.
Lód	0^0	$79{,}2 \frac{kal}{gr}$	Złoto	1064^0	
Wosk	69^0	42 ,,	Miedź. . . .	1083^0	
Cyna	232^0	14,6 ,,	Żelazo . . .	1505^0	
Ołów	327^0	5,6 ,,	Platyna . . .	1750^0	
Srebro . . .	960^0	25 ,,	Iryd	2360^0	

X. Temperatura wrzenia i ciepło parowania niektórych ciał pod normalnem ciśnieniem.

	Temp. wrzenia pod norm. ciśn.	Ciepło parowania
Wodór	$-252^0{,}8$	$62 \frac{kal}{gr}$
Azot	$-195^0{,}7$	48 ,,
Tlen	$-182^0{,}9$	51 ,,
Eter etylowy	$+34^0{,}87$	90 ,,
Dwusiarczek węgla	$+46^0$	85 ,,
Alkohol etylowy	$+78^0{,}26$	205 ,,
Woda	100^0	539 ,,
Rtęć	$357^0{,}25$	62 ,,

XI. Temperatura wrzenia wody w różnych ciśnieniach.

Pod ciśnieniem normalnem 100^0

Ciśnienie zwiększone			Ciśnienie zmniejszone		
2	Atm.	$120^0{,}6$	525	mm	90^0
5	,,	$152^0{,}2$	92	,,	50^0
10	,,	$180^0{,}3$	31,5	,,	30^0
15,3	,,	200^0	9,1	,,	10^0
57,1	,,	270^0	4,6	,,	0^0
102	,,	310^0			

XII. Ciepło parowania wody w różnych temperaturach.

Temp.	Ciepło parow. wody	Temp.	Ciepło parow. wody
0^0	$597 \frac{kal}{gr}$	150^0	$504 \frac{kal}{gr}$
20^0	585 ,,	200^0	468 ,,
60^0	563 ,,	250^0	412 ,,
100^0	539 ,,	365^0	0 ,,

XIII. Prężność pary nasyconej niektórych cieczy.

	t		Prężność pary nasyconej
Woda	— 10°	(przechłodzona!)	21,6 mm
„	0°		4,58 „
„	20°		17,36 „
„	50°		92,0 „
„	100°		760,0 „
„	150°		3568,7 „
„	200°		11647 „
Alkohol etylowy.	0°		12,7 „
„ „	20°		44,0 „
„ „	50°		221,0 „
„ „	78°,26		760,0 „
„ „	100°		1695,0 „
Rtęć	0°		0,0002 „
„	20°		0,0013 „
„	50°		0,003 „
„	100°		0,285 „
„	300°		242,2 „
„	357°,25		760,0 „
„	400°		1588,0 „
Eter etylowy	0°		184,9 „
„ „	20°		442,4 „
„ „	34°,87		760,0 „
„ „	50°		1276,1 „
„ „	100°		4859,0 „

XIV. Temperatura krytyczna i ciśnienie krytyczne niektórych ciał

	Temperatura krytyczna	Ciśnienie krytyczne
Woda	+ 365°,0	200,5 Atm.
Eter etylowy	+ 193°,8	35,6 „
Bezwodnik węglowy . .	+ 31°,35	72,9 „
Tlen	— 118°,8	50,8 „
Azot	— 145°,1	33,6 „
Wodór	— 241°	19,4 „
Hel	— 268°	2,8 „

XV. Zawartość pary wodnej nasyconej w jednym metrze sześciennym powietrza w różnych temperaturach.

t	gr	t	gr	t	gr
— 3^0	4	5^0	6,8	13^0	11,3
— 2^0	4,2	6^0	7,2	14^0	12,0
— 1^0	4,5	7^0	7,7	15^0	12,8
1^0	4,9	8^0	8,2	16^0	13,6
1^0	5,2	9^0	8,8	17^0	14,4
2^0	5,6	10^0	9,4	18^0	15,3
3^0	5,9	11^0	10,0	19^0	16,2
4^0	6,4	12^0	10,6	20^0	17,2

XVI. Spółczynniki przewodnictwa cieplnego niektórych ciał.

	k		k
Srebro	1,15	Woda	0,0012
Miedź	1,04	Nafta.	0,0004
Żelazo	0,21	Wodór	0,0003
Szkło	0,002	Bezwodnik węglowy .	0,00003
Drzewo	0,0003		

ODPOWIEDZI NA ZADANIA.

1. Z dokładnością $^1/_{20}$ cm = 0,5 mm.
3. $^1/_9$ mm.
5. 30122 cm^3 = 30,122 dm^3.
6. 14429 gr = 14,429 Kg.
7. 99 cm.
8. 5,27 $\frac{gr}{cm^3}$ (Rachunek przybliżony. Na gęstość ziemi przyjmujemy średnio 5,5 $\frac{gr}{cm^3}$).
9. $v = 5{,}25 \frac{cm}{sek} = 3{,}15 \frac{m}{min}$; równanie: $l = 5{,}25\,t$.
10. $v = 833^1/_3 \frac{cm}{sek} = 833{,}(3) \frac{cm}{sek}$. Parzystą liczbę razy.
12. Po upływie 1,86 sek.
13. Nie mogą.
15. Ruch jednostajnie przyśpieszony.
16. $v = 981\,t$, $s = 1400\,t + \frac{981\,t^2}{2}$; $t = 1{,}77$ sek.
17. $s = 1500\,t - \frac{981\,t^2}{2}$.
18. $v_0 = 2506 \frac{cm}{sek} = 25{,}06 \frac{m}{sek}$.
19. Jedna składowa tworzy z wypadkową kąt $= 30^0$, druga kąt $= 90^0$.
21. $v_0 = 343{,}1 \frac{cm}{sek}$.
22. a) 1-szy względem 2-go z prędkością $v = -15 \frac{Km}{godz}$, 2-gi względem 1-go z prędkością $v = 15 \frac{Km}{godz}$.
b) 1-szy względem drugiego i odwrotnie z prędkością $v = 75 \frac{Km}{godz}$.
23. $v = 10{,}29 \frac{m}{sek}$.
24. $v = 8{,}834 \frac{Km}{godz}$ w kierunku południowo-zachodnim pod kątem $= 69^0 7'$ względem południa.
25. $f = 2625$ dyn.
26. $f = 524912$ dyn.
27. $w = 3333^1/_3 \frac{cm}{sek^2} = 3333{,}(3) \frac{cm}{sek^2}$.
28. $m = 8.10^5$ gr = 800 Kg.
29. $w = 15696 \frac{cm}{sek^2}$.
30. $t = 60$ sek = 1 min.
31. $v = 44145 \frac{cm}{sek}$.
32. $m = 49050$ gr.
33. $h = 24{,}87$ m.
34. Ruch jednostajnie przyśpieszony pod działaniem siły $f = 143{,}572$ dyn, skierowanej ku północo-wschodowi pod kątem $= 6^0 58' 32''$ względem wschodu.
36. $u = 78 \,.\, 10^3$ erg.
37. $u = 2943 \,.\, 10^9$ erg $= 2943 \,.\, 10^2$ dżul., dzielność $= 81{,}75 \,.\, 10^7 \frac{erg}{sek} = 81{,}75$ wat.
38. $u = 31556 \,.\, 10^5$ erg. = 315,56 dżul. = = 33,2 Kgm.
39. $h = 12$ m.
40. $h = 102040{,}8$ cm = 1020,408 m.
41. Dzielność = $1\,^{13}/_{15}$ HP = 1,87 HP.
42. $u = 3375 \,.\, 10^{-2}$ erg = 0,03375 dżul. = = 0,00344 Kgm.
43. $u = 10^5$ erg.

44. $f = 64 \cdot 10^7$ dyn.
45. $u = 192 \cdot 10^7$ erg. = 192 dżul.
47. $p_1 = 48265{,}2 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$, $p_2 = 32176{,}8 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$,

$p_3 = 40221 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$.

48. $p = 2027923{,}2 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} = 2$ Atm.
49. $p = 705568161{,}6 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$.
50. $h = 18$ m.
52. $h = 34{,}38$ cm.
53. $f_1 = 18447$ dyn, $f_2 = 14757{,}6$ dyn.
54. $v = 60$ cm^3.
55. $p = 6995 \cdot 10^3 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$.
56. 100 tonn.
57. $m = 106{,}3$ gr.
58. $h = 163{,}2$ mm.
60. $p_1 : p_2 = 1 : 512$.
61. $v = 53{,}76$ cm^3.
62. $p_1 = 1\,^1/_3$ Atm; ($h = 101{,}33$ cm), $p_2 = 0{,}8$ Atm.; ($h = 60{,}8$ cm).
63. $M = 373$ Kg.
64. $m = 1131375$ gr $= 1131{,}375$ Kg.
73. $p = 0{,}001$ mm.
78. 18^0 R = $22^0{,}5$ C; 50^0 R = $62^0{,}5$ C; 64^0 F = $17^7/_9{}^0$ C = $17^0{,}78$ C; 12^0 F = = — $11^1/_9{}^0$ C = — $11^0{,}11$ C.
79. 15^0 C = 12^0 R = 59^0 F; 24^0 C = $=19^0{,}2$ R $= 75^0{,}2$ F; 49^0 C $= 39^0{,}2$ R = $= 120^0{,}2$ F.
80. $t =$ — 40^0 F = — 40^0 C.
81. $t = 160^0$ C $= 320^0$ F.
84. $l = 2{,}14298$ m.
85 $s = 98{,}16758$ cm^2.
86. $v_0 = 427{,}6$ cm^3.
87. $v = 1{,}001539$ litr.
88. $l = 2{,}270595875$ m, $l_0 = 2{,}2695$ m.
89. $h_0 = 752{,}068$ mm.
90. $h = 0{,}1575$ cm $= 1{,}575$ mm.
91. $v = 6{,}11$ litr.
92. Nie te same. Za drugim razem ilość powietrza zmniejsza się, jeżeli $t' > t$, o $\frac{t' - t}{273 + t' - t}$ część.
93. $p = 0{,}77$ Atm.
94. $d_0 = 0{,}0012547$.
95. $Q = 24273$ kal.
96. $Q = 170000$ kal.
97. $t = 27^0{,}2$.
98. 0,79 litr.
99. $t = 30^0{,}96$.
100. $t = 17^0$.
101. 35,25 gr.
102. 7,8 gr.
103. $c = 0{,}625$.
105. $t = 1168^0{,}682$.
106. $Q = 146488$ kal.
107. 1505 gr.
108. 62400 kal.
109. $Q = 24308{,}252$ kal.
111. 3,45 %.
112. $Q = 7763{,}7$ kal.
113. $m = 101{,}4$ gr.
114. $h = 749{,}19$ mm.
115. O 61,36 mm.
116. Nie jest nasycona. Nie daje się obserwować.
117. Należy zagotować wodę w zamkniętym kociołku pod większem ciśnieniem.
120. 47 %.
122. W niskiej temperaturze — chłodniejsze, w wysokiej — cieplejsze.
125. $Q = 162 \cdot 10^6$ kaloryj.
126. Stopi się lodu 378181,8 gr, skropli się pary 55570 gr.
129. $u = 331848$ dżul.
130. O $0^0{,}7317$.
131. $v = 36137 \frac{\text{cm}}{\text{sek}} = 361{,}37 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$.
132. Dzielność 3674 wat. = 5 HP (w przybliżeniu).
133. 42 %.
134. 52,71 Kg.

SKOROWIDZ.