

p.5326

128072 12
WYDAWNICTWA M. ARCTA

Jedyna droga do wynalazków

to gruntowne poznanie rzeczy istniejących.

Szczególnie w dziedzinie techniki należy dobrze poznać zasady budowy każdego mechanizmu i potem dopiero można myśleć o jego udoskonaleniu. W tym celu najlepiej budować

modele techniczne.

Wzory takich modeli zamieszczone są w wymienionych poniżej wydawnictwach, na podstawie których każdy może

zbudować własnymi siłami:

BALON PARSEWALA. Model kolorowy, rozkładany balonu systemu niesztynnego, z tekstem objaśniającym M. Heilperna.

BALONY I AEROPLANY. Wykład popularny głównych zasad aeronautyki i awjatyki. Napisał M. Heilpern. Z 100 rysunkami.

DYNAMO - MASZYNA. Plastyczny model kolorowy, rozkładany, ułatwiający poznanie wnętrza maszyny. Dla szkół przemysłowych i samokształcących się. Z objaśnieniami i 42 rysunkami w tekście. Podług K. Volkerta spolsz. K. Jeziorkowski.

LOKOMOTYWA. Plastyczny model kolorowy, rozkładany, ułatwiający poznanie wnętrza maszyny, z objaśnieniami. Podług K. Volkerta. Spolszczył J. Miklaszewski.

SAMOŁOT BLERIOTA. Model rozkładany kolorowy jednopłaszczyznowca (monoplana), z tekstem objaśniającym M. Heilperna.

SAMOŁOT BRACI VOISIN. Model rozkładany kolorowy dwupłaszczyznowca (biplanu), z tekstem M. Heilperna.

SAMOCHOĐ. Model kolorowy rozkładany, z tekstem objaśniającym i 10 rysunkami w tekście.

SILNIK 70-konny DIESL'A. Model kolor. rozkładany, z tekstem M. Heilperna.

STATEK PAROWY. Plastyczny model kolorowy rozkładany, z tekstem objaśniającym.

TRAMWAI ELEKTRYCZNY. Plastyczny model kolor. rozkl. z tekstem objaśn.

ZASADY LOTNICTWA. Napisał F. Laskowski. Z 100 rysunkami w tekście.

Obejrzeć i nabyć można we wszystkich księgarniach.

J. WOJNICZ-SIANOŻECKI

Det. 145

FIZYKA

W ZAKRESIE SZKOŁY ŚREDNIEJ

CZĘŚĆ I

MECHANIKA I CIEPŁO

Z 257 RYSUNKAMI I 9 PORTRETAMI

WYDANIE PIĄTE



WYDAWNICTWO M. ARCTA W WARSZAWIE
POZNAŃ - LWÓW - RÓWNE - LUBLIN - ŁÓDŹ - WILNO

JAN WOJNICZ-SIANOŻĘCKI

Wojnicz
J. Wojnicz

FIZYKA

por. 145

W ZAKRESIE SZKOŁY ŚREDNIEJ

CZĘŚĆ I

CZYTELNIA

MECHANIKA I CIEPŁO

Z 257 RYSUNKAMI I 9 PORTRETAMI

WYDANIE PIĄTE POPRAWIONE I UZUPEŁNIONE
PODŁUG PROGRAMU SZKÓŁ PAŃSTWOWYCH



1922

WYDAWNICTWO M. ARCTA W WARSZAWIE
POZNAŃ — LWÓW — LUBLIN — ŁÓDŹ — WILNO

PRZEDMOWA DO WYDANIA PIERWSZEGO.

Oddając książkę niniejszą do użytku szkół polskich, autor świadom jest nie tylko ważności i trudności podjętego przez siebie zadania, ale również wielu braków i błędów, których nie mógł uniknąć przy jego rozwiązaniu, a do których w części przyczynił się pośpiech wydania.

Większość pedagogów polskich dawno już odczuwa brak racjonalnie ułożonego podręcznika fizyki, który byłby w stanie z jednej strony czynić zadość wymaganiom postępu tej niezwykle żywej i bogatej gałęzi przyrodoznawstwa, z drugiej zaś strony — wymaganiom naszych szkół średnich o rozmaitych programach.

Stworzyć podręcznik o charakterze uniwersalnym, przystosowanym do wszystkich wymagań, niepodobna, tem bardziej, że ograniczona i szczupła zazwyczaj ilość godzin, przeznaczonych na fizykę w planach szkół naszych, nie pozwala zastosować jedyne racjonalnego w danym razie systemu koncentrów: przygotowawczego i systematycznego. Godząc się więc tylko na systematyczny kurs fizyki, zwykle rozpoczynany w klasie V albo VI, autor układa podręcznik niniejszy tak, aby czerpać z niego mogli nauczyciele i uczniowie o najrozmaitszej skali wymagań. W celu ułatwienia wyboru materiału szczególnie mniej ważne zostały odbite czcionkami drobnymi, natomiast odpowiednio grubszymi czcionkami lub kursywą szczególnie najbardziej ważne, np., wzory i sformułowania główniejszych praw i zasad fizyki.

Autor pod wpływem odbywanych niegdyś studjów technicznych hołduje zasadzie utylitarnej w nauczaniu fizyki; to też stara się jak najczęściej wprowadzać młodego czytelnika w dziedzinę zdobyczy praktycznych tej tak bardzo dziś ważnej gałęzi wiedzy; unika, gdzie tylko można, fikcyj naukowych, podając szczególnie zjawisk fizycznych i praw, niemi rządzących, w oświetleniu konkretnem, potwierdzając je również na konkretnych przykładach i doświadczeniach.

Ta pierwsza część podręcznika może zastrasza nieco swoją niezwykle obszernością, jakkolwiek obliczona jest na wyłożenie normalnie w ciągu

5 kwartałów szkolnych. Może zbyt jest przeciążona pierwiastkiem naracyjnym i historycznym, ale w takim razie nauczycielowi fizyki pozostawia się wybór materiału ad libitum. W klasach, przepełnionych uczniami, program z natury rzeczy trzeba uszczuplać, ale tam, gdzie młodzież w wyższych klasach szkół jest nieliczna, a w dodatku zarówno nauczyciel, jak i uczniowie traktują przedmiot z zapałem, nie sądzę, aby ilość podanego w tej książce do przyswojenia materiału przekraczała granice możliwości. Z własnej kilkoletniej praktyki i doświadczenia w szkołach prowincjonalnych wiem, iż materiał ten nie jest za duży. A jeżeli naprawdę jest za duży, niech książka niniejsza zaapeluje do kierowników szkół naszych, aby fizyce udzielili nieco więcej miejsca i czasu w planach szkolnych, bodaj przez wzgląd na potężny rozwój i znaczenie tej nauki w czasach dzisiejszych.

Źródłami przy opracowaniu książki służyły następujące dzieła:

Prof. A. Witkowski. Zasady fizyki, t. I i II.

Grotowski, Werner, Landau, Sadzewiczowa. Z dziejów rozwoju fizyki, t. I.

Lord Boys. Bańki mydlane. Tłum. Biernackiego.

Prof. Dr. Poske. Unterstufe und Oberstufe d. Naturlehre.

Prof. G. Mañler. Physikalische Aufgabensammlung.

P. La Cour. J. Appel. Die Physik auf Grund ihrer geschichtlichen Entwicklung für weitere Kreise in Wort und Bild dargestellt.

K. Krajewicz. Uczebnik fizyki i niektóre inne.

Autor wyraża najżywszą swą wdzięczność Komisji przy Sekcji Przyrodniczej Stow. Naucz. Polsk. w osobach pp. Męczkowskiej, Heilperna, Arlitewicza i Dr. Wernera za łaskawe przejrzanie znacznej części rękopisu książki niniejszej i udzielenie wielu cennych rad i wskazówek, do których autor nie omieszkał się zastosować; na przyszłość zaś liczy ze strony ogółu kolegów-pedagogów na dalsze wskazówki i uwagi, jakie się następcą przy korzystaniu z tej książki. Zbiorowa ta pomoc będzie miała duże znaczenie przy opracowaniu następnych części podręcznika i ewentualnie nowej edycji niniejszej części pierwszej. O pomoc tę w imię przysporzenia rodzimemu szkolnictwu książki naprawdę dobrej i użytecznej usilnie prosi.

Autor.

Warszawa, w lipcu 1914 r.

PRZEDMOWA DO WYDANIA DRUGIEGO.

Nakład wydania pierwszego części I podręcznika niniejszego został wyczerpany w ciągu niespełna 2 lat i zaledwie w kilka tygodni po ukończeniu ostatniej części III.

Wydanie drugie zaskoczyło mię, zanim zdążyłem rozejrzeć się należycie w wielu brakach i wadach wydania poprzedniego i zanim krytyka fachowców wypowiedziała się o niem szczegółowo i wszechstronnie. Dlatego też w obecnym nowym wydaniu sprostowałem jedynie główne usterki i uwzględniłem tylko te nieliczne, ale najwięcej cenne wskazówki krytyki, które doszły do mojej wiadomości już to z literatury perjo-dycznej (artykuł p. M. Grotowskiego w „Wektorze” № 7 i 8 za rok 1914/15), już to były mi łaskawie udzielone przez kilku kolegów-fizyków osobiście.

Autor.

Warszawa, w listopadzie 1916 r.

PRZEDMOWA DO WYDANIA TRZECIEGO.

Niniejsze wydanie książki zostało z bardzo nieznacznymi zmianami przedrukowane z wydania drugiego. Pewne uzupełnienie stanowią portrety niektórych wybitniejszych fizyków, umieszczone w tekście, oraz pewna liczba nowych zadań na końcu książki.

Autor.

Warszawa, w grudniu 1917 r.

PRZEDMOWA DO WYDANIA CZWARTEGO.

Wydanie niniejsze jest poza nieznacznymi zmianami tekstu prawie całkowitem powtórzeniem poprzedniego wydania trzeciego.

Autor.

Warszawa, w listopadzie 1918 r.

PRZEDMOWA DO WYDANIA PIĄTEGO.

Wydanie niniejsze zbiegło się z chwilą ogłoszenia nowych programów Ministerstwa Wyznań Religijnych i Oświecenia Publicznego dla wyższych klas gimnazjum. Jakkolwiek programy te noszą charakter tymczasowy i mogą ulec w przyszłości pewnym zmianom w swych szczegółach, jednak zostały niezwłocznie wprowadzone w życie nie tylko w szkolnictwie państwowem, ale nawet w większości szkół prywatnych.

Przystosowując jak można najbliżej do tych nowych programów część I niniejszego podręcznika, autor uwzględniał przede wszystkim potrzeby szkół o kierunku matematyczno-przyrodniczym, dla których to szkół książka niniejsza w całości swej stanowi kurs klasy czwartej. Co się tyczy szkół pozostałych trzech typów: humanistycznego, neohumanistycznego i klasycznego, to materiał, zawarty w tej książce podlega znacznemu skróceniu z pominięciem szczegółów drugorzędnych i stanowi tylko część kursu klasy szóstej tych szkół, przybывая bowiem do tego jeszcze krótkie wiadomości z akustyki.

W porównaniu z wydaniem poprzedniemi wydanie obecne książki zawiera parę rozdziałów nowych (O pomiarach fizycznych i o odkształceniach, wywołanych działaniem sił), natomiast, zostały z tego wydania usunięte pewne rozdziały z mechaniki i ciepła, które podług nowych programów powinny stanowić uzupełnienia na poziomie wyższym i przeznaczone są na trzeci rok nauczania fizyki (kurs klasy szóstej szkół matematyczno-przyrodniczych). Rozdziały te w odpowiedniej przeróbce ukażą się w nowym wydaniu części III podręcznika.

Uzupełnienie części niniejszej stanowią wykresy geometryczne funkcji ruchu, umieszczone w kinematyce zgodnie z wymaganiami nowych programów. Te ilustracje geometryczne zjawisk ruchu przewidują odpowiednie przygotowanie teoretyczne uczniów z dziedziny wiadomości o funkcjach, co zresztą obowiązuje dziś powszechnie w programach gimnazjalnych, poczynając już od klasy trzeciej. Nadto uzupełnienie stanowią wzmianki o zjawiskach sublimacji, lodowców, gejzerów i prądów morskich, również wymagane podług programów urzędowych.

W listopadzie 1921 r.

WSTĘP.

1. Przyrodoznawstwo. Wszystko to, z czego zbudowany jest świat nasz w całym nieprzebranym bogactwie przeróżnych okazów natury żywej i martwej, określamy jednym powszechnym mianem—*materji*. Materję możemy rozpoznawać i badać zapomocą pięciu zmysłów naszego ciała: wzroku, słuchu, powonienia, dotyku i smaku.

Materja nie tylko istnieje w świecie w najrozmaitszych swych postaciach, ale ulega nadto najrozmaitszym zjawiskom, które odbywają się podług praw ścisłych, odwieczne i niezmiennie panujących w naturze. Badanie tych praw stanowi przedmiot obszernej dziedziny wiedzy ludzkiej, zwanej wogóle *przyrodoznawstwem*.

Nauka przyrodoznawstwa obejmuje liczne działy i gałęzie, posiadające swe odrębne nazwy i obejmujące pewne odrębne dla każdej z nich kategorie przedmiotów i zjawisk przyrody. Na całokształt przyrodoznawstwa składają się więc takie odosobnione, a takie już dziś bogate i obszerne jego gałęzie, jak: zoologja, botanika, mineralogja i t. d. ze wszystkimi swemi specjalnemi odgałęzieniami, jak: anatomja, fizjologja, biologja i t. d.; do tego też działu wiedzy włączamy dwie najbardziej chyba wzbogacone i rozwinięte nauki przyrodnicze: *fizykę* i *chemję*. Tylko ta zachodzi różnica, że gdy pierwsze z wymienionych działów przyrodoznawstwa z konieczności trzymają się często strony opisowej, zajmują się w znacznym stopniu tylko porządkowaniem, systematyzowaniem zjawisk i przedmiotów, wykrywaniem celowości i łączności ich pomiędzy sobą, fizyka i chemja, natomiast, mają na celu badanie zjawisk, dotyczących bezpośrednio samej materji, bez względu na jej formy, odmiany, znaczenie, celowość w życiu i t. p. Fizykę i chemję zaliczamy nadto do rzędu nauk przyrodniczych *ścisłych*, a to dlatego, że obie te gałęzie wiedzy opierają się przeważnie na środkach i metodach najściślejszej ze wszystkich nauk—*matematyki*. Znaczne udoskonalenia, jakie w ostatnich czasach osiągnięto w budowie przyrządów i instrumentów fizycznych i chemicznych, coraz bardziej zbliżają obie te nauki do takich pojęć i takich wielkości, które dokładne, teoretyczne swe uzasadnienie i miarę znajdują tylko w matematyce.

2. Fizyka a chemja. Wyraźna granica między dziedziną zjawisk fizycznych a chemicznych nie istnieje. Dwie te dziedziny o tyle tylko różnią się od siebie, że przedmiotem badań fizyki są zjawiska materialne, nie wymagające wglądania w rdzenną wewnętrzną budowę i własności samej materji. Chemja, natomiast, za główny swój cel uważa właśnie badanie owej wewnętrznej istoty materji, oraz różnorodnych jej przeobrażeń, pierwiastków i związków. Poza tem jednak w dzisiejszym stanie swego rozwoju fizyka i chemja opierają się już na wielu wspólnych prawach i zasadach. Istnieje znaczna ilość zjawisk, których badanie wymaga wiadomości zarówno z zakresu fizyki, jak i chemji; powstała stąd specjalna, bardzo już dziś bogata i rozwinięta gałąź przyrodoznawstwa — chemja fizyczna.

3. Metody i środki badań fizycznych. Badanie i poznawanie praw, rządzących zjawiskami fizycznymi, dokonywane są głównie zapomocą dwóch zasadniczo różniących się między sobą metod naukowych: **indukcyjnej**, inaczej **empirycznej**, i **dedukcyjnej**, inaczej **apriorycznej**.

Metoda indukcyjna, opierając się na pewnym z góry powziętem przypuszczeniu czyli hipotezie co do istoty danego zjawiska, wymaga dokonania całego szeregu związanych z niem badań empirycznych, czyli doświadczalnych. Badania polegają na tem, iż dane zjawisko zostaje sztucznie odtworzone zapomocą odpowiednich środków i przyrządów w pracowniach badaczy oraz wymierzone zapomocą odpowiednich metod i instrumentów mierniczych. Nagromadzony w ten sposób materiał doświadczalny podlega następnie dalszemu opracowaniu z użyciem wzorów i rachunków matematycznych, po wielokrotnych zaś i wiarogodnych sprawdzeniach może doprowadzić w rezultacie do potwierdzenia uczynionej hipotezy lub odkrycia pewnych nowych **praw**, rządzących zjawiskiem badanem. Jest to zwykła, najczęściej stosowana w fizyce metoda naukowa.

Metoda druga jest jakby odwrotnością poprzedniej, ale ze następczą więcej trudności, stąd rzadziej jest stosowana w fizyce, niż metoda indukcyjna. Dedukcja naukowa jest zwykle płodem pracy myślowej wyjątkowo uzdolnionych i genialnych badaczy, którzy, ogarniając jednym przenikliwym rzutem myśli szereg warunków i stanów, towarzyszących pewnym zjawiskom, odkrywają odrazu w twórczej swej wyobraźni istotę prawa, któremu te zjawiska ulegają. W drodze takiej to właśnie genialnej dedukcji myślowej zostało, między innymi, odkryte przez wielkiego uczonego angielskiego Newtona ¹⁾ prawo powszechnego ciążenia (grawitacji). Prawo to odrazu rozwiązało odwieczne zagadnienie, dotyczące zjawisk spadania ciał na ziemię, oraz ruchu obrotowego ziemi i innych planet dokoła słońca.

¹⁾ Czytaj: Njutona.

4. W dziejach rozwoju fizyki zmieniały się zarówno czasy i ludzie, jak środki i narzędzia badań fizycznych. Starożytnym mędrcom greckim, słynnym perypatetykom, wystarczały niegdyś proste, powierzchowne obserwacje zjawisk przyrody i nauczanie na rynkach lub placach miejskich bez żadnych doświadczeń i przyrządów. W czasach dzisiejszych, natomiast, fizycy w swych badaniach naukowych i nauczaniu zmuszeni są posilkować się metodami, środkami i narzędziami, które wymagają częstokroć zdumiewającej pomysłowości, kunsztu, precyzji i wreszcie kosztów, niezbędnych do ich obmyślenia, wykonania i użycia.

5. Podział fizyki. Fizyka, dzięki zbiorowej pracy licznych pokoleń badaczy, poczynając od czasów starożytnych aż do dni naszych, nagromadziła już ogromny dorobek naukowy. Mimo pozornej różnorodności dziedzin, do których należą rozmaite zjawiska fizyczne, mimo, iż do niedawna poszczególne te dziedziny ściśle od siebie odgraniczano, jednak badania czasów najnowszych wykazały, że niema takich zjawisk fizycznych w przyrodzie, a więc i takich działów fizyki, pomiędzy którymi nie istniałby pewien związek lub pokrewieństwo. Owa wspólność i pokrewność praw fizycznych w przyrodzie nie pozwala jednak ująć olbrzymiego materiału, nagromadzonego w fizyce, w jedną całość, zachodzi zatem konieczność grupowania go w pewne działy, idące po sobie w ścisłym porządku i łączności.

Różnorodne ciała fizyczne w przyrodzie posiadają następujące własności ogólne: **niezniszczalność**, **rozciągłość**, **nieprzenikliwość**, **podzielność** i **ważkość**.

6. Niezniszczalność materji wypływa z zasadniczego prawa przyrody, mianowicie **prawa zachowania materji**. W przyrodzie żaden rodzaj materji nigdy i nigdzie nie ginie, ani też z niczego nie powstaje, może jedynie ulegać najrozmaitszym przeobrażeniom natury fizycznej lub chemicznej.

Jakkolwiek prawo to było wygłaszane przez niektórych uczonych już w odległej starożytności, zyskało jednak szereg dowodów doświadczalnych i zostało wprowadzone do nauki, jako prawo zasadnicze, dopiero w końcu wieku XVIII przez uczonego francuskiego Lavoisier'a, którego prace zapoczątkowały rozwój chemji naukowej.

7. Rozciągłość materji oznacza, że wszelkie, zarówno duże, jak i najdrobniejsze ciała materialne zajmują pewną przestrzeń geometryczną trójwymiarową; ciała są więc w znaczeniu geometrycznem *bryłami*, do których mogą być stosowane prawa i zależności matematyczne z zakresu geometrii. Każde ciało fizyczne posiada swoje wymiary linjowe, powierzchnię i wreszcie objętość.

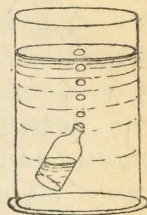
8. Nieprzenikliwość materji pozostaje w ścisłym związku z własnością poprzednią i oznacza, że jeżeli pewne ciało materjalne w danym momencie czasu zajmuje pewne miejsce w przestrzeni, miejsca tego w tym samym czasie nie może zająć żadne inne ciało. Własność tę można wykazać zapomocą następujących prostych doświadczeń:



Rys. 1.

a) do przestrzeni, zajętej przez ołówek, nie można wprowadzić jednocześnie obsadki pióra;

b) po wrzuceniu kamienia do naczynia z wodą, poziom podnosi się, gdyż pewna ilość wody zostaje wyparta przez kamień (rys. 1).



Rys. 2.

c) po zanurzeniu pustej butelki do wody powietrze, jako ciało gazowe, wydobywa się z niej w postaci baniek w miarę, jak butelka wypełnia się wodą, wchodzącą na miejsce powietrza (rys. 2).

Będąc nieprzenikliwymi, wszystkie ciała materjalne mogą jednak ulegać w pewnym, mniejszym lub większym stopniu kurczeniu się, względnie rozszerzaniu pod wpływem różnych działających na nie czynników fizycznych

Przykłady: wbijanie gwoździ w ściany, rozciąganie gumy, ściskanie gąbki, wydłużanie się słupka rtęci w termometrze przy ogrzewaniu, a kurczenie się przy oziębianiu i t. p.

9. Podzielność jest to zdolność materji do dzielenia się na coraz to drobniejsze ilości.

Do jakiego stopnia otrzymywane przez podzielność cząstki materji mogą stać się drobnymi, świadczy następujący szereg przykładów:

a) ziarenka piasku przez silne tłuczenie, a następnie rozżarzanie i wrzucanie do wody mogą być doprowadzone do wymiarów mniejszych od 1 mikrona (1 mikron = $\frac{1}{1000}$ milimetra).

b) jeden miligram ($\frac{1}{1000}$ grama) fuksyny może wyraźnie zabarwić po rozpuszczeniu 100 litrów wody;

c) piżmo, które obecność swą w powietrzu zdradza na znacznej odległości silnym zapachem, umieszczone na czułej wadze chemicznej, przez długi czas nie wykazuje najmniejszych strat swej ilości.

Godząc się z prawem zachowania materji, nie można godzić się jednocześnie z przypuszczeniem, że materja przez podzielność swych cząstek może być doprowadzona do zupełnego zaniku. Istnieje napewno kres, poza którym materja jest już niepodzielną w znaczeniu fizycznym. Owe najmniejsze, niepodzielne już żadnymi środkami fizycznymi ilości materji dostały nazwę **cząsteczek** albo **molekuł**. Wszelkie rodzaje materji zbudowane są z molekuł, poprzedziła-

nych między sobą niezmiernie drobnymi odstępami. Tym sposobem wszystkie ciała są w mniejszym lub większym stopniu *porowate*. Cząsteczki utrzymują się przy sobie, a przez to samo i ciała zachowują niezmienny swój kształt i objętość dzięki działaniu między molekułami sił wzajemnego przyciągania się czyli sił spójności (kohezji).

Badanie zjawisk czysto chemicznych doprowadza do wniosku, że molekuły zbudowane są z jeszcze drobniejszych, pierwotnych fragmentów czyli działek materji, zwanych *atomami*, które podczas reakcyj chemicznych mogą wchodzić w połączenie z atomami innych pierwiastków, tworząc cząsteczki najrozmaitszych związków chemicznych ¹⁾.

Ze stanowiska więc fizyki będziemy uważali za kres podzielności materji molekuły czyli cząsteczki. Zależnie od wzajemnego ich położenia oraz natężenia sił spójności, działających pomiędzy nimi, materja może istnieć w trzech wybitnych stanach skupienia: stałym, płynnym i lotnym; może istnieć nadto stan pośredni między stałym a płynnym. Stany skupienia materji zwiemy inaczej jej *fazami*.

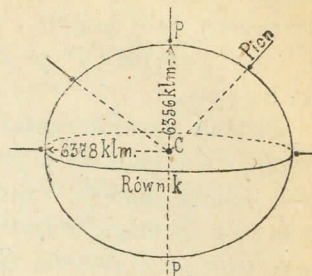
Ponieważ materja może ulegać działaniu sił nie tylko na niezmiernie małych odległościach międzycząsteczkowych, ale nawet na takich olbrzymich i niczem niezapełnionych odległościach, jakie dzielą, na przykład, słońce od ziemi i planet; ponieważ nadto niektóre inne zjawiska, na przykład światło, mogą się przenosić i być dostrzegane z jeszcze większych obszarów próżni, dzielących nas od tak zwanych gwiazd stałych — stąd w umysłach nowoczesnych badaczy naukowych powstało przekonanie, że zarówno drobne przerwy między molekułami materji, jak i olbrzymie przestrzenie, dzielące od siebie różne światy czyli bryły kosmiczne, są wypełnione jakąś osobliwą, ale prawdopodobnie również materjalną substancją, której dano nazwę *eteru kosmicznego*. Nie mogąc w sposób niezbity stwierdzić obecności tej substancji i mierzyć jej ilościowo, fizycy zdają sobie jednak dokładnie sprawę z wielu jej własności i mogą, na zasadzie tych własności, znakomicie tłumaczyć cały szereg zagadkowych lub nieznanych dotąd zjawisk fizycznych.

10. Ważkość materji. Wszelka materja, znajdująca się na ziemi, ulega sile przyciągania, która powoduje już to ciśnienie ciał na podstawy, już to spadek ku ziemi ciał, pozbawionych podparcia.

¹⁾ W ostatnich czasach stwierdzono naukowo szereg faktów, dowodzących, że uważane dotąd za zupełnie niepodzielne atomy niektórych pierwiastków materji mogą jednak ulegać dalszemu rozkładowi, odczczepiając od siebie jeszcze drobniejsze fragmenty, zwane elektronami.

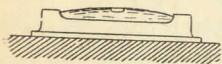
Wielkość siły, jaką każde dane ciało materjalne przyciągane jest ku ziemi, zowiemy *ciężarem*¹⁾ tego ciała,

kierunek zaś tej siły w każdym miejscu na ziemi można oznaczyć zapomocą pionu (rys. 3), czyli nici z wiszącym nieruchomo na jej końcu ciężarem. Kierunki wszystkich pionów, a więc i wszystkich sił ciężkości przecinają się w pewnym środkowym punkcie *C* kuli ziemskiej (rys. 4). Kierunek prostopadły do pionu zowiemy poziomym,



Rys. 4.

wyznaczyć zaś go można z położenia spokojnej powierzchni cieczy lub zapomocą przyrządu, zwanego libelą (rys. 5). Jest to rurka szklana, lekko zakrzywiona i napełniona łatwo ruchliwą cieczą (na przykład alkoholem); niewielki, pozostający w rurce pęcherzyk pary ma dążność do ustawiania się w najwyższym punkcie tej rurki; o ile przytem podstawa przyrządu przybiera kierunek poziomy, pęcherzyk ustawia się na środku rurki pomiędzy dwiema kreskami.



Rys. 5.

11. Ciężar czyli siła ciężenia ciała ku ziemi, może się zmieniać. Prawo powszechnego ciężenia orzeka, że wielkość ciężaru ciała jest zależna od odległości ich względem punktu środkowego ziemi; im ta odległość jest mniejszą, tem ciężar staje się większym, i przeciwnie²⁾.

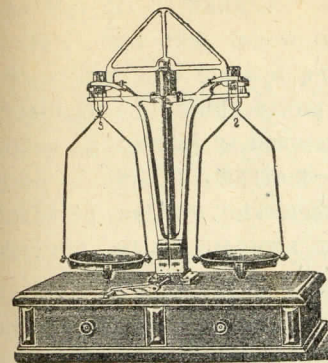
To znaczy, że wyniesienie pewnego ciała na znaczną wysokość do góry powinno ciężar zmniejszać, gdy opuszczenie w głąb ziemi — zwiększać. Dokładne pomiary powierzchni globu ziemskiego wykazały, że na biegunach *P* (rys. 4) jest on cokolwiek spłaszczony, na równiku zaś rozszerzony; odległość powierzchni ziemi od jej środka w pobliżu biegunów wynosi około 6356 kilometrów, w pobliżu zaś równika jest większa prawie o 22 kilometry i wynosi tam 6378 kilometrów. Z takiego więc kształtu ziemi wynika, że ciężar ciała na biegunach powinien być nieco większy, niż na równiku, ściśle zaś pomiary fakt ten potwierdzają (ciało, ważące na równiku 200 gramów, po przeniesieniu na bieguny, wykazuje ciężar 201 gramów).

Taką drobną zmianę w ciężarze ciała można byłoby wykazać zapomocą bardzo czułej wagi, ale nie talerzykowej (rys. 6), lecz sprężynowej (rys. 7).

¹⁾ Zwany często w mowie potocznej mylnie „wagą”.

²⁾ Matematyczne sformułowanie tego prawa dane będzie później.

erwsza bowiem z nich, o ile jest rzetelną, pozwala tylko porównywać z sobą dwa ciężary: ciała ważonego i ciężarków (odważników), nacechowanych podług pewnych jednostek wagowych.



Rys. 6.

Ciężary te pozostaną równe sobie w każdym miejscu na ziemi, nie można więc na takiej wadze wykazać żadnych zmian wielkości każdego z tych ciężarów zosobna; można byłoby zaś to uczynić zapomocą bardzo czułej wagi sprężynowej (rys. 7), której wskazania są zależne tylko od wielkości ciężaru, czyli od siły,



Rys. 7.

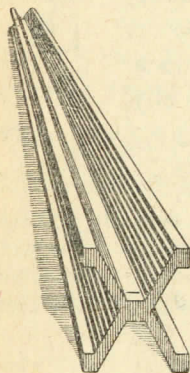
mniej lub więcej rozciągającej sprężynę po zawieszeniu na niej ciała ważonego.

O wiele dokładniej zmiany natężenia siły ciężkości dają się wykazać zapomocą wahadła, gdyż, jak to będzie wyjaśnione w jednym z dalszych rozdziałów niniejszego podręcznika, z liczby kołysań wahadła, wykonanych w pewnym czasie, może być bardzo dokładnie obliczone natężenie siły ciężkości w każdym dowolnym punkcie ziemi.

§ 1. O pomiarach fizycznych. Układ jednostek miar.

12. Ponieważ matematyka oddaje dziś nieocenione usługi przy badaniu zjawisk i praw fizycznych, wymaga zaś możliwie najdokładniejszego określania wielkości, podlegających rachunkom i działaniom matematycznym, przeto najważniejszą i niezbędną umiejętnością przy studjowaniu fizyki nowoczesnej jest znajomość pomiarów oraz niezbędnych dla ich wykonywania środków, narzędzi, metod i jednostek mierniczych. Dążąc nieustannie do możliwie najwierniejszego wyrażania mierzonych wielkości w liczbach, fizycy nowocześni potrafili doprowadzić nie tylko samą umiejętność mierzenia, ale również dokładność przyrządów mierniczych do granic tak dalekich i subtelnych, jakie mogą zadowolić niemal w zupełności wymagania matematyki. Mimo jednak osiągniętych już w tej dziedzinie znakomitych zdobyczy i udoskonaleń, badacze uczeni zawsze są świadomi tej niezbitej prawdy, że najsztudniej wykonane narzędzie lub pomiar fizyczny, jako dzieła rąk ludzkich, nigdy nie są wolne od błędów, jakkolwiek nieraz znikomo małych, matematyka zaś pozwala określać te błędy bardzo blisko.

13. Przedewszystkiem należy zapoznać się z metodami i przyrządami, służącymi do **pomiarów linjowych**: długości, szerokości, wysokości, obwodu i t. p. Nie będziemy tu, oczywiście, zastanawiali się nad miarami pochodzenia historycznego lub obyczajowego, jak: łokieć, sążeń, pręt, cal i t. p., których wielkości nie mogą być ani należycie sprawdzane, ani porównywane z jakimś jednym powszechnie obowiązującym wzorcem mierniczym. Zaznajomimy się, natomiast, z jednostką, ustaloną dziś już w całym świecie cywilizowanym—**metrem**, którego wielkość, wynoszącą $\frac{1}{10\,000\,000}$ ćwiartki obwodu kuli ziemskiej wzdłuż południka Paryskiego od równika do bieguna, określiła słynna komisja uczonych francuskich na schyłku XVIII stulecia.



Rys. 8.

Historyczny i pamiątkowy wzorec tej miary linjowej, zwany „metrem archiwowym” z wyrytym na nim znamienym napisem: „à tous les temps, à tous les peuples” przechowywany jest troskliwie w Paryżu ¹⁾. Wykonany jest ze stopu metali, nie ulegających działaniu czynników atmosferycznych (platyny z irydem) i ma przekrój (rys. 8) zabezpieczający mu niezmienną postać przy różnych zmianach ciepłoty w otoczeniu. Wymierzony jest z nadzwyczajną precyzją pomiędzy dwiema kresczkami na dnie rowka, a mimo to różni się nieznacznie od $\frac{1}{10\,000\,000}$ ćwiartki południka.

14. Metr, jako jednostka linjowa, jest zbyt duży dla pomiarów fizycznych, niezbędnem więc okazało się podzielenie tej jednostki na części drobniejsze: *decymetry* ($1 \text{ dcm} = \frac{1}{10} \text{ m}$), *centymetry* ($1 \text{ cm} = \frac{1}{100} \text{ m}$) i *milimetry* ($1 \text{ mm} = \frac{1}{1000} \text{ m}$). Zastosowanie drobnowidza (mikroskopu) oraz niesłychanie subtelnych narzędzi podzielnyczych, pozwoliło korzystać z jeszcze drobniejszych ułamków metra, zwanych *mikronami* ($1 \mu = \frac{1}{1000} \text{ mm} = \frac{1}{10\,000\,000} \text{ m}$) i wreszcie z najdrobniejszych, zwanych *milimikronami* ($1 \mu\mu = \frac{1}{1000} \mu = \frac{1}{10\,000\,000} \text{ mm}$).

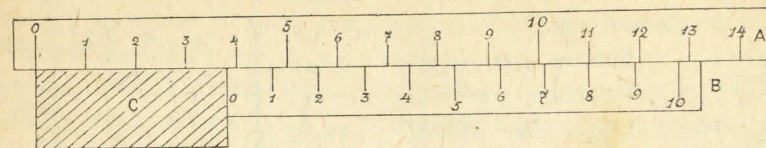
Zwykłe miarki metrowe (sztabkowe, składane lub taśmowe) mają podziałkę w centymetrach i milimetrach.

15. Jeżeli wymagany jest pomiar dokładniejszy, niż wskazuje podziałka danej miary linjowej, należy wówczas do podziałki tej dostosować tak zw. *nonjusz*, pozwalający określać dziesiąte części najmniejszych jednostek, wskazanych na podziałce miary. Przypuśćmy, na przykład, że posiadamy taką miarę linjową z podziałką tylko w centymetrach (rys. 9).

Aby można było oceniać również milimetry, sporządzamy nonjusz *B* w ten sposób, aby *9 cm* skali *A* odpowiadały *10* działkom

¹⁾ W Biurze Międzynarodowym Miar i Wag.

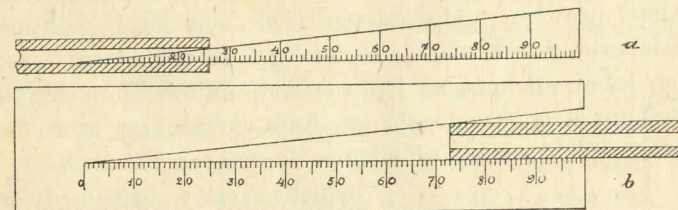
nonjusza *B*. Każda działka nonjusza jest wówczas mniejsza od każdej działki skali *A* o $\frac{1}{10} \text{ cm} = 1 \text{ mm}$.



Rys. 9.

Chcąc zmierzyć długość przedmiotu *C* z dokładnością do *1 mm*, umieszczamy jeden jego koniec wprost zera na skali *A*, do drugiego zaś końca przykładamy zerową działkę nonjusza. Zauważymy przytem, jak wskazuje rys. 9, że działka 8-ma nonjusza najlepiej zgadza się z pewną działką (11-tą) skali *A*, co oznacza, że odległość między tą działką a prawym końcem przedmiotu *C* wynosi 8 działek nonjusza. Odległość ta różni się o *0,8 cm* czyli *8 mm* od *8 cm* skali *A* między działkami 3-cią a 11-tą. Oznacza to, że długość przedmiotu *C* wynosi *3,8 cm* = *38 mm*. Na podobnej zasadzie oparte są również nonjusze przy dokładnych kątomierzach.

16. Do mierzenia przedmiotów bardzo małych, naprz. średnic zewnętrznych lub wewnętrznych rurek, drutu i t. p. można z powodzeniem posługiwać się miarką klinową wyciętą (rys. 10 a) lub wciętą (rys. 10 b). Miarkę tę można sobie łatwo sporządzić z papieru milime-

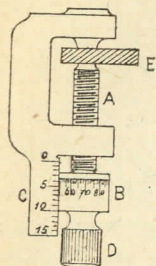


Rys. 10.

trowego, na którym wykreśla się starannie, a następnie wycina się trójkąt prostokątny o przyprostokątnych, wynoszących *100 mm* i *10 mm*. Wycięty klin trójkątny *a* może wówczas służyć do mierzenia średnic wewnętrznych, wycięcie zaś klinowate *b*—do mierzenia średnic zewnętrznych, w obu przypadkach z dokładnością do $\frac{1}{10} \text{ mm}$. Jak wskazuje rys. 10, średnica wewnętrzna rurki po wsunięciu do niej klina *a* mierzy *2,6 mm*, średnica zaś zewnętrzna tej samej rurki, wsuniętej do wycięcia klinowatego *b*, mierzy *7,3 mm*.

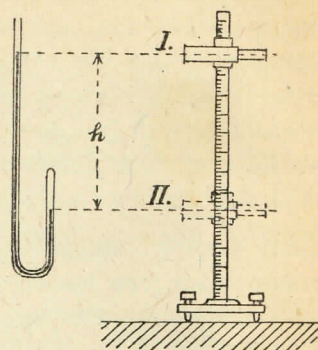
Jeszcze wyższą dokładność mierzenia przedmiotów cienkich osiąga się przy użyciu *mikrometru* (rys. 11) śrubowego. Składa się on ze

śruby A połączonej z bębenkiem B , na powierzchni którego wykonana jest podziałka zwykle na 100 części. Każdy obrót (skok) śruby A za pomocą główki D przesuwają śrubę i bębenek o 1 mm względem skali C . Części zaś milimetra dziesiąte i setne wskazuje podziałka na bębenku B , którego obwód podzielony jest na 100 części. Śruba A wkręcana jest dopóty, dopóki nie dotknie przedmiotu mierzonego E .



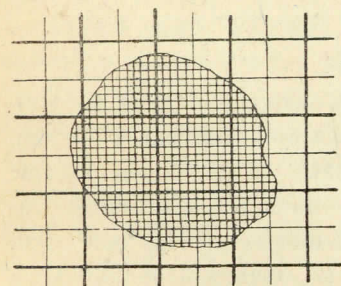
Rys. 11.

17. Do wykonywania pomiarów linjowych w kierunku pionowym, zwłaszcza zdaleka służy przyrząd, zwany *katetometrem* (rys. 12). Skala jego, z dokładną podziałką milimetrową ustawiona jest pionowo. Przesuwa się po niej nonjusz wraz z lunetą. Nastawiając tę lunetę możliwie dokładnie, na poziom rtęci w rurce manometrycznej u góry (I) i u dołu (II), można zmierzyć odległość h między obydwoma poziomami.



Rys. 12.

18. Wyznaczone z tą lub inną dokładnością wymiary linjowe danego przedmiotu pozwalają obliczyć jego **powierzchnię**, jednak tylko w przypadku, gdy przedmiot ma kształt jednej ze znanych foremnych brył geometrycznych, naprz. sześcianu, prostopadłościanu, graniastosłupa lub ostrosłupa prostego, walca, stożka i wreszcie kuli. Również można obliczyć wielkość powierzchni pewnej części przedmiotu, naprz. jednej jego ściany, jeżeli wiadome są jej wymiary linjowe oraz kształt jednej ze znanych figur geometrycznych: kwadratu, prostokąta, równoległoboku, trapezu, trójkąta i wreszcie wielokątów foremnych lub koła.



Rys. 13.

W użyciu są również specjalne i bardzo precyzyjne przyrządy do mierzenia powierzchni, zwane *planimetrami*. Urządzenie ich jednak może być poznane jedynie za pomocą dość złożonych rozważań matematycznych, zbyt trudnych do zrozumienia w kursie niniejszym.

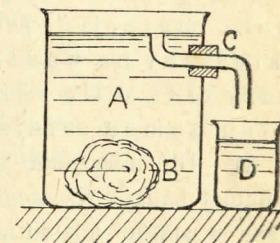
19. Znalezione w ten lub inny sposób wymiary linjowe przedmiotu mogą posłużyć nadto do obliczenia jego **objętości**, czyli przestrzeni, którą zajmuje dany przedmiot. Jest to zupełnie możliwe i łatwe do wykonania w przypadku, gdy przedmiot jest bryłą geometrycznie foremną. Jeżeli niektóre wymiary, np. równoległe krawędzie prostopadłościanu nieznacznie różnią się między sobą, można wówczas wziąć ich średnią arytmetyczną i traktować bryłę jako zupełnie foremną i mającą takie właśnie średnie wymiary linjowe.

W przypadku, gdy bryła jest geometrycznie nieforemna, objętość jej może być wymierzona bezpośrednio zapomocą tak zw. *cylindra mierni-*



Rys. 14.

czego (mensury) (rys. 14) z podziałką, wskazującą objętość w cm^3 albo mm^3 . Cylinder napełnia się do pewnej wysokości wodą, albo inną cieczą, w której dane ciało nie rozpuszcza się. Zanotowawszy wysokość poziomu cieczy, wrzucamy to ciało i określamy jego objętość z podniesienia się poziomu cieczy w cylindrze. W braku



Rys. 15.

tego cylindra można posilkować się naczyniem A z rurką zlewną C (rys. 15), utrzymując stały poziom cieczy w naczyniu A . Po wrzuceniu ciała badanego B zbiera się wypartą przez nie ciecz w naczyniu B , gdzie też można zmierzyć jej objętość, jeżeli naczynie posiada odpowiednią podziałkę albo też zważyć tę ciecz i z otrzymanego ciężaru obliczyć objętość, znając ciężar jednostki objętości cieczy.

20. Prócz pomiarów linjowych, powierzchniowych i objętościowych ważne są w fizyce pomiary, mające na celu określenie ilości zawartej w ciałach materji. Ilość tę nazywamy **masą** danego ciała. Jest to pojęcie bardzo ważne, zrozumiemy je jednak należycie dopiero po zapoznaniu się z pewnymi prawami mechaniki, stanowiącej najbliższy rozdział fizyki. Obecnie wystarczy jedynie wiedzieć, że miarą masy danego ciała jest opór, jaki ono stawia przy wprowadzeniu jego w ruch ze stanu spoczynku, albo też przy zatrzymywaniu, jeżeli jest w ruchu. Każdy z nas wie, mianowicie, z doświadczenia życiowego, że, naprzykład, wagon kolejowy albo zwykły wóz tem trudniej jest wprowadzić w ruch, albo powstrzymać w ruchu, im większy jest ładunek tego wagonu czy wozu, a właśnie ów ładunek łącznie z samym wagonem czy wozem stanowi **masę**. Najwyraźniej jednak wielkość masy zaznacza się i daje się określić przez siłę, jaką trzeba zastosować, by unieść dane ciało w górę, po-

konywając działanie siły ciężkości, albo też przez siłę, jaką wywiera ciało swym ciężarem na podstawę, którą może być, na przykład, pomost lub talerzyk (szalka) wagi, w obu, bowiem, przypadkach siła ta jest proporcjonalna do masy danego ciała. Ta właśnie metoda mierzenia masy najdawniej była znana ludziom i obecnie znajduje najczęstsze zastosowanie w fizyce. Należy ją jednak stosować bardzo oględnie, zwłaszcza przy pomiarach dokładnych, a to dlatego, że ciężar ciał (jak to już wiemy z art. 10), nie jest wielkością stałą i może się zmieniać zależnie od odległości danego ciała względem środka kuli ziemskiej. *Masa*, natomiast, ściśle związana z ilością zawartej w danym ciele materji, jest *wielkością niezmienną*. Ciężar więc, określany na wadze, o tyle tylko może być miernikiem masy ciał, o ile określany jest dla wszystkich tych ciał w tem samym miejscu na powierzchni ziemi.

21. Do mierzenia masy zapomocą wzorców łatwo sprawdzalnych najlepiej nadaje się *woda*, ciało to, bowiem, może być najłatwiej otrzymane w stanie absolutnie czystym i wolnym od wszelkich domieszek. Ta sama komisja francuska, która oznaczyła wielkość metra, określiła również wielkość i wzorzec jednostki mierniczej masy. Jest nią ilość zupełnie czystej wody, wypełniającej całkowicie objętość 1 decymetra sześciennego czyli litra w temperaturze $+4^{\circ}$ podług skali Celsjusza, w tej, bowiem, temperaturze woda zajmuje najmniejszą objętość, w każdej zaś innej nieznacznie się rozszerza. Określoną w ten sposób jednostkę nazwano **kilogramem** i sporządzono dokładny jej wzorzec, który wraz z wzorcem metra przechowywane się na wieczne czasy w Paryżu.

Do mierzenia ciężarów i mas mniejszych służą: 1 *gram* = $\frac{1}{1000}$ kg i 1 *miligram* = $\frac{1}{1000}$ gr.

Dla większych zaś: 1 *tonna* = 1000 kg.

Gram odpowiada masie czystej wody destylowanej w temperaturze $+4^{\circ}$ C i w objętości 1 centymetra sześciennego.

Wzorzec kilograma tak, jak i wzorzec metra, wykonano również ze stopu metali cennych i trwałych: platyny i irydu. Wprawdzie, jak to wykazały pomiary ściślejsze, różni się on cokolwiek od prawdziwego kilograma, dostosowanego do ściślej wielkości metra, obowiązuje jednak powszechnie, jako wzorzec, instytucje miernicze w całym świecie cywilizowanym.

22. Dla odróżnienia między sobą ciał o różnych stopniach zagęszczenia materji, wprowadzono do fizyki pojęcia *gęstości* i *ciężaru właściwego* (gatunkowego) ciał. W tym celu zgodzono się porównywać gęstość rozmaitych rodzajów materji z gęstością czystej wody destylo-

wanej w temperaturze $+4^{\circ}$ Celsjusza. W porównaniu więc z taką wodą *gęstość* każdej jednorodnej w całej swej masie substancji określa się jako stosunek masy tej substancji do masy wody w tej samej objętości. Jest to tak zwana *gęstość względna*. Analogicznie stosunek ciężaru danego ciała do ciężaru wody w tej samej objętości wyraża *ciężar właściwy* (gatunkowy) *względny*.

Liczyby, wyrażające wielkości obu tych stosunków, są więc w zasadzie jednakowe i oderwane. W ten sposób znaleziono gęstość albo ciężar właściwy względny następujących ciał:

Platyna	21,5	Mur ceglany	1,5
Złoto	19,32	Szkło lekkie	2,4—2,7
Rtęć	13,6	„ ciężkie	3,0 i więcej
Ołów	11,37	Drzewo dębowe	0,82
Srebro	10,53	„ jodłowe	0,56
Miedź	8,9	Spirytus	0,79
Żelazo	7,86	Nafta	0,8
Cynk	7,15	Powietrze	0,001293
Glin (aluminium)	2,67	Dwutlenek węgla (CO ₂)	0,001965
Granit	2,5—3,0		

Gęstość bezwzględna (absolutna) oznacza masę jednostki objętości, albo, co jest to samo, stosunek całej masy ciała do jego objętości. Analogicznie *ciężar właściwy bezwzględny* oznacza ciężar jednostki objętości tego ciała, albo stosunek jego ciężaru do objętości. Oznaczając masę ciała literą *m*, ciężar literą *p*, objętość *v*, gęstość *d* i ciężar właściwy *s*, otrzymamy, na mocy powyższych określeń, wzory:

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

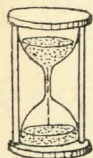
$$s = \frac{p}{v} \dots \dots \dots (2)$$

23. Prócz wykonywania pomiarów linjowych oraz związanych z nimi bezpośrednio pomiarów powierzchni i objętości, a pośrednio pomiarów ciężaru, masy, gęstości i ciężaru właściwego (gatunkowego) ciał, niezbędne są jeszcze w fizyce dokładne pomiary **czasu**.

Najściślejszym miernikiem tej wielkości jest jednostajny i niezmienny nawet w okresach tysiącoletnich ruch obrotowy ziemi dokoła jej osi. Całkowity obrót dokoła tej osi trwa, jak wiadomo, *dobę* czyli 24 godziny i za ten czas wszystkie gwiazdozbiory na niebie powracają na swoje początkowe miejsca, z których rozpoczęły swój ruch po-

zorny dokoła osi nieba (zgadzającej się z osią ziemi i skierowanej północnym swym końcem na nieruchomą gwiazdę polarną). Słońce jednak, skutkiem rocznego ruchu obrotowego ziemi dokoła niego, zmienia pozornie i stopniowo swoje miejsce między gwiazdami i w ciągu roku obiega całą kulę niebieską po linii, zwanej pasem zwierzyńcowym (zodjakiem), na którym położone są gwiazdozbiory poszczególnych miesięcy roku: Wodnik, Ryby, Baran, Byk, Bliźnięta, Rak, Lew, Panna, Wagi, Niedźwiadek, Strzelec i Koziorozec. Skutkiem tego doba słoneczna, podług której ludzie nawykli mierzyć swój czas, nie zgadza się z dobą gwiazdową czyli astronomiczną, od której jest ona cokolwiek dłuższa i nie zawsze jednakowo. Wobec tego za miarę praktyczną czasu wzięto tak zw. *średnią dobę słoneczną* i podzielono ją na 24 części, zwane *godzinami* z dalszym ich podziałem na *minuty* (1 min. = $\frac{1}{60}$ godz.) i *sekundy* (1 sek. = $\frac{1}{60}$ min. = $\frac{1}{3600}$ godz.).

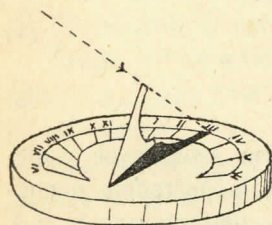
24. Dla mierzenia odstępów czasu krótszych od doby potrzebne są przyrządy, zwane dziś zegarami, zegary zaś bardzo dokładne ze specjalnem urządzeniem, zapewniającem im niezmienną ruch, noszą nazwę *chronometrów*.



Rys. 16.

W starożytności do mierzenia czasu posługiwano się klepsydrami (rys. 16) o dwóch naczyniach, połączonych wąską rurką, przez którą zwolna przesączała się woda albo drobny piasek z jednego naczynia do drugiego. Po zupełnem opróżnieniu naczynia górnego klepsydre przewracano niezwłocznie tak, aby zawartość naczynia napełnionego mogła przejść z powrotem do opróżnionego i t. d. Każda taka czynność odpowiadała pewnej dowolnej zresztą jednostce czasu.

Były również w użyciu oddawna zegary słoneczne, które pozwalały mierzyć czas z odchylen cienia rzucanego przez nieruchomą laseczkę albo krawędź deszczulki (rys. 17). Zegar taki jednak wymaga ciągłych poprawek czasu, do czego służą specjalne tablice, obliczone na każdy dzień roku.

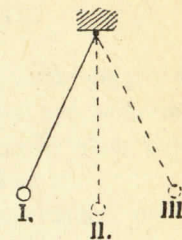


Rys. 17.

25. Znaczne udoskonalenie w budowie zegarów nowoczesnych stanowi wahadło i oparta na tej samej zasadzie mechanicznej kotwica (ankier).

Wahadło wynalezione i opracowane teoretycznie przez uczonego belgijskiego Huygensa (XVII w.) opiera się w zasadzie na tem prostem i powszechnie znanem zjawisku, że zwykły pion czyli nić z zawieszonym na niej ciężarkiem (rys. 18) po odchyleniu na pewien nieznaczny kąt do położenia I, nie może pozostać w tem położeniu, lecz pod działaniem siły ciężkości wraca do położenia pierwotnego II. Na-

bywszy jednak w tym ruchu pewien rozpęd, nie może zatrzymać się od razu, lecz odchyła się w drugą stronę do położenia III prawie na taki sam kąt od linii pionowej. Zatrzymawszy się w tem położeniu na krótką chwilę, wahadło znów wraca do położenia I i te miarowe kołysania się (wahania) trwają po sobie kolejno w zupełnie równych odstępach czasu, lecz z coraz mniejszem odchyleniem od linii pionowej, tak że po pewnym czasie wahadło zatrzymuje się ostatecznie w położeniu II.



Rys. 18.

Można przekonać się doświadczalnie, że jeżeli odległość od punktu zawieszenia nici do środka kulki wahadłowej wynosi 1 metr (dokładniej $99\frac{1}{2}$ cm), czas trwania każdego wahnienia od położenia I do III lub z powrotem od III do I trwa dokładnie 1 sekundę. W zwykłych zegarach ściennych wahadła wykonane są z metalu i składają się ze sztabki i umieszczonej na jej końcu płaskiej soczewki wahadłowej.

26. Układ bezwzględnych czyli absolutnych jednostek miar. Wybór jednostek miar niezbędnych w fizyce mógłby być wogóle rzeczą dowolną. Fizycy jednak wszystkich krajów cywilizowanych, mając na celu ujednolajnienie i udogodnienie miar w użyciu i stosunkach międzynarodowych, zgodzili się na przyjęcie jednego ogólnego i powszechnie obowiązującego układu, czyli systemu jednostek miar fizycznych. Układ ten, zwany *absolutnym* czyli *bezwzględnym*, opracowała wspomniana wyżej komisja uczonych francuskich, a wszystkie jednostki tego układu zostały wyprowadzone z trzech tylko *jednostek zasadniczych*. Są niemi: *jednostka linijowa—centymetr*, *jednostka masy—gram*, oraz *jednostka czasu—sekunda*. Dlatego to układ absolutny zowie się inaczej układem „centymetra-grama-sekundy” albo w skróceniu „układem CGS”.

Wszystkie inne jednostki układu bezwzględnego mogą być wyprowadzone ze wspomnianych trzech zasadniczych i noszą nazwę jednostek pochodnych.

Tak więc z jednostki linijowej 1 centymetra wyprowadzają się, jako pochodne od niej:

jednostka powierzchni: 1 centymetr kwadratowy (w skróceniu pisze się 1 cm^2), oraz jednostka objętości: (1 centymetr sześcienny 1 cm^3).

Inne jednostki będą wyprowadzane w miarę potrzeby w rozmaitych działach fizyki.

MECHANIKA.

27. Naukę fizyki rozpoczynamy od rozdziału zwanego *mechaniką*. Jest to nauka o zjawiskach, w których wogóle zachodzi **ruch** ciał materialnych, wywołany działaniem na nie pewnych **sił**.

Poza tem, jako szczególny przypadek ruchu, mechanika bada również stan spoczynku czyli **równowagi** ciał pod działaniem sił.

Stosownie do takiego określenia, mechanika składa się z dwóch głównych działów: *kinetyki*, uwzględniającej stan ruchu i *statyki* czyli mechaniki równowagi. Kinetykę można nadto podzielić na dwie części: *kinematykę*, czyli naukę o ruchach bez względu na siły, które je wywołują, oraz *dynamikę* czyli mechanikę właściwą.

W kursie niniejszym zastosujemy nadto podział mechaniki podług trzech wybitnych stanów skupienia materji na trzy części, mianowicie:

I. Mechanikę punktu i ciała stałego, w której wyłożone będą zasady ogólne całej mechaniki.

II. Mechanikę cieczy czyli tak zwaną hydromechanikę, i wreszcie:

III. Mechanikę gazów czyli tak zwaną aeromechanikę.

A. NAUKA O RUCHACH (KINEMATYKA).

§ 2. Rodzaje ruchów i ich elementy.

28. Ruchy ciał są to pewne zmiany ich położenia, odbywające się w przestrzeni i w czasie. Stąd kinematyka może być pojmowana jako szczególny rodzaj geometrii, w której obok pojęć i miar przestrzeni używa się pojęcia i miary czasu.

29. Ruchy ciał, z którymi mamy do czynienia w mechanice, można rozważać z dwóch rozmaitych stanowisk:

1-o, jako *bezwzględne* czyli odbywające się wogóle w przestrzeni bez żadnego stosunku do innych ciał, będących w spoczynku lub ruchu.

2-o, albo jako *względne*, badane i oznaczane względem pewnych ciał, przyjmowanych za nieruchome.

Jadąc, na przykład, w wagonie kolejowym lub na statku, możemy zdawać sobie tam sprawę z ruchu własnego oraz innych przedmiotów, tylko względem wagonu czy statku, który uważamy za nieruchomy, chociażbyśmy ruch jego odczuwali w sposób zupełnie wyraźny.

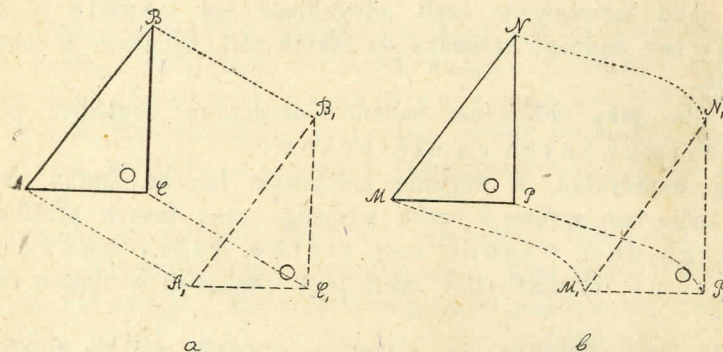
Jeżeli przy obserwowaniu położenia pewnych ciał nie dostrzegamy swego własnego ruchu względem nich, lub też, będąc sami w spoczynku, nie zauważamy ruchu innych przedmiotów względem nas, ulegamy naówczas charakterystycznym złudzeniom, wynikającym z ruchu względnego. Patrząc, na przykład, z okien nieruchomego pociągu na jadący w pobliżu inny pociąg, doznajemy złudzenia, że pociąg, w którym się znajdujemy, jest w ruchu, tamten zaś stoi na miejscu. Podobnegoż złudzenia można doznać, przypatrując się z nieruchomego mostu płynącej wodzie. Charakterystycznym i pouczającym jest też złudzenie, jakiemu od wieków ulegała ludzkość, obserwując pozorne ruchy ciał niebieskich, które są tylko, jak wiadomo, wynikiem rzeczywistych ruchów naszej ziemi dokoła jej osi i słońca. Złudzenie to przez długi czas przeszkadzało ugruntowaniu w umysłach ludzkich genialnej teorii Mikołaja Kopernika.

Ponieważ jesteśmy mieszkańcami ziemi i bierzemy udział w jej ruchach, mamy, oczywiście, zawsze do czynienia tylko z ruchami względnymi w stosunku do przyjmowanej za nieruchomą ziemi, ruchu zaś bezwzględnego nie możemy badać ani mierzyć żadnymi środkami; musimy więc uważać go tylko za niemożliwą dla nas do urzeczywistnienia fikcję naukową (urojenie).

30. Linję, po której pewien punkt ciała materialnego wykonywa ruch w przestrzeni, zwiemy **torem tego ruchu**; jeżeli zaś uwzględniamy część toru pewnej długości, zakreślona w pewnym czasie, zwiemy ją **drogą przebytą**.

31. W zależności od kształtu toru poszczególnych punktów ciała, dzielimy wszelkie ruchy na trzy rodzaje: *postępowe*, *obrotowe* i *złożone*.

Ruch *postępowy* zachodzi wtedy, gdy wszystkie punkty poruszającego się ciała zakreślają jednakowe i równoległe do siebie tory prosto- lub krzywo-linjowe (rys. 19a). Ruch taki wykonywa, na przykład, ekierka przenoszona równoległe do siebie w kierunku stałym (a) lub zmiennym (b).

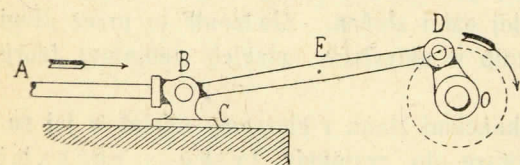


Rys. 19a.

W ruchu *obrotowym* albo *wirowym* wszystkie punkty ciała poruszają się zgodnie po okręgach kół spółśrodkowych względem pewnego nieruchomego punktu lub osi.

Ruch *złożony*, wreszcie, powstaje przez jednoczesne kombinowanie z sobą w rozmaity sposób ruchów pierwszych dwóch rodzajów.

Rozpatrując, na przykład, ruchy poszczególnych części tak zw. mechanizmu korbowego, wyobrażonego na rys. 19b, łatwo dostrzeżemy, że



Rys. 19b.

wszystkie punkty trzona AB i krzyżulca BC mają ruchy postępowe po liniach prostych tam i z powrotem; wszystkie punkty korby DO wykonywają ruchy obrotowe względem osi O ; co się zaś tyczy korbowodu BD , to koniec jego B ma ruch postępowy, koniec D — obrotowy, wszelki zaś inny dowolny jego punkt E wykonywa ruch złożony: postępowy i obrotowy jednocześnie.

32. Prócz toru, drogi przebytej i czasu trwania, niezbędnym elementem każdego ruchu jest jego **prędkość**. Określamy ją jako *długość drogi, przebytej w jednostce czasu*, ściślej zaś mówiąc, jako *stosunek drogi do czasu*, w ciągu którego została przebyta ta droga.

33. Pod względem prędkości dzielimy wszelkie ruchy na *jednostajne* czyli takie, w których prędkość przez cały czas trwania ruchu jest ta sama, oraz *zmiennie*, w których prędkość z biegiem czasu powiększa się lub zmniejsza, przyczem w pierwszym wypadku ruch zmienny zowie się **przyspieszonym**, w drugim — **opóźnionym**.

§ 3. Ruch jednostajny.

34. Jeżeli pewne ciało przebywa drogę długości s w ciągu t jednostek czasu i przez cały ten czas prędkość (v), wyrażona stosunkiem każdego odcinka drogi do odpowiedniego odstępu czasu, jest niezmienna, wtedy słuszny jest wzór:

$$v = \frac{s}{t} = \text{Const.}^1) \quad (1)$$

z którego wynika wzór:

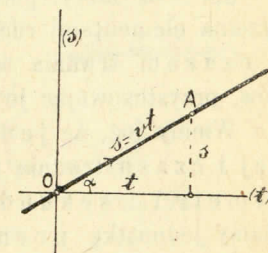
$$s = vt \quad (2)$$

Wzór ten oznacza, że droga, przebyta w ruchu jednostajnym, jest wprost proporcjonalna do czasu trwania tego ruchu.

Prócz tego może być otrzymany wzór, określający czas trwania ruchu jednostajnego:

$$t = \frac{s}{v} \quad (3)$$

35. Z wzoru (2) widzimy, że droga (s), przebyta w ruchu jednostajnym jest znaną w matematyce funkcją linjową czasu (t) i wyraża się geometrycznie *linją prostą*. Linję tę otrzymamy zapomocą układu dwóch prostopadłych do siebie osi spółrzędnych (rys. 20), przyczem na jednej z nich (osi odciętych) odmierza się od punktu początkowego O czas t , na drugiej zaś (osi rzędnych) odcinki drogi przebytej (s). Ze stałego stosunku $\left(\frac{s}{t}\right)$ spółrzędnych poszczególnych punktów A tej linii wynika, że ma ona stały współczynnik kątowy czyli kierun-

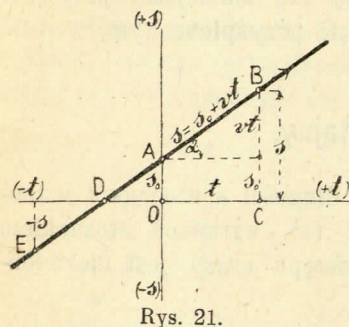


Rys. 20.

¹⁾ Skrót wyrazu łacińskiego *Constans* = stały.

kowy, którym jest liczba v , wyrażająca stałą prędkość ruchu jednostajnego. Z poszczególnych punktów powstaje linia prosta OA , przechodząca przez początek współrzędnych O , przyjmując, bowiem, dla tego punktu czas $t = 0$, otrzymamy podług wzoru (2) drogę $s = 0$. Linia ta tworzy z osią czasu pewien stały kąt α .

Jeżeli czas t mierzymy nie od początku ruchu, lecz od pewnej chwili, w której poruszające się ciało przebyło już drogę s_0 , wówczas funkcja ruchu przybierze postać: $s = s_0 + vt$, wykres zaś jej otrzymamy również w postaci linii prostej (rys. 21), która jednak nie przechodzi przez punkt początkowy O układu osi.



Rys. 21.

Przyjmując na początku rachuby czas $t = 0$, znajdziemy $s = s_0$, co odpowiada punktowi A przecięcia prostej z osią dróg. Wszelki inny dowolny punkt B tej prostej posiada rzędną BC w postaci sumy dwóch odcinków: stałego s_0 i zmiennego vt . Przedłużenie proste AB wstecz poza punkt A oznacza ruch w czasie, poprzedzającym początkową chwilę rachuby. Czas więc, liczony dla odcinka AD i dalszego przedłużenia DE prostej, należy uważać za liczbę ujemną. Również za liczby ujemne uważamy odcinki dróg, odpowiadające przedłużeniu DE prostej funkcyjnej, leżą one, bowiem, przed punktem O , od którego rozpoczęła się poprzednio rachuba drogi przebytej.

Z łatwością zauważymy, że im większa jest prędkość v ruchu jednostajnego, tem większy jest kąt α , który tworzy prosta funkcyjna z osią czasu.

Wykresy tego rodzaju oddają, między innemi, znakomite usługi kolejarzom przy układaniu rozkładu jazdy pociągów.

36. Na mocy podanych wyżej zależności matematycznych między trzema elementami ruchu: drogą przebytą (s), prędkością (v) i czasem trwania (t), można określić miarę i jednostki tych elementów, przystosowując je do układu bezwzględny (CGS).

Wiemy już, że jednostkami absolutnemi drogi przebytej i czasu trwania ruchu są jednostki zasadnicze, mianowicie 1 centymetr i 1 sekunda; dla prędkości zaś na zasadzie wzoru (1) określamy jednostkę pochodną od centymetra i sekundy. Jest to, mianowicie, prędkość, wynosząca 1 centymetr na 1 sekundę, co oznaczamy symbolem:

$$1 \text{ cm/sek.}$$

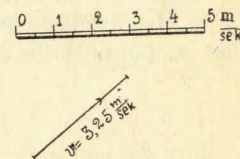
Ze względu na nieznaczną wielkość wymienionych jednostek bezwzględnych, używane są w razie potrzeby większe od nich tak zwane jednostki **praktyczne**. A więc, na przykład, drogę przebytą można mierzyć i wyrażać w metrach (m), kilometrach (km) i t. d.; czas — w minutach (min), godzinach (godz) i t. d.; do mierzenia zaś prędkości można używać jednostek: 1 cm/min, 1 m/sek, 1 km/min, 1 km/godz i t. p.; każdą jednak z tych jednostek praktycznych można w razie potrzeby wyrazić w jednostkach bezwzględnych, na przykład:

$$1 \text{ km/godz} = \frac{1000 \text{ m}}{60 \text{ min}} = \frac{100000 \text{ cm}}{3600 \text{ sek}} = 27,78 \text{ cm/sek.}$$

37. Prócz wartości liczebnej jednostek mierniczych ważną jest rzeczą oznaczenie dla nich tak zwanego wymiaru fizycznego, który wskazuje, z jakich jednostek zasadniczych i zapomocą jakich działań otrzymana jest dana jednostka pochodna. Jeżeli wymiar jednostek zasadniczych: długości, masy i czasu, oznaczmy odpowiednio symbolami literowymi: $[L]$, $[M]$ i $[T]$, wówczas wymiar drogi przebytej (s) w ruchu oznaczmy również symbolem $[L]$, wymiar czasu (t) trwania ruchu symbolem $[T]$, wymiar zaś prędkości podług wzoru (1) symbolem: $\left[\frac{L}{T}\right]$, albo jeszcze prościej: $[LT^{-1}]$.

38. Sposób przedstawiania rozmaitych wielkości fizycznych zapomocą odcinków stosuje się bardzo często. Każdy taki odcinek posiada długość, wymierzoną podług pewnej umówionej skali mierniczej z podziałką na jednostki i ich części. Odcinek, wyobrażający w ten sposób pewną wielkość fizyczną, na przykład, drogę s lub czas t trwania ruchu nosi nazwę **skalaru**, same zaś pojęcia drogi i czasu, które wymagają tylko wymierzenia na odcinkach ich wielkości podług pewnej skali, zaliczamy do wielkości **skalnych** albo **bezkierunkowych**.

39. Co się zaś tyczy prędkości v , to ściśle jej określenie w mechanice wymaga wyznaczenia nie tylko jej wielkości, ale i kierunku, co uskutecznia się graficznie zapomocą tak zwanych **wektorów** (wskaźników). Wektor pewnej prędkości v (rys. 22) przedstawiamy w postaci odcinka prostej, którego długość podług pewnej umówionej skali linowej, wyraża wielkość liczebną prędkości ($v = 3,25 \text{ m/sek}$); kierunek zaś jej i zwrot na płaszczyźnie lub w przestrzeni wskazuje linia wektora, oraz umieszczona na niej strzałka.



Rys. 22.

W mechanice poznamy inne jeszcze wielkości, które również mogą być przedstawiane zapomocą wektorów; wielkości takie zowiemy **wektorami** albo **kierunkowymi**.

§ 4. Ruch jednostajnie-zmienny.

40. Prędkość w ruchu zmiennym możemy oceniać tylko w pewnych punktach drogi albo w pewnych momentach czasu, przypuszczając, że od danego punktu drogi i od danej chwili ruchu prędkość przestaje się nadal zmieniać, a ruch jest jednostajny.

Jeżeli prędkość ruchu ulega nieznacznym zmianom swej wielkości w tę lub inną stronę, można wówczas z pewnem, wystarczającym dla praktyki przybliżeniem obliczać ruch podług tak zwanej prędkości średniej, którą otrzymuje się z podzielenia całej drogi przebytej (s) przez czas (t) trwania ruchu podług wzoru (1). W ten sposób oblicza się, na przykład, średnią prędkość biegu pociągów kolejowych lub statków na pewnej odległości.

41. Można obliczać ruch podług jego prędkości średniej zupełnie dokładnie wtedy, gdy prędkość zmienia się jednakowo i prawidłowo z biegiem czasu. Ruch taki zwiemy *jednostajnie-zmien-ny*; jeżeli prędkość jego w równych odstępach czasu zyskuje jednako- we przyrosty, zwiemy go ruchem *jednostajnie-przyspieszonym*; przy regularnem zaś zmniejszaniu się prędkości — *jednostajnie-opóźnionym*.

42. Przyrost (względnie zmniejszenie się) prędkości w jednostce czasu zowie się **przyspieszeniem** (względnie **opóźnieniem**); ściślej zaś mówiąc, przyspieszenie (względnie opóźnienie) oznacza *stosunek przyro- stu (lub zmniejszenia) prędkości do czasu*, w ciągu którego zachodzi ten przyrost albo zmniejszenie. Przyspie- szenia umówimy się oznaczać literą a ze znakiem dodatnim, opóźnienia zaś tą samą literą ze znakiem ujemnym.

43. Jeżeli przypuścimy, że ruch jednostajnie-przyspieszony rozpo- czął się od stanu spoczynku (t. j. posiadał prędkość początkową: $v_0 = 0$), wówczas prędkość v , zyskując w każdej jednostce czasu przy- rost a , po upływie t jednostek czasu osiągnie wielkości:

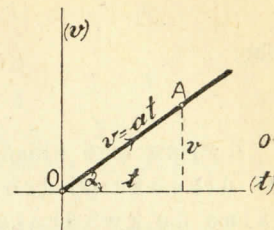
$$v = at \quad (1)$$

Jest to pierwszy wzór ruchu jednostajnie-przyspieszonego; możemy otrzymać stąd dwa inne wzory pochodne, mianowicie:

$$a = \frac{v}{t} = \text{Const.} \quad (2)$$

$$t = \frac{v}{a} \quad (3)$$

44. Z wzoru (1) widzimy, że prędkość v tego ruchu jest funkcją linjową (rys. 23) wyrażoną linią prostą OA , przechodzącą przez punkt początkowy O układu ($t = 0$; $v = 0$). Stały kąt nachylenia α prostej funkcyjnej do osi cza- su (t) oznacza stałość przyspieszenia ($a = \frac{v}{t} = \text{Const}$) przez cały czas trwania ruchu zmien- nego.



Rys. 23.

45. Wzór (2) pozwala określać jednostki i wymiar fizyczny przyspieszenia (względnie opóźnienia). Jednostką bezwzględną jest, oczywiście, takie przyspieszenie (względnie opóźnienie), przy którym prędkość ruchu co se- kunda wzrasta (względnie zmniejsza się) o 1 cm/sek.

Uwzględniając jednostkę absolutną prędkości (1 cm/sek), oraz wzór (2), możemy jednostkę bezwzględną przyspieszenia (względnie opóźnie- nia) wyrazić symbolem:

$$1 \text{ cm/sek}^2.$$

Wymiar zaś tej wielkości przedstawi się symbolem $[LT^{-1} : T]$, albo $[LT^{-2}]$.

Prócz absolutnej, mogą być w razie potrzeby używane różne jedno- stki praktyczne przyspieszenia, na przykład 1 cm/min², 1 m/sek², 1 km/godz² i t. p., z których każdą można wyrazić w jednostkach bez- względnych, na przykład:

$$1 \frac{\text{m}}{\text{min}^2} = \frac{100 \text{ cm}}{60^2 \text{ sek}^2} = \frac{100}{3600} = 0,028 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}.$$

Przyspieszenie, również jak i prędkość, należy do wielko- ści *kierunkowych* (wektorowych).

46. Długość (s) drogi, przebytej w ruchu jednostajnie-przyspieszo- nym, można obliczyć, mając wyznaczoną prędkość średnią (v_m) tego ruchu. Ponieważ prędkość wzrasta wprost proporcjonalnie do czasu ¹⁾, stąd prędkość średnią można wyznaczyć jako średnią arytmety- czną z prędkości początkowej ($v_0 = 0$) i końcowej ($v = at$). Otrzy- mamy wówczas prędkość średnią podług wzoru:

$$v_m = \frac{0+at}{2} = \frac{at}{2};$$

długość zaś (s) drogi przebytej może być następnie obliczona tak, jak

¹⁾ Prędkości w poszczególnych jednostkach czasu tworzą w tym ruchu postępek arytmetyczny.

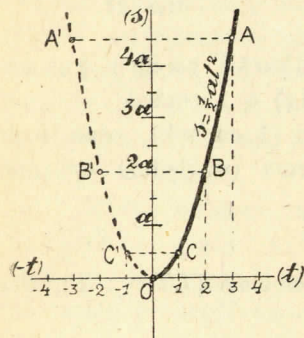
gdyby ruch był jednostajny w ciągu czasu t przy nieziennej prędkości v_m . Wypadnie wówczas:

$$s = v_m t = \frac{at}{2} \cdot t;$$

albo:

$$s = \frac{at^2}{2} \dots \dots \dots (4)$$

Z wzoru tego widać, że przy stałym i niezmiennym przyspieszeniu (a) długość (s) drogi przebytej jest wprost proporcjonalna do kwadratu czasu (t^2) trwania ruchu.



Rys. 24.

47. Aby odwzorować otrzymaną funkcję drogi na wykresie zapomocą układu osi współrzędnych (rys. 24), wyznaczamy kolejne wartości drogi s , odpowiadające pewnym kolejnym odstępom czasu, na przykład:

punkt O	punkt C	punkt B	punkt A
$t = 0$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$
$s = 0$	$s = \frac{1}{2}a$	$s = 2a$	$s = 4\frac{1}{2}a$

i t. d.

Na wykresie powstaje wówczas linia krzywa, zwana *parabolą* i umieszczona wierzchołkiem w początku współrzędnych O . Warunkom ruchu przyspieszonego odpowiada jednak tylko prawa strona krzywej, lewa bowiem stosuje się do ujemnych odcinków czasu ($-t$).

O ile jednak przyjmiemy czas, poprzedzający ruch przyspieszony, za ujemny, na przykład: $t = -3$, wówczas funkcja daje: $s = 4\frac{1}{2}a$, co odpowiada punktowi A' symetrycznemu z A . W podobny sposób otrzymamy punkty B' i C' symetryczne z B i C . Część $A'B'C'O$ paraboli oznacza wtedy, jak widać, ruch opóźniony, który poprzedzał ruch przyspieszony, ale odbywał się w kierunku przeciwnym aż do zatrzymania się w punkcie O drogi, poczem rozpoczął się ruch przyspieszony od tego samego punktu do góry.

48. Wielkości dróg, przebytych od początku ruchu do końca każdej poszczególnej jednostki czasu, można obliczyć, zakładając we wzorze (4) kolejno: $t = 1$; $t = 2$; $t = 3$ i t. d., otrzymamy wówczas szereg wzorów:

$$s_1 = \frac{a}{2} \cdot 1; s_2 = \frac{a}{2} \cdot 4; s_3 = \frac{a}{2} \cdot 9; s_4 = \frac{a}{2} \cdot 16 \text{ i t. d.}$$

Stąd otrzymujemy proporcję: $s_1 : s_2 : s_3 : s_4$ i t. d. $= 1^2 : 2^2 : 3^2 : 4^2$ i t. d.; a więc stosunek tych dróg jest równy stosunkowi *kwadratów* liczb naturalnych porządkowych.

Obliczymy następnie długości dróg, przebytych w oddzielnych kolejnych jednostkach czasu; otrzymamy je z wzorów:

$$s_1' = s_1 = \frac{a}{2}; s_2' = s_2 - s_1 = \frac{a}{2} \cdot (4 - 1) = \frac{a}{2} \cdot 3;$$

$$s_3' = s_3 - s_2 = \frac{a}{2} \cdot 5; s_4' = s_4 - s_3 = \frac{a}{2} \cdot 7 \text{ i t. d.}$$

Stąd wypada proporcja: $s_1' : s_2' : s_3' : s_4'$ i t. d. $= 1 : 3 : 5 : 7$ i t. d.; a więc stosunek dróg przebytych jest wówczas równy stosunkowi liczb naturalnych *nieparzystych*.

49. Jeżeli w chwili rozpoczęcia ruchu jednostajnie-przyspieszonego ciało posiadało już prędkość początkową v_0 i powiększało ją stopniowo podczas dalszego ruchu, wówczas, uzupełniając odpowiednio wzory (1) i (4), otrzymamy:

$$v = v_0 + at \dots \dots \dots (5)$$

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2} \dots \dots \dots (6)$$

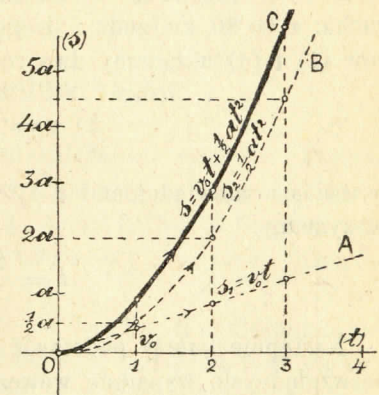
50. Wykres funkcji, wyrażonej wzorem (5) daje, jak widać, linię prostą podobnie jak wykres drogi w ruchu jednostajnym (patrz rys. 21). Co się zaś tyczy wykresu funkcji (6), otrzymamy go (rys. 25), budując oddzielnie wykresy 2 funkcji:

$$s_1 = v_0 t \text{ (linia prosta } OA)$$

$$\text{i } s_2 = \frac{1}{2}at^2 \text{ (parabola } OB).$$

Rzędne wszystkich punktów, odpowiadających tym samym odcietym ($t = 1$; $t = 2$; $t = 3$ i t. d.) dodajemy do siebie i stąd powstaje nowa parabola OC , dająca obraz geometryczny funkcji

$$s = v_0 t + \frac{1}{2}at^2.$$



Rys. 25.

Ruch, wyrażony tą funkcją, składa się, jak widać, z dwóch jakby niezależnych od siebie i odbywających się jednocześnie ruchów: jednostajnego podług funkcji: $s_1 = v_0 t$ (prosta OA) i jednostajnie-przyspieszonego podług funkcji: $s_2 = \frac{1}{2}at^2$ (parabola OB).

51. Odpowiednio do wzorów (1) i (4), mogą być znalezione analogiczne wzory na prędkość i drogę, przebytą w ruchu **jednostajnie-opóźnionym**. Zakładamy w tym celu, że ruch rozpoczyna się z pewną prędkością pierwotną v_0 . Wówczas po upływie t jednostek czasu prędkość ta zmniejszy się o at i przybierze wartość:

$$v = v_0 - at \dots \dots \dots (7)$$

Długość zaś s drogi przebytej obliczymy jako różnicę między długością drogi ($v_0 t$), przebytej ze stałą prędkością v_0 , a długością drogi ($\frac{at^2}{2}$), przebytej ruchem jednostajnie-przyspieszonym, w kierunku przeciwnym do pierwszego. Wypadnie wówczas wzór:

$$s = v_0 t - \frac{at^2}{2} \quad (8)$$

Te same wyniki otrzymamy, zmieniając we wzorach (1) i (4) znak algebraiczny przyspieszenia a .

Czytelnik zbuduje sam i zbada wykresy funkcji, wyrażonych wzorami (7) i (8) ruchu jednostajnie-opóźnionego.

52. Ćwiczenie 1. Pociąg kolejowy odchodzi ze stacji ruchem jednostajnie-przyspieszonym. Obliczyć przyspieszenie tego ruchu, oraz czas, w ciągu którego pociąg zyska prędkość, wynoszącą 80 km/godz, przebywszy od początku ruchu drogę równą 2,4 km.

Rozwiązanie. W zadaniu tem mamy dane: prędkość końcową ruchu: $v = 80$ km/godz i drogę przebytą: $s = 2,4$ km. Na mocy wzorów (1) i (4) układamy dwa równania:

$$1) v = at; \quad 2) s = \frac{at^2}{2}$$

z dwiema niewiadomymi a i t . Po rozwiązaniu tego układu równań, otrzymamy:

$$t = \frac{2s}{v}; \quad a = \frac{v^2}{2s}.$$

Następnie należy podstawić liczby dane, wyrażając je w jednostkach bezwzględnych. wypadnie wówczas:

$$t = \frac{2 \cdot (2,4 \cdot 100000) \text{ cm}}{\left(80 \cdot \frac{100000}{3600}\right) \text{ sek}} = 216 \text{ sek} = 3 \text{ min } 36 \text{ sek};$$

$$a = \frac{\left(80 \cdot \frac{100000}{3600} \frac{\text{cm}}{\text{sek}}\right)^2}{2 \cdot (2,4 \cdot 100000) \text{ cm}} = 10,3 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}.$$

Ćwiczenie 2. Pociąg kolejowy, pędzący z prędkością $v_0 = 72$ km/godz, zostaje zatrzymany działaniem hamulca w ciągu czasu $t = 2$ min. Z jakim opóźnieniem działa hamulec i jaką odległość pociąg przebiegnie, zanim zostanie zatrzymany?

Rozwiązanie. Mamy tu do czynienia z ruchem jednostajnie-opóźnionym, posilając się więc w celu ułożenia równań wzorami (7) i (8), otrzymamy:

$$1) v = v_0 - at = 0 \text{ (gdyż przy końcu ruchu } v = 0);$$

$$2) s = v_0 t - \frac{at^2}{2}.$$

Po rozwiązaniu równań względem niewiadomych a i s wypadają wzory:

$$a = \frac{v_0}{t}; \quad s = \frac{v_0 t}{2}.$$

Podstawiając liczby dane, otrzymamy:

$$a = \frac{\left(\frac{72 \cdot 100000}{3600}\right) \text{ cm}}{(2 \cdot 60) \text{ sek}} = 16,7 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2};$$

$$s = \frac{\left(\frac{72 \cdot 100000}{3600}\right) \text{ cm}}{2} (2 \cdot 60) \text{ sek} = 120000 \text{ cm} = 1200 \text{ m} = 1,2 \text{ km}.$$

§ 5. Składanie elementów ruchu.

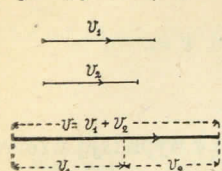
53. W kinematyce istnieje zasada niezależności ruchów. Polega ona na tem, że wszelki ruch, wykonywany przez pewne ciało, istnieje i zachowuje swą prędkość i kierunek niezależnie od innych ruchów, które wykonywa jednocześnie to samo ciało.

Wiemy z doświadczenia, że niezależnie od prędkości i kierunku ruchu, jaki posiada, np. statek, możemy wykonywać, jadąc na tym statku, wszelkie inne własne ruchy. Chcąc jednak w takich warunkach określić swój ruch względem przyjmowanej za nieruchomą ziemi, musimy uwzględnić jednocześnie obydwa ruchy: swój własny, oraz ruch statku. W każdym podobnym wypadku zachodzi potrzeba *składania* kilku jednoczesnych ruchów, których wynikiem jest pewien ruch sumaryczny, zwany *wypadkowym*, poszczególne zaś ruchy, z których powstaje ten wypadkowy, noszą nazwę ruchów *składowych*.

54. Składanie ruchów skutecznia się przez składanie ich elementów: dróg, prędkości albo przyspieszeń.

Jeżeli poruszamy się, na przykład, z pewną stałą prędkością v_1 po pokładzie statku, zgodnie z kierunkiem jego ruchu i jeżeli prędkość statku wynosi v_2 , wówczas prędkość wypadkowa (v), czyli dro-

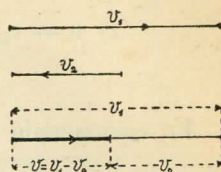
ga, przebywana w jednostce czasu na skutek obydwóch tych ruchów jednocześnie, będzie, oczywiście, równa *sumie* prędkości składowych, czyli (rys. 26):



Rys. 26.

$$v = v_1 + v_2.$$

Przeciwnie, idąc po płaszczyźnie z taką samą prędkością (v_1), ale w kierunku przeciwnym do ruchu statku, wykonywamy ruch wypadkowy, którego



Rys. 27.

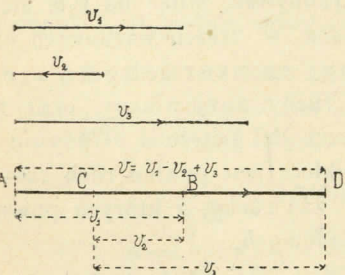
prędkość (v) będzie równa *różnicy* prędkości składowych czyli (rys. 27):

$$v = v_1 - v_2.$$

Zależnie od znaku algebraicznego tej różnicy, ruch wypadkowy będzie miał kierunek zgodny z prędkością v_1 (ze znakiem dodatnim) albo z prędkością v_2 (ze znakiem ujemnym).

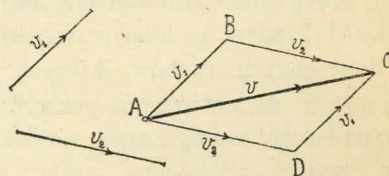
55. Ponieważ prędkości są wielkościami kierunkowymi, przeto składowanie ich można uskuteczniać za pomocą ich wektorów. Mogą tu zachodzić następujące dwa przypadki zasadnicze:

I. Jeżeli pewien punkt materialny A (rys. 28) posiada jednocześnie kilka prędkości, przedstawionych wektorami: v_1 , v_2 i v_3 o kierunkach równoległych do siebie, ale o różnych zwrotach, czyli znakach algebraicznych (wskazywanych strzałkami), wówczas wektor (v) prędkości wypadkowej jest sumą *algebraiczną* wektorów składowych i otrzymuje się przez kolejne odmierzanie wektorów, zgodnie ze wskazaniami na nich zwrotami, mianowicie: $AB = v_1$ (w prawo); $BC = v_2$ (w lewo); $CD = v_3$ (w prawo); w rezultacie otrzymuje się wektor wypadkowy:



Rys. 28.

$$AD = v = v_1 - v_2 + v_3.$$

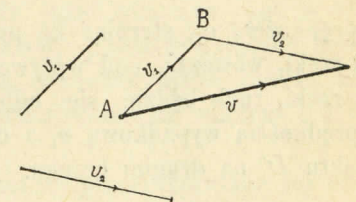


Rys. 29.

II. W przypadku, gdy wektory prędkości składowych nie są równoległe do siebie, składowanie ich odbywa się wówczas podług reguły tak zwanego dodawania *geometrycznego*.

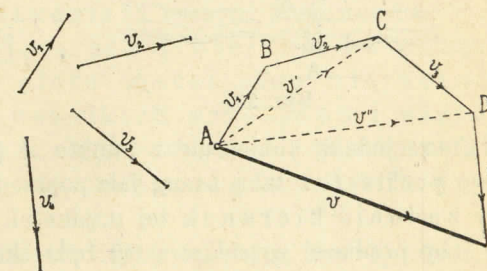
Jeżeli, mianowicie, pewien punkt A (rys. 29) posiada jednocześnie dwie prędkości, przedstawione wektorami v_1 i v_2 o kierunkach różnych, wykonywa on wówczas w jednostce czasu dwa przesunięcia AB i BC albo AD i DC w kierunkach równoległych do wektorów v_1 i v_2 i o równych im odpowiednio wielkościach. Wynikiem tych dwóch ruchów składowych jest przesunięcie wypadkowe od punktu A do punktu końcowego C wzdłuż przekątnej AC równoległoboku $ABCD$, zbudowanego na wektorach składowych v_1 i v_2 . Przekątnia ta wyznacza wielkość, kierunek i zwrot prędkości (v) ruchu wypadkowego, jest więc wektorem tej prędkości.

56. Zamiast budowania całego równoległoboku, wystarczy zbudować tylko trójkąt ABC (rys. 30), którego boki AB i BC są odpowiednio równoległe do wektorów v_1 i v_2 , oraz są im równe i mają te same co i one zwroty, wówczas bok trzeci $AC = v$, zamykający trójkąt, jest wektorem prędkości wypadkowej.



Rys. 30.

O ile, następnie, ciało A (rys. 31) posiada naraz kilka prędkości (v_1 , v_2 , v_3 i v_4) w rozmaitych kierunkach, wektory tych prędkości składają się wówczas kolejno za pomocą reguły trójkąta, przyczem z wektorów v_1 i v_2 otrzymuje się wypadkowy v' , który z wektorem v_3 daje wypadkowy v'' , ten zaś z ostatnim wektorem składowym v_4 daje ogólny wektor wypadkowy $AE = v$, jako ostatni zamykający bok wielokąta



Rys. 31.

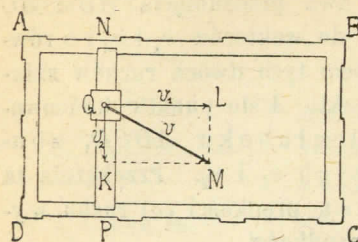
$ABCDE$, utworzonego z wektorów prędkości składowych, z uwzględnieniem przytem ich wielkości, kierunków i zwrotów.

Konstrukcja powyższa stanowi właśnie tak zwane dodawanie *geometryczne* wektorów. Od dodawania algebraicznego wyróżnia się ono na piśmie za pomocą kresek u góry, a więc w danym przykładzie rezultat dodawania geometrycznego przedstawi się wzorem:

$$\bar{v} = \bar{v}_1 + \bar{v}_2 + \bar{v}_3 + \bar{v}_4.$$

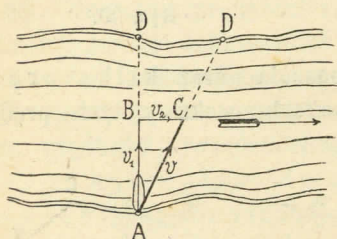
Ponieważ przyspieszenia, również jak i prędkości są wielkościami kierunkowymi, mogą więc być składane podług tych samych reguł dodawania geometrycznego.

57. Przykłady składania ruchów. 1) Wzdłuż hali fabrycznej $ABCD$ (rys. 32) posuwa się dźwignica pomostowa NP z prędkością v_1 , a jednocześnie wózek Q tej dźwignicy posuwa się wzdłuż pomostu NP z prędkością v_2 ; skutkiem tego ciężar, uciepiony do wózka, posiada ruch wypadkowy z prędkością v w kierunku przekątnej QM równoległoboku $QLMK$, utworzonego z wektorów składowych v_1 i v_2 .

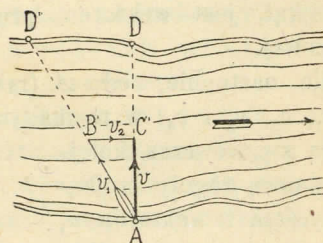


Rys. 32.

2) Jeżeli z punktu A (rys. 33) na jednym brzegu rzeki wyrusza czółno z prędkością v_1 , sterując ku punktowi D , położonemu na drugim brzegu rzeki, wówczas, pod wpływem drugiej prędkości składowej (v_2) prądu rzeki, ruch będzie się odbywał wzdłuż boku AC trójkąta ABC z prędkością wypadkową v , a czółno, zamiast do punktu D , przybije do punktu D' na drugim brzegu.



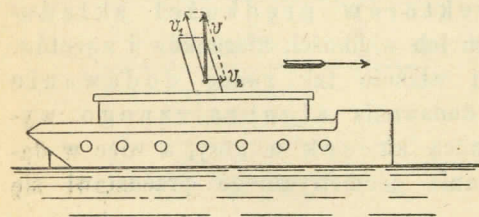
Rys. 33.



Rys. 34.

Chcąc jednak koniecznie z punktu A (rys. 34) trafić do przeciwnego punktu D z taką samą, jak poprzednio prędkością czółna v_1 , należy zmienić kierunek tej prędkości, sterując na pewien punkt D'' tak, aby prędkość wypadkowa (v) była skierowana wzdłuż prostej AD .

W obydwóch wymienionych przypadkach prędkość wypadkowa (v) czółna może być obliczona z trójkątów prostokątnych podług wzorów:



Rys. 35.

$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$ — w przypadku pierwszym (rys. 33).

albo $v = \sqrt{v_1^2 - v_2^2}$ — w przypadku drugim (rys. 34).

3) Kominy statków (rys. 35) budowane są zwykle z nieznanym nachyleniem wtył, a to w tym celu, aby cząsteczki sadzy, wylatujące wzdłuż komina z prędkością v_1 i poruszające się wraz

ze statkiem z prędkością v_2 , miały prędkość wypadkową (v) w kierunku pionowym, wtedy bowiem nie zawadzają o brzegi komina i nie rozsypują się po pokładzie statku.

B. NAUKA O DZIAŁANIU SIŁ (DYNAMIKA).

§ 6. Dwojaki rodzaj działania sił.

58. Siły mogą wywierać na ciała materialne dwojakié działanie: *statyczne* i *dynamiczne*.

1) Działanie *statyczne* zachodzi wtedy, jeżeli siła nie jest w stanie pokonać przeszkód i więzów, powstrzymujących pewne ciało, i wprowadzić je w ruch; wywiera ona wówczas tylko *parcie* albo *ciągnięcie*, zależnie od tego, jak jest skierowana: do wnętrza lub na zewnątrz tego ciała.

2) Jeżeli zaś siła jest w stanie pokonać przeciwstawiane jej przeszkody, wówczas, na skutek pewnego nadmiaru siły, ciało, na które siła ta wywiera działanie, zostaje wprowadzone w ogóle w ruch *przyspieszony* albo *opóźniony*, przyczem ruch przyspieszony wynika wtedy, gdy ciało było pierwotnie w stanie spoczynku lub w ruchu o kierunku zgodnym z działaniem siły; ruch zaś opóźniony wynika wtedy, gdy siła przeciwdziała ruchowi pierwotnemu.

O ile pewna siła, mająca stałą wielkość i kierunek, wywiera działanie na ciało materialne nieruchome i *swobodne*, t. j. wolne od wszelkich przeszkód i więzów, nadaje mu ona wówczas ruch *jednostajnie-przyspieszony* w kierunku swego działania. Jest to zasada działania dynamicznego sił.

59. Najprostszy przykład, stwierdzający tę ważną zasadę mechaniki, przedstawia *spadek swobodny* ciała, pozbawionych podparcia i ulegających ciężarowi ku ziemi. Pomiary bezpośrednie wykazują, że spadek taki zawsze odbywa się ruchem jednostajnie-przyspieszonym, o ile opór powietrza jest przytem znikomo mały. Przyspieszenie tego ruchu jest stałe dla każdej danej miejscowości na ziemi i zależy od natężenia siły ciężkości. Zmienia się zatem nieznacznie na powierzchni ziemi, stosownie do szerokości geograficznej. Dla średnich szerokości przyspieszenie to wynosi:

$$981 \text{ cm/sec}^2,$$

przyczem liczbę tę zwykle oznacza się literą g (od wyrazu grawitacja = ciężnienie).

60. Odkrycie zasady działania dynamicznego sił nauka zawdzięcza uczoneму włoskiemu z czasów średniowiecza *Galileuszowi* ¹⁾, który przez wprowadzenie tej zasady do mechaniki obalił cały szereg fałszywych poglądów, jakie panowały podówczas w nauce i dotyczyły działania sił.



Galileusz.

Poglądy te, które głosił jeszcze w czasach starożytnych mędrzec grecki *Arystoteles*, streszczały się w następujących, na pozór słusznych, ale w rzeczywistości zupełnie mylnych mniemaniach:

1-o) „Nieziemna siła może sprawić tylko ruch jednostajny”;

2-o) „Ruch jednostajnie-przyspieszony może powstawać tylko na skutek jednostajnego wzrastania siły”;

3-o) „Jeżeli działanie siły na ciało ustaje, ruch jego staje się jednostajnie-opóźnionym, skutkiem czego ciało musi się w rezultacie zatrzymać”;

4-o) „Ciała o dużej masie i ciężarze spadają ku ziemi odpowiednio prędzej, niż ciała małe i lekkie”.

61. Pierwsze dwa mniemania *Arystotelesa* i jego zwolenników obalił *Galileusz* dowodem doświadczalnym, że spadek swobodny pod działaniem niezmiennej siły ciężkości nie odbywa się ruchem jednostajnym, lecz jednostajnie-przyspieszonym. Nie mogąc mierzyć bezpośrednio dużych prędkości spadku swobodnego, *Galileusz* mierzył, natomiast, prędkość i drogę kulki, toczącej się wolno po pochyło ustawionem wyślubieniu; stwierdził on przytem, że drogi, przebywane przez kulkę w równych, kolejnych odstępach czasu, miały się do siebie tak, jak liczby porządkowe nieparzyste:

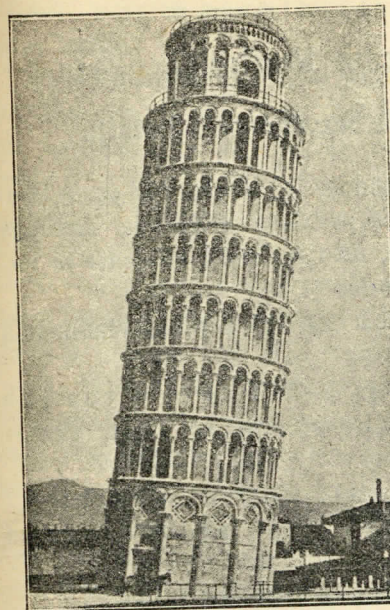
$$1 : 3 : 5 : 7 : i \text{ t. d.},$$

co oznaczało (patrz kinematyka § 4, art. 48), że ruch kulki był jednostajnie-przyspieszony.

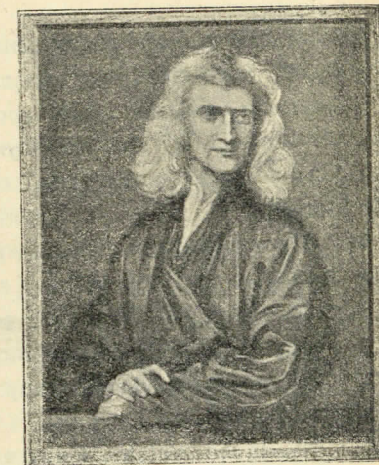
Mniemanie trzecie obalił *Galileusz* tłumaczeniem, iż ciało, na które pewna siła przestaje wywierać działanie, w dalszym ciągu swego ruchu poddane jest nieuniknionym przeszkodom i oporom, które

¹⁾ *Galileusz* (Galileo Galilei) urodził się w r. 1564, umarł w r. 1642, zasady dynamiki wyłożył w słynnych dialogach pod tytułem: „Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze” w r. 1638.

wytwarzają siłę tamującą ruch, przez co zachodzi opóźnienie i wreszcie zatrzymanie ruchu. Gdyby zaś ciało było absolutnie wolne od wszelkich przeszkód w swym ruchu, wówczas z chwilą, gdy przestaje działać siła, zachowałoby nadal ruch jednostajny i wieczny.



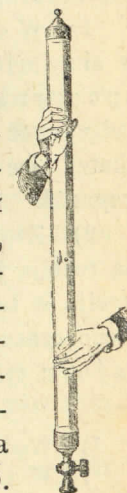
Rys. 36.



Izaak Newton.

Wreszcie nedorzecznosc mniemania czwartego *Galileusz* wykazał, rzucając jednocześnie i z jednakowej wysokości (ze szczytu słynnej wieży Pizańskiej, rys. 36) dwie kule metalowe, których wielkości i ciężary znacznie różniły się pomiędzy sobą. Okazało się wówczas, wbrew dotychczasowemu mniemaniu, że obie kule spadały ku ziemi z tak nieznaczną różnicą w czasie po sobie, iż różnicę tę *Galileusz* przypisał tylko wpływowi oporu powietrza. W próżni więc, czyli w nieobecności powietrza, wszystkie ciała materialne powinny spadać jednakowo. Można to udowodnić doświadczalnie, umieszczając kilka przedmiotów o rozmaitej gęstości (np. kawałki korka, puchu i ołowiu) wewnątrz rury, z której następnie zostanie wypompowane powietrze. Po szybkim przewróceniu rury wszystkie te ciała spadają w niej jednakowo i jednocześnie (rys. 37).

62. Wkrótce po *Galileuszu* wielki uczyony angielski *Izaak Newton* ¹⁾ w klasycznym swym dziele „*Philosophiae na-*



Rys. 37.

¹⁾ Urodz. w r. 1642, um. w r. 1727.

turalis principia mathematica”¹⁾ ogłosił trzy podstawowe zasady dynamiki, które słusznie należy uważać za główną podwalinę naukową całej wogóle mechaniki.

§ 7. Zasady dynamiczne Newton’a.

I. Zasada pierwsza, albo zasada bezwładności materji.

63. *Wszelkie ciało materjalne, swobodne, to znaczy nie posiadające żadnych przeszkód, ani więzów i nie poddane działaniu żadnych sił, zachowuje wieczny stan spoczynku, albo też trwa wiecznie w ruchu jednostajnym w niezmiennym kierunku*²⁾.

Tę zdolność ciał materjalnych zowiemy **bezwładnością** albo **inercją**.

64. Bezwładność materji mogą pokonywać w ten lub inny sposób tylko *siły*, działające *z zewnątrz* ciał, skutek zaś tego działania sił może być trojaki;

- 1) Siła może ciało nieruchome wprowadzić wogóle w ruch;
- 2) Siła może w ten lub inny sposób zmienić prędkość ruchu ciała i wreszcie;
- 3) Siła może zmienić kierunek ruchu i kształt toru.

65. Bezwładność ciał ujawnia się w licznych zjawiskach, obserwowanych zarówno w przyrodzie, jak i w życiu codziennym. Oto szereg przykładów, ilustrujących zasadę bezwładności w spoczynku i ruchu:

1) W chwili, gdy wóz zostaje szybko wprowadzony w ruch, siedzący w nim ludzie opierają się temu ruchowi wskutek bezwładności spoczynku i doznają gwałtownego szarpnięcia *wstecz*; gdy zaś szybko jadący wóz zostanie raptownie powstrzymany, siedzący w nim ludzie na skutek bezwładności ruchu pochylają się wówczas gwałtownie *naprzód*.

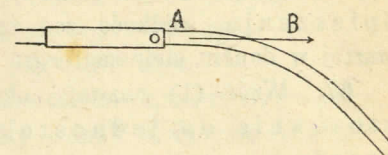
2) Zwykle niezbyt szybkie uderzenie kamieniem w szybę szklaną rozbija ją na drobne części; przeciwnie, szybko wystrzelona kula wybija w tej szybie tylko mały gładki otwór, gdyż w ciągu zbyt krótkiego czasu uderzenia kuli może być pokonana bezwładność spoczynku tylko w nieznacznej części szyby, w pobliżu miejsca uderzenia.

¹⁾ Wydanem w r. 1687.

²⁾ W pierwotnym tekście łacińskim „Matematycznych zasad filozofji” Newtona zasada ta miała następujące brzmienie: Lex I. Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare”.

3) Wbijanie młotka na trzonek odbywa się zwykle przez silne uderzenie wolnym końcem tego trzonka o przedmiot twardy. Trzonek przy tem uderzeniu zostaje raptownie powstrzymany, ciężki zaś i masywny młotek, wskutek bezwładności ruchu, wchodzi na trzonek z drugiego końca.

4) Wykolejenie pociągów najczęściej zachodzi na łukach toru kolejowego, tam bowiem (rys. 38) pociąg wskutek swej bezwładności ruchu ma dążność do poruszania się po linii prostej *AB*, a jeżeli tor kolejowy w tem miejscu nie jest dostatecznie wytrzymały, może wówczas nastąpić katastrofa, przyczem wykolejony pociąg spada z toru po linii *AB*, stycznej do łuku.



Rys. 38.

5) Wołyżerowie cyrkowi mogą, dzięki bezwładności ruchu swych ciał, przelatywać przez obręcz podczas szybkiej jazdy na koniach, przyczem, wyskakując z siodła pionowo w górę przelatują przez obręcz, trafiając ponownie na to samo miejsce siodła. (Dlaczego?)

6) Ze względu na bezwładność ruchu należy wyskakiwać z powozu lub tramwaju zawsze w kierunku jazdy, w przeciwnym bowiem razie wyskakujący ulega łatwo przewróceniu w tył. (Dlaczego?)

Podobnych przykładów działania bezwładności może nam sporo dostarczyć uważna obserwacja wielu innych zjawisk życia codziennego.

II. Druga zasada dynamiczna Newtona.

66. Zasada ta jest uzupełnieniem zasad dynamicznych, podanych przez Galileusza, i określa matematycznie wielkość siły z jej działania dynamicznego w sposób następujący:

*Wielkość siły, działającej na swobodne ciało materjalne, jest wprost proporcjonalna do masy tego ciała, oraz do przyspieszenia nadanego mu w kierunku działania tej siły*¹⁾.

Oznaczając przez:

m — masę ciała swobodnego,

a — jego przyspieszenie,

P — wielkość siły, działającej na to ciało, można zasadę powyższą wyrazić wzorem:

$$P = m \cdot a \quad \dots \quad (1)$$

¹⁾ W pierwotnym tekście łacińskim zasada ta miała następujące brzmienie: „Lex II. Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressae, et fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur”.

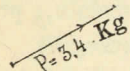
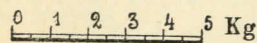
Skąd otrzymuje się wzór, określający wielkość masy danego ciała:

$$m = \frac{P}{a} \dots \dots \dots (2)$$

Masą ciała jest więc liczba, wyrażająca stosunek siły, działającej na ciało, do nadanego przez nią przyspieszenia, wielkość zaś tego stosunku zależna jest od ilości zawartej w danym ciele materji.

67. Wzór (1) pozwala określać jednostki i wymiar fizyczny siły stosownie do jednostek i wymiarów masy oraz przyspieszenia.

Zgodnie z tym wzorem wielkość działania dynamicznego siły (P) wyraża się iloczynem z masy (m) ciała przez przyspieszenie (a), które masa ta zyskuje w kierunku działania siły (P^1).



Rys. 39.

Ponieważ wielkość siły zależy bezpośrednio od wytwarzanego przez nią przyspieszenia, przeto siły należą do wielkości *kierunkowych* i powinny być przedstawiane graficznie za pomocą wektorów (rys. 39).

68. Jednostkę bezwzględną siły, zwaną **dyną**, wyznacza się na mocy wzoru (1) w związku z jednostkami bezwzględnymi: masy (1 gram) oraz przyspieszenia (1 cm/sec²).

Dyna jest siłą, która może masie swobodnej w ilości 1 grama nadać przyspieszenie, wynoszące 1 cm/sec².

Wyrażamy to równością symboliczną:

$$1 \text{ dyna} = 1 \text{ gram} \times 1 \text{ cm/sec}^2 = 1 \text{ gram cm/sec}^2.$$

Ponieważ wymiar masy jest $[M]$, a wymiar przyspieszenia $[LT^{-2}]$, stąd otrzymuje się wymiar siły:

$$[MLT^{-2}].$$

69. Dyna jest jednostką nadzwyczaj małą (można ją porównać naprz. z siłą zwykłej muchy). To też do mierzenia sił większych zostały wprowadzone odpowiednio większe jednostki praktyczne. Dostosowano je do najbardziej znanej i najczęściej obserwowanej siły ciężkości i obrano w tym celu jako jednostki siły ciężary: 1 grama, 1 kilograma i 1 tonny w średniej szerokości geograficznej.

¹⁾ Mówimy więc: „siła mierzy się iloczynem z masy przez przyspieszenie, nie wolno, natomiast, twierdzić, że „siła równa się masie, pomnożonej przez przyspieszenie” (jak nie wolno, naprz., w geometrii twierdzić, że kąt środkowy równa się swemu łukowi).

Wzór (1) pozwoli każdą z tych jednostek praktycznych wyrazić w jednostkach bezwzględnych czyli dynach, wiadomo bowiem, że wielkość przyspieszenia g , jakie nadaje ciałom siła ciężkości podczas spadku swobodnego, dla średnich szerokości geograficznych wynosi: $g = 981 \text{ cm/sec}^2$. W takim razie na mocy wzoru (1) wypadnie, że:

$$\text{ciężar 1 grama} = 1 \text{ gram} \times 981 \text{ cm/sec}^2 = 981 \text{ dyn.}$$

$$" \quad 1 \text{ kilograma} = 1000 \text{ gram} = 981 \cdot 10^3 \text{ dyn.}$$

$$" \quad 1 \text{ tonny} = 1000 \text{ klgr} = 981 \cdot 10^6 \text{ dyn.}$$

Zatrzymując dla tych jednostek siły odpowiednie nazwy: *Gram (Gr)*, *Kilogram (Kg)* i *Tonna (Ton)*, powinniśmy jednak w każdym poszczególnym przypadku odróżniać je ściśle od jednostek masy, mających *te same nazwy*; dlatego też umówimy się jednostki siły pisać z dużych liter alfabetu dla odróżnienia od jednostek masy.

70. *Ćwiczenie 1.* Pociąg, którego masa wynosi: $m = 200 \text{ tonn}$, zostaje wprowadzony w ruch siłą lokomotywy i po upływie czasu $t = 3 \text{ min}$, od początku ruchu zyskuje prędkość: $v = 72 \text{ km/godz.}$ Obliczyć długość (s) drogi, na której ta prędkość została nabyta, oraz siłę pociągową (P) lokomotywy (nie uwzględniając tarcia).

Rozwiązanie. Na mocy II zasady Newtona, oraz znanych wzorów ruchu jednostajnie-przyspieszonego (§ 4 art. 43 i 46), otrzymujemy trzy równania:

$$(1) \quad P = m \cdot a$$

$$(2) \quad v = a \cdot t$$

$$(3) \quad s = \frac{at^2}{2}.$$

Obliczając przyspieszenie a z równania (2):

$$a = \frac{v}{t}$$

i wstawiając do równań (1) i (3), otrzymamy:

$$\begin{aligned} P &= \frac{mv}{t} = \frac{200 \text{ tonn} \cdot 72 \text{ km/godz.}}{3 \text{ min}} \\ &= \frac{(200 \cdot 10^6) \text{ gram} \cdot \left(\frac{72 \cdot 10^5}{60 \cdot 60}\right) \frac{\text{cm}}{\text{sek}}}{(3 \cdot 60) \text{ sek}} = \\ &= \frac{2 \cdot 10^{10}}{9} \text{ dyn.} = \frac{2 \cdot 10^{10}}{9 \cdot 981 \cdot 10^6} \text{ Tonn} = 2,27 \text{ Tonn.} \\ s &= \frac{v}{t} \cdot \frac{t^2}{2} = \frac{v \cdot t}{2} = \frac{72 \text{ km/godz.} \cdot 3 \text{ min}}{2} = \\ &= \frac{\left(\frac{72 \cdot 10^5}{60 \cdot 60}\right) \frac{\text{cm}}{\text{sek}} \cdot (3 \cdot 60) \text{ sek}}{2} = 180000 \text{ cm} = 1,8 \text{ km.} \end{aligned}$$

Ćwiczenie 2. Pocisk, którego masa wynosi: $m = 16$ kg, zostaje wyrzucony z działa siłą gazów prochowych, wynoszącą: $P = 320$ Tonn. Jaka powinna być długość (s) kanału armatniego, aby pocisk wylatywał z niego z prędkością: $v = 800$ m/sek?

Rozwiązanie. Korzystamy z tych samych, co poprzednio, równań. Obliczając z równania (1) przyspieszenie:

$$a = \frac{P}{m};$$

wstawiając je do równania (2), otrzymamy:

$$v = \frac{Pt}{m};$$

stąd czas t , w ciągu którego działa siła gazów prochowych, wynosi:

$$t = \frac{vm}{P}.$$

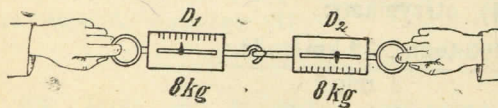
Wstawiając wzory na a i t w równaniu (3), otrzymamy żadaną długość kanału:

$$s = \frac{P}{m} \cdot \frac{v^2 m^2}{2P^2} = \frac{v^2 m}{2P} = \frac{(800 \text{ m/sek})^2 \cdot (16 \cdot \text{kg})}{2 \cdot (320 \text{ Tonn})} = \frac{(800 \cdot 100 \text{ cm/sek})^2 \cdot (16 \cdot 1000) \text{ gram}}{2 \cdot (320 \cdot 981 \cdot 10^6) \text{ dyn}} = 164 \text{ cm} = 1,64 \text{ m}.$$

III. Trzecia zasada dynamiczna Newtona.

71. Wszelkiemu działaniu siły towarzyszy zawsze równe mu i wprost przeciwne oddziaływanie (reakcja) ¹⁾.

Dlatego to, ściskając lub rozciągając siłą ręki jakiś przedmiot, wyraźnie odczuwamy wprost przeciwną siłę, jaką ten przedmiot stawia ręce opór. Siła, wysadzająca nabój z fuzji podczas wystrzału, powoduje odwrotną siłę, jaką kolba fuzji uderza o ramię strzelca.



Rys. 40.

Rozciągając dwa połączone z sobą dynamometry, albo wagi sprężynowe D_1 i D_2 (rys. 40), przekonamy się, że obie są rozciągnięte siłami równymi.

¹⁾ Pierwotny tekst łaciński tej zasady brzmi nieco inaczej: „Lex III. Actioni contrariam semper et aequalem esse reactionem: si-ve corporum duorum actiones in se mutuo semper esse aequales et in partes contrarias dirigi.”

72. Siła może działać na jedno odosobnione ciało albo też na układ ciał, w ten lub inny sposób z sobą połączonych. Siła jest *wewnętrzna* wtedy, gdy źródło jej leży w tem samym ciele lub układzie, na który wywiera ona działanie. Na mocy III zasady Newtona, wszelka siła wewnętrzna wywołuje równą jej i wprost przeciwną siłę oddziaływania. Jeżeli obie te siły są wewnętrzne, wówczas znoszą się wzajemnie, w niczem nie zmieniając położenia całego ciała lub układu.

Tylko więc siły *zewewnętrzne* mogą nadawać ruch pojedynczym ciałom lub całym ich układom. Dla tej to prostej przyczyny człowiek nie może przy największym nawet wysiłku unieść swego ciała własnymi siłami do góry, nie dotykając żadnych innych przedmiotów.

73. O ile jednak działanie pewnych sił wewnętrznych wywołuje zewnętrzną siłę oddziaływania, ciało (albo układ ciał) może być wprowadzone w ruch w kierunku tej właśnie siły zewnętrznej.

Przykład. Czółno na wodzie, siedzący w niem wiosłarz i wiosło stanowią razem pewien odosobniony układ ciał. Opierając się końcem wiosła o brzeg, wiosłarz wywiera w kierunku brzegu siłę wewnętrzną, twardy zaś brzeg wytwarza wówczas wprost przeciwną zewnętrzną siłę oddziaływania, która odpycha czółno od brzegu. W dalszym ciągu ruch czółna odbywa się na skutek odpychania wody wstecz płaską stroną wiosła, przez co wynika niezbędna dla ruchu zewnętrzna siła oddziaływania wody, posuwająca czółno naprzód.

§ 8. Pęd i popęd. Uderzenie.

74. Gdy pewna stała zewnętrzna siła P wprowadza w ruch ciało swobodne o masie m , wówczas prędkość (v) nabytego przez to ciało ruchu przyspieszonego będzie tem większa, im większa jest siła (P), działająca na to ciało, oraz im dłuższy jest czas (t) jej trwania. Powiadamy, że ciało pod działaniem siły zyskuje po pewnym czasie tak zwany popęd albo impuls, którego wielkość jest wprost proporcjonalna do siły (P) oraz do czasu (t) jej działania, ma więc za miarę iloczyn: **Pt** .

Wyrażając siłę (P) w tym iloczynie przez masę (m) poruszanego ciała i nadawane mu przyspieszenie (a) podług II zasady Newtona, otrzymamy:

$$Pt = mat.$$

Ponieważ zaś iloczyn at jest miarą prędkości v , nabytej w ruchu jednostajnie-przyspieszonym po upływie czasu t (§ 4 art. 43), stąd wypada równość:

$$Pt = mv \dots \dots \dots (1)$$

75. Prawa część tej równości, przedstawiająca iloczyn z masy ciała przez jego prędkość, zowie się **pędem** albo **ilością ruchu**. Otrzymujemy stąd ważną zasadę dynamiczną, że **popełd** (Pt), nadany pewnemu ciału pod działaniem stałej siły P w ciągu czasu t , równy jest nabytemu przez to ciało pędowi (mv).

Odwrotnie, ciało, będące w ruchu i obdarzone pędem (mv), napotykać na swej drodze przeszkodę, może wywierać na nią skutek swej bezwładności siłę, trwającą przez pewien czas, czyli może stwarzać popełd (Pt).

Jeżeli pocisk o masie m zostaje wyrzucony z działa z prędkością V , wówczas samo działo, którego masa jest M , zostaje odrzucone wstecz z prędkością v , przyczem z równości pędów pocisku i działa:

$$mV = Mv$$

wypada:

$$v = V \cdot \frac{m}{M},$$

czyli prędkość (v) odbicia działa jest tem mniejsza, im większa jest masa (M) działa w porównaniu do masy (m) pocisku. O ile armata umocowana jest sztywnie na ciężkim fundamencie, prędkość (v) może być znikomo małą. Na tej zasadzie wszelkie maszyny, wykonywające szybkie i silne ruchy, winne być ustawiane na mocnych i masywnych fundamentach.

76. Otrzymanie możliwie dużego popełdu kosztem pędu ciał ruchomych może być osiągnięte dwojako: przez zwiększanie masy tych ciał albo też przez zwiększanie ich prędkości. Dlatego to właśnie młoty, oskardy, kafary, pociski strzelnicze t. p. wyrabiane są z materiałów ciężkich i wprawiane w możliwie szybki ruch.

Z wyrażenia popełdu (Pt) widać, iż skracając czas (t) trwania siły popełdowej (P), można siłę tę odpowiednio powiększać; przeciwnie, wydłużając czas (t), można osłabić działanie siły (P). Uderzenie młotem o przedmiot, leżący na twardym stalowym kowadle, wytwarza większą siłę, niż uderzenie tym samym młotem o przedmiot na podłożu miękkim i podatnym, w pierwszym bowiem wypadku czas trwania uderzenia jest krótszy, niż w drugim. W celu przedłużenia czasu uderzenia, a przez to samo zmniejszenia jego siły, wagony kolejowe zaopatrzone są w silne zderzaki (bufory) sprężynowe. Podobne zderzaki stosowane są również przy arma-

tach polowych, zapobiegają one bowiem zbyt silnym wstrząśnieniom i odrzucaniu działa w chwili wystrzału wstecz. Na tej samej zasadzie przedmioty delikatne i kruche należy zabezpieczać od uderzeń i stłuczenia przez otaczanie ich materiałami miękkimi, naprz. słomą, watą, wełną i t. p.

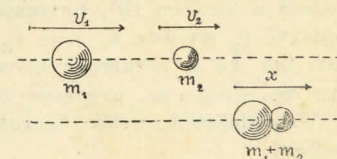
77. Ponieważ popełd zależy bezpośrednio od wielkości i kierunku działania siły, pęd zaś od prędkości, przeto zarówno popełd, jak i pęd należą do wielkości *kierunkowych*. Wobec tego równanie (1) w znaczeniu ściślejszem oznacza, że popełd, nadany przez pewną siłę, równa się nabytemu w tym samym kierunku pędowi.

Pęd i popełd można więc również, jak i prędkości, składać geometrycznie zapomocą wektorów.

Składanie pędów zachodzi zwykle podczas zderzania się lub odbicia ciał. Należy tu wyróżnić dwa zasadnicze przypadki, mianowicie, gdy zderzające się ciała są niesprężyste i sprężyste.

I. Zderzenie się dwóch ciał niesprężystych.

78. Jeżeli jedno ciało, np. kula o masie m_1 , pędząc z prędkością v_1 , napotyka inne ciało o masie m_2 , poruszające się w tym samym kierunku z prędkością v_2 (rys. 41), wówczas oba te ciała uderzają o siebie. Wskutek uderzenia każde z nich ulega pewnemu odkształceniu (deformacji), a w dalszym ciągu oba ciała poruszają się już razem z pewną prędkością wypadkową x , stanowiąc jakby jedno ciało o masie $m_1 + m_2$.



Rys. 41.

Z równania pędów:

$$(m_1 + m_2)x = m_1v_1 + m_2v_2$$

można obliczyć prędkość wypadkową po zderzeniu:

$$x = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2} \dots \dots \dots (2)$$

Wyróżniamy tu następujące przypadki szczególne:

1) Jeżeli obie zderzające się masy są równe ($m_1 = m_2$), wówczas:

$$x = \frac{v_1 + v_2}{2},$$

czyli ciała po uderzeniu poruszają się z prędkością x , równą średniej arytmetycznej z ich prędkości pierwotnych.

2) Jeżeli kierunki prędkości zderzających się mas są różne, wówczas zmienia się znak algebraiczny jednej z nich, np. v_2 . Prędkość wypadkową oblicza się wtedy z wzoru:

$$x = \frac{m_1 v_1 - m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

3) O ile przytem $m_1 = m_2$, wypadnie:

$$x = \frac{v_1 - v_2}{2}.$$

4) Jeżeli masa m_2 przed uderzeniem była nieruchoma, wówczas $v_2 = 0$, a prędkość obu ciał po uderzeniu jest wtedy:

$$x = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2}.$$

5) O ile przytem $m_1 = m_2$, wypadnie:

$$x = \frac{v_1}{2}.$$

II. Zderzenie się dwóch ciał sprężystych.

79. Przypadek ten różni się od poprzedniego tem, że zderzające się ciała ulegają, wprawdzie, chwilowemu odkształceniu, wskutek jednak sprężystości powracają natychmiast do swych pierwotnych kształtów, przyczem jedno z tych ciał ponownie zmniejsza, drugie zaś — ponownie zwiększa swą prędkość o tę samą wielkość, co i w pierwszym stadium uderzenia. Z początku więc oba ciała przybierają prędkość wypadkową x , zgodnie z wzorem (2), przyczem prędkość v_1 zmniejsza się o: $v_1 - x$, gdy prędkość v_2 wzrasta o: $x - v_2$. Oddziaływanie sprężyste podwaja te wielkości tak, że w rezultacie masa m_1 zyskuje prędkość: $x_1 = v_1 - 2(v_1 - x)$, masa zaś druga m_2 prędkość $x_2 = v_2 + 2(x - v_2)$.

Wstawiając do tych wzorów wielkość x z wzoru (2), otrzymamy odpowiednio:

$$x_1 = \frac{v_1(m_1 - m_2) + 2m_2 v_2}{m_1 + m_2} \dots \dots \dots (3)$$

$$x_2 = \frac{v_2(m_2 - m_1) + 2m_1 v_1}{m_1 + m_2} \dots \dots \dots (4)$$

80. Uwzględniamy tu następujące przypadki szczególne:

1) Jeżeli $m_1 = m_2$, wówczas: $x_1 = v_2$; $x_2 = v_1$. To znaczy, że ciała o równych masach po zderzeniu się wymieniają swoje prędkości pierwotne.

2) O ile przytem $v_2 = 0$, otrzymamy: $x_1 = 0$; $x_2 = v_1$; to znaczy, że jeżeli druga z dwóch równych mas była nieruchoma, wówczas pierwsza zatrzymuje się, oddając całą swą prędkość i pęd masie drugiej.

3) Jeżeli $v_2 = 0$, ale masy m_1 i m_2 nie są równe, wówczas po zderzeniu się zyskują prędkości:

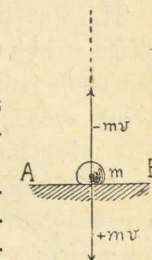
$$x_1 = \frac{v_1(m_1 - m_2)}{m_1 + m_2}; \quad x_2 = \frac{2m_1 v_1}{m_1 + m_2}.$$

4) O ile przytem $m_1 > m_2$, wówczas obie te prędkości mają jednakowe znaki algebraiczne, czyli kierunki zgodne z kierunkiem prędkości pierwotnej v_1 , masa jednak mniejsza zyskuje prędkość większą ($x_2 > x_1$).

5) Jeżeli zaś $m_1 < m_2$, wówczas prędkość pierwszej z tych mas ma znak i kierunek przeciwny; to znaczy, że masy po zderzeniu się odbiegają od siebie w przeciwną stronę.

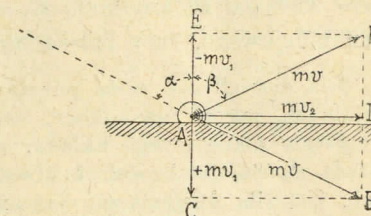
81. Uderzenie ciała sprężystego o nieruchomą i również sprężystą powierzchnię powoduje zjawisko odbicia; odbicie może być prostopadłe lub ukośne.

Jeżeli kula sprężysta o masie m (rys. 42) uderza prostopadłe o sprężystą płaszczyznę AB , wówczas po chwilowym odkształceniu pęd ($+mv$) wskutek oddziaływania sprężystego zmienia swój kierunek na przeciwny, co oznacza, że kula sprężysta odbija się wówczas po tej samej linii, ale w kierunku przeciwnym i z tą samą wielkością pędu ($-mv$).



Rys. 42.

82. Przy uderzeniu ukośnem (rys. 43) pod kątem padania α względem prostopadłej AE do płaszczyzny pęd (mv), przedstawiony wektorem AB , ulega rozkładowi w kierunkach: równoległym (AD) i prostopadłym (AC) do płaszczyzny, przyczem ta ostatnia składowa pędu wskutek oddziaływania sprężystego zmienia swój kierunek na przeciwny i daje wektor $AE = -AC$. Pęd wypadkowy odbywa się ostatecznie w kierunku wektora $AF = mv$. Z trójkątów równych ABC i AEF widać przytem, że kąt padania (α) równa się wówczas kątowi odbicia (β).

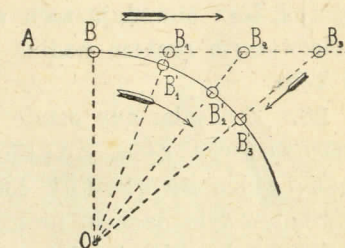


Rys. 43.

§ 9. Siły, powstające w ruchu krzywoliniowym.

83. Ponieważ ciała materialne *swobodne* zachowują podczas ruchu wskutek swej bezwładności niezmienną prędkość i niezmienny kierunek ruchu *po linii prostej*, stąd wszelkie wykrzywienie toru może być spowodowane tylko działaniem pewnych sił zewnętrznych.

Przypuśćmy, że pewne ciało (rys. 44), poruszające się pierwotnie po linii prostej AB , w dalszym ciągu, poczynając od punktu B , zmuszone jest wykonywać ruch obrotowy po okręgu koła. Gdyby nie działała tu żadna siła zewnętrzna, ciało poruszałoby się na mocy prawa



Rys. 44.

bezwładności w kierunku prostej $BB_1B_2B_3...$ stycznej do okręgu i w równych odstępach czasu przebywałoby jednakowe drogi: $BB_1 = B_1B_2 = B_2B_3$ i t. d.

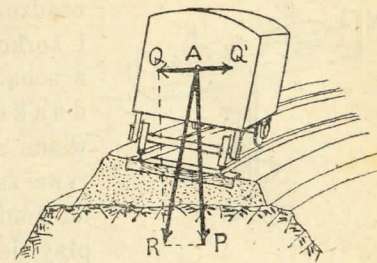
84. Jeżeli zaś ciało to posiada pewne więzy, zmuszające je do zejścia z linii prostej i poruszania się po okręgu $BB_1'B_2'B_3'...$, wówczas obok jednostajnego ruchu bezwładnego w kierunku stycznej istnieje, jak widać, jeszcze ruch *przyspieszony* w kierunku promienia koła, co potwierdzają stale zwiększające się odcinki drogi: $B_1B_1', B_2B_2', B_3B_3'$ i t. d. w kierunku tego ruchomego promienia. Wobec tego twierdzimy, że powinno wówczas istnieć przyspieszenie, skierowane wzdłuż promienia ku środkowi O koła w każdym punkcie drogi. Przyspieszenie to jest wynikiem działania na ciało pewnej siły zewnętrznej, noszącej nazwę *siły dośrodkowej*. Siłę tę wytwarzają zazwyczaj więzy materialne w postaci, na przykład, nici lub pręta BO , który łączy ciało wirujące ze środkiem O , albo też w postaci zakrzywionych szyn toru kolejowego, rury lub kanału, po którym odbywa się ruch cieczy i t. p.

Siła dośrodkowa może powstawać również bez pośrednictwa więzów materialnych, jak to ma miejsce, na przykład, w naszym układzie słonecznym. Wszystkie planety tego układu, w tej liczbie i Ziemia, krążą, jak wiadomo, dookoła słońca, po liniach krzywych, a siłą, utrzymującą te ciała na ich torach, jest siła wzajemnego ciążenia (grawitacji) między słońcem, jako ciałem centralnym, a każdą planetą.

85. We wszystkich wymienionych przykładach siła dośrodkowa, wykrzywiająca tor, zawsze pochodzi od pewnego innego ciała lub układu ciał, jest więc siłą *zewnętrzną*. Na mocy jednak III zasady dynamicznej Newtona, siła tej ciała wirujące przeciwstawia jednocześnie równą i wprost przeciwną *wewnętrzną* siłę oddziaływania, która jest wynikiem bezwładności i którą zwiemy *siłą odśrodkową*. Wywiera ona działanie na tor lub inne więzy, zmuszające ciało do ruchu krzywoliniowego. Działając więc na dwa różne ciała, obie siły, dośrodkowa i odśrodkowa, nie równoważą się, lecz powodują ruch w kierunku środka O (rys. 44), co łącznie z pierwotnym ruchem wzdłuż prostej AB daje ruch obrotowy po okręgu koła.

86. Z chwilą, gdy ustaje działanie siły dośrodkowej, znika jednocześnie siła odśrodkowa, ciało zaś porusza się w dalszym ciągu tylko na skutek swej bezwładności po linii prostej stycznej w tym punkcie toru, w którym ustało działanie obu sił. Tak właśnie zachowuje się ciało (rys. 44) od chwili, gdy pręt czy nie OB , łącząca je ze środkiem O , ulegnie pęknięciu; w podobny też sposób poruszają się bryłki błota, odpadające od kół powozu, pociągi podczas wykolejenia na łukach toru (patrz rys. 38) i t. p.

87. Każde ciało, gdy porusza się po torze krzywym, poddane jest prócz działającej na nie zewnętrznej siły dośrodkowej jeszcze działaniu również zewnętrznej siły ciężkości. Z dwóch tych sił, posiadających swoje wektory w dwóch różnych kierunkach, powstaje pewien wektor sumaryczny czyli wypadkowy, odchylony od kierunku pionowego w stronę środka krzywizny toru. Wiemy nadto, że każde ciało, poruszające się po torze krzywym, np. wagon kolejowy (rys. 45), wywiera działanie na linię lub powierzchnię swego toru. Działanie to składa się z 2 sił *zewnętrznych* względem tego toru, mianowicie: ciężaru P oraz siły *odśrodkowej* Q , której wektor jest równy i wprost przeciwny do wektora siły *dośrodkowej* Q' . Wektor wypadkowy R powinien działać możliwie prostopadle (normalnie) do powierzchni toru kolejowego, która też na łukach powinna być nieco nachylona w stronę środka krzywizny łuku tak, aby siła wypadkowa R działała prostopadle do tej powierzchni. Niezastosowanie tego środka mogłoby spowodować wykolejenie wagonu, który przewróciłby się w kierunku siły odśrodkowej Q . W podobny sposób budowane są, jak wiadomo, tory na arenach cyrkowych, cyklo-dromach, polach wyścigowych i t. p.



Rys. 45.

88. Wielkość siły zarówno dośrodkowej, jak i odśrodkowej jak to będzie wyjaśnione teoretycznie w części II podręcznika, jest:

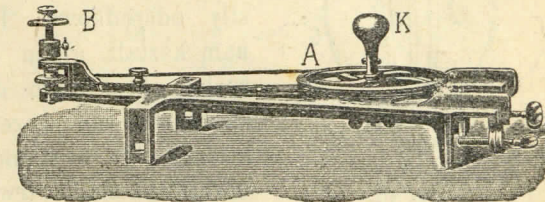
1-o) wprost proporcjonalna do masy (m) ciała wirującego,

2-o) wprost proporcjonalna do *kwadratu* prędkości liniowej (v^2) po torze krzywym i wreszcie

3-o) odwrotnie proporcjonalna do wielkości promienia (r) krzywizny toru, co wszystko razem da się wyrazić następującym wzorem matematycznym:

$$P = \frac{mv^2}{r}.$$

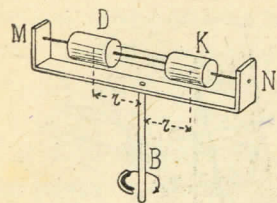
89. Zależności powyższe mogą być sprawdzone za pomocą przyrządu, noszącego nazwę maszyny odśrodkowej albo wirownicy (rys. 46).



Rys. 46.

Kręćąc ręczną korbą K większe koło A wirownicy, można za pośrednic-

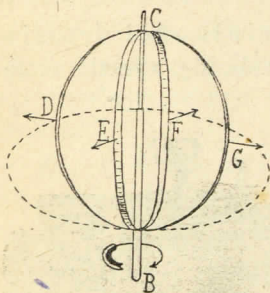
twem pasa albo linki wprawiać w szybki ruch obrotowy kółko mniejsze. Na osi B tego kółka mogą być nasadzone kolejno rozmaite przyrządy, wykazujące działanie siły odśrodkowej, na przykład:



Rys. 47.

1) Ramka (rys. 47), w której na pręcie MN osadzone są luźno dwa walce: drewniany D i korkowy K , jednakowej wielkości, połączone z sobą. Gdy oba te walce znajdują się w jednakowych odległościach (r) od osi B i wprawione są w ruch wirowy, wówczas walec D porzywa za sobą walec K i oba razem odskakują na koniec M ramki. Dzieje się tak dlatego, że przy jednakowych pierwotnie promieniach [(r) i prędkościach (v)] walec drewniany D posiada większą masę (m), a zatem nieco większą siłę odśrodkową w porównaniu do walca korkowego K . Aby walce nie zmieniały swych odległości od osi podczas wirowania, należy walec D nieco przybliżyć, walec zaś K odpowiednio oddalić od osi. Walec D zyskuje wówczas obok większej masy (m) mniejszy promień (r), a przez to samo mniejszą prędkość liniową (v), gdyż będzie zakreślał krótsze drogi dokoła osi; więc chociaż pierwsze dwa czynniki, jak to widać z wzoru w art. 88, powiększają siłę odśrodkową, za to zmniejszenie prędkości (v) zmniejsza w stosunku do kwadratu tej prędkości siłę odśrodkową, wskutek czego siły obydwóch walców D i K mogą się zrównać, a podczas wirowania odległości ich do osi pozostaną niezmiennie. Zbyt duże jednak odsunięcie walca K od osi może zwiększyć jego siłę odśrodkową w takim stopniu, że będzie on w stanie pokonać siłę walca D i wówczas oba razem odskoczą ku końcowi N ramki.

2) Na osi B wirownicy (rys. 48) umieszcza się dwie okrągłe sprężyny stalowe, przymocowane do osi u dołu, u góry zaś luźno na niej nasadzone. Podczas wirowania obie te sprężyny spłaszczają się w kierunku osi B wskutek tego, że w punktach D, E, F, G , najbardziej odsuniętych od osi, rozwijają się największe siły odśrodkowe. Doświadczenie to tłumaczy nam kształt globu ziemskiego, który wskutek ruchu obrotowego dokoła swej osi uległ nieznacznemu spłaszczeniu na biegunach, gdy był jeszcze cały w stanie płynnym. Ponieważ ruch obrotowy ziemi trwa nieustannie, stąd ciała, znajdujące się na równiku, ulegają

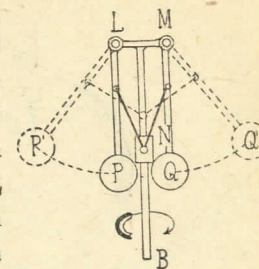


Rys. 48.

zmniejszeniu swego ciężaru nie tylko wskutek największego oddalenia od środka ziemi, ale nadto wskutek największej w tych miejscach siły

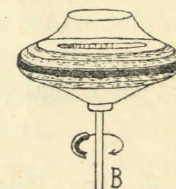
odśrodkowej. Ogólne zmniejszenie ciężaru ciał na równiku stanowi około $\frac{1}{280}$ ciężaru tych samych ciał na biegunach (patrz wstęp art. 11).

3) Dwie kule metalowe P i Q (rys. 49), zawieszono niedaleko od osi B w punktach L i M , podczas wirowania oddalają się od tej osi mniej lub więcej, zależnie od prędkości ruchu, i podnoszą przytem wzdłuż osi suwak N . Na podobnej zasadzie budowane są przy maszynach parowych tak zwane regulatory odśrodkowe. Mają one na celu regulowanie biegu maszyny w ten sposób, że suwak N , połączony z odpowiednim mechanizmem, w razie nadmiernego zwiększenia się prędkości maszyny, zmniejsza dopływ pary; przeciwnie, zwiększa ten dopływ wówczas, gdy prędkość maszyny jest zbyt mała.



Rys. 49.

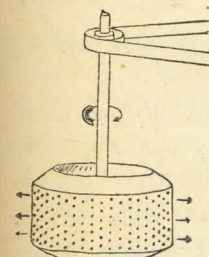
4) Na oś B wirownicy (rys. 50) nasadza się odpowiedniego kształtu naczynie, które zawiera kilka nie miesających się z sobą cieczy różnej gęstości, na przykład: rtęć, wodę i oliwę. Po wprawieniu naczynia w ruch wirowy cieczy te, wskutek siły odśrodkowej, odchodzą od dna i rozkładają się na bocznych ścianach warstwami poziomymi w ten sposób, że warstwę środkową tworzy ciecz, posiadająca najcięższe cząsteczki, a więc rtęć, dalej u góry i u dołu układa się dwiema warstwami woda, a za nią w taki sam sposób oliwa.



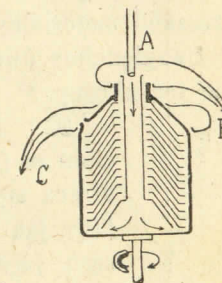
Rys. 50.

90. W technice zasadą działania siły odśrodkowej posługują się w celu oddzielania cieczy od ciał stałych lub rozdzielania dwóch cieczy o różnych

gęstościach. Na przykład, w cukrowniach zapomocą wirówek (rys. 51), kryształy cukru są oczyszczane od oblekającej je masy kleistej, a następnie splukiwane wodą i parą. Wszystkie te cieczy pod działaniem siły odśrodkowej wydobywają się na zewnątrz przez otworki sita w bocznych ścianach wirówki, wewnątrz zaś pozostają czyste i suche kryształy cukru. Nieco odmienną konstrukcję posiadają wi-



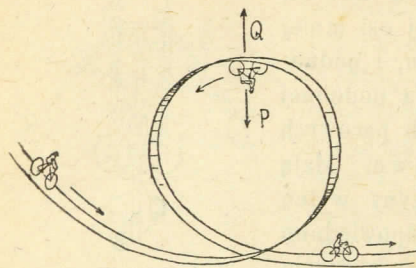
Rys. 51.



Rys. 52.

rówki (separatory), służące do oddzielania śmietanki od mleka (rys. 52). Wirówki te posiadają wewnątrz odpowiednio urządzone przegrody stożkowe, pomiędzy które dostaje się mleko od dołu z kanału A . Podczas wirowania lżejsze cząsteczki tłuszczowe, stanowiące śmietankę, trzymają się bli-

żej osi i, unosząc się stopniowo do góry, wychodzą wreszcie z wirówki przez rurkę *B*, wówczas, gdy cięższe od nich wodniste składniki mleka odchodzą dale od osi i wydobywają się nazewnątrz przez rurkę *C*.



Rys. 53.

W najwyższym punkcie tego toru siła odśrodkowa *Q* musi być tak duża, aby przewyższała ciężar *P* cyklisty wraz z welocypedem. Z tej samej zasady korzystał znany ze swych karkołomnych popisów lotnik Pégoud i jego naśladowcy („Martwe pętle” w powietrzu).

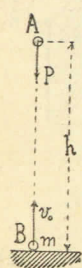
§ 10. Rzut pionowy i ukośny ciał ważkich w próżni.

92. Na mocy zasad dynamiki, wyłożonych w §§ 6 i 7, można obliczać ruch ciał ważkich, rzucanych z pewną prędkością pierwotną (v_0) i poddanych następnie tylko sile ciężkości. Ponieważ taki rzadki i podatny ośrodek materialny, jak powietrze, stawia podczas ruchu opór zwykle bardzo nieznaczny, wobec tego obliczymy ruch w przypuszczeniu, że odbywa się on w próżni, czyli w przestrzeni wolnej od wszelkich przeszkód materialnych.

Uwzględnimy dwa przypadki rzutu, kiedy kierunek jego jest pionowy albo też ukośny.

93. *I. Rzut pionowy.* Pęd (mv_0), udzielony pewnemu ciału *m* (rys. 54) w kierunku pionowym do góry, stopniowo utracą się pod działaniem odwrotnie skierowanego popędu (Pt), jaki sprawia siła ciężkości (*P*). Wskutek tego wynika ruch jednostajnie opóźniony z opóźnieniem, wynoszącym: $g = 981 \text{ cm/sec}^2$.

Korzystając z wzorów (7) i (8) tego ruchu (§ 4 art. 50), można obliczyć czas (*t*), w ciągu którego rzucone ciało utraci cały swój pęd i zatrzyma się, następnie zaś można znaleźć wysokość ($AB = h$) wzniesienia do najwyższego punktu



Rys. 54.

A drogi. W punkcie tym prędkość (*v*) staje się równą zero, co wyrażamy równaniem:

$$v = v_0 - gt = 0,$$

z którego wypadnie czas wznoszenia się:

$$t = \frac{v_0}{g} \dots \dots \dots (1)$$

Podstawiając obliczoną wartość (*t*) we wzorze 8 w art. 50 na drogę przebytą, otrzymamy wysokość wznoszenia się:

$$h = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 = \frac{v_0^2}{g} - \frac{g v_0^2}{2g^2};$$

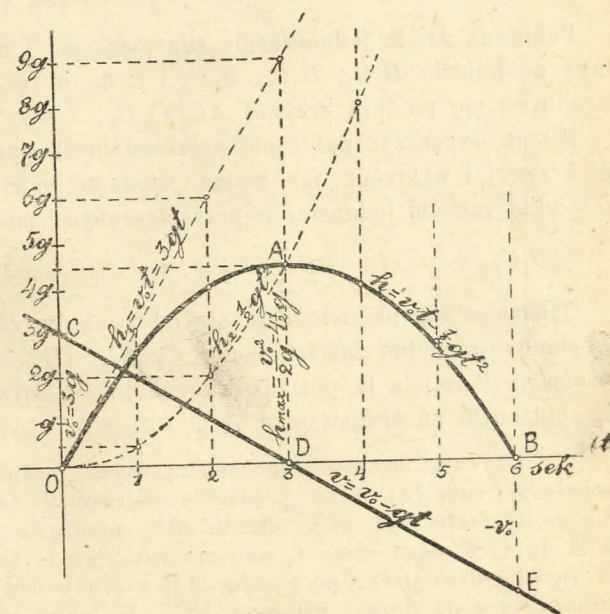
albo po uproszczeniu:

$$h = \frac{v_0^2}{2g} \dots \dots \dots (2)$$

Po chwilowym zatrzymaniu się w najwyższym punkcie *A* swojej drogi rzucone ciało rozpoczyna natychmiast spadek powrotny ku ziemi ruchem jednostajnie przyspieszonym z przyspieszeniem *g*. Ponieważ długość drogi (*h*), przebytej w tym ruchu, jest taka sama, jak i podczas wznoszenia się, wobec tego czas spadania jest taki sam, jak i czas wznoszenia się ciała, a zatem i prędkość końcowa spadku w punkcie *B* wypadnie taka sama, jak prędkość pierwotna (v_0) rzutu w tym samym punkcie.

94. Wyniki, otrzymane w obu wzorach (1) i (2) mogą być sprawdzone metodą graficzną przez zbudowanie wykresów obydwóch funkcji: prędkości: $v = v_0 - gt$ i drogi przebytej: $h = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2$ (rys. 55). Wykresy odpowiadają pewnej prędkości pierwotnej: $v_0 = 3g = 3 \cdot 9,81 = 29,43 \text{ m/sec}$. Prędkość ta po upływie czasu:

$$t = \frac{v_0}{g} = 3 \text{ sek.}$$



Rys. 55.

spada do zera (punkt D prostej funkcyjnej CDE), poczem zmienia swój znak algebraiczny (spadek powrotny) i osiąga wielkości pierwotnej: — $v_0 = -3g$ po upływie $2t = 6$ sek od początku ruchu.

Funkcja wysokości: $h = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2$ jest różnicą geometryczną funkcji linowej: $h_1 = v_0 t$ i parabolicznej: $h_2 = \frac{1}{2} g t^2$. W rezultacie przez odjęcie rzędnych w poszczególnych punktach tych linii otrzymuje się parabolę OAB z wierzchołkiem w punkcie A , który odpowiada najwyższemu punktowi drogi: $h_{max} = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{9g^2}{2g} = 4\frac{1}{2}g = 4\frac{1}{2} \cdot 9,81 = 44,14$ m.

95. II. *Rzut ukośny.* Jeżeli ciało m w punkcie A (rys. 56) ma nabyty pęd z prędkością pierwotną v_0 pod pewnym kątem α względem poziomu AC , wówczas wskutek bezwładności ciało to poruszałoby się po prostej $AB_1 B_2 B_3 \dots$ ruchem jednostajnym. Przebywałoby ono wzdłuż tej prostej w kolejnych jednostkach czasu (sekundach) jednakowe drogi:

$$v_0 = AB_1 = B_1 B_2 = B_2 B_3 \text{ i t. d.}$$

Ponieważ działa jednocześnie siła ciężkości i odbywa się spadek pionowy po liniach: $B_1 C_1, B_2 C_2, B_3 C_3$ i t. d., w rezultacie więc ruch ciała odbywa się po linii krzywej $AC_1 C_2 C_3 \dots C$.

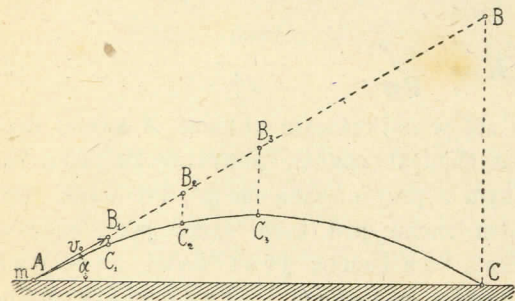
Można wyznaczyć położenie poszczególnych punktów C_1, C_2, C_3 i t. d. tej krzywej i wykreślić ją, mając wiadome odcinki dróg, przebytych w spadku ruchem jednostajnie-przyspieszonym, podług wzorów:

$$B_1 C_1 = \frac{g}{2} \cdot 1; \quad B_2 C_2 = \frac{1}{2} g \cdot 4; \quad B_3 C_3 = \frac{1}{2} g \cdot 9 \text{ i t. d.}$$

Obliczone odcinki odmierza się od punktów $B_1, B_2, B_3 \dots$ w kierunku pionowym, dolne zaś ich końce $C_1, C_2, C_3 \dots$ po złączeniu utworzą parabolę. Parabola ta posiada wierzchołek w najwyższym punkcie drogi, położonym na środku łuku AC .

96. Używając wzorów trygonometrycznych, można w zależności od kąta nachylenia rzutu (α), oraz prędkości pierwotnej (v_0) obliczyć odległość ($AC = d$) rzutu (rys. 56). Jeżeli ciało przebywa po paraboli całą drogę od A do C w ciągu czasu t , wówczas ruch ten może być uważany za wynik ruchu jednostajnego po prostej AB z prędkością v_0 oraz spadku z przyspieszeniem g po prostej pionowej BC . W takim razie dla chwili końcowej ruchu otrzymamy:

$$AB = v_0 t; \quad BC = \frac{1}{2} g t^2;$$



Rys. 56.

z trójkąta zaś prostokątnego ABC wypada, że:

$$BC = AB \sin \alpha; \quad AC = AB \cos \alpha;$$

$$\text{albo:} \quad \frac{1}{2} g t^2 = v_0 t \sin \alpha; \quad d = v_0 t \cos \alpha.$$

Obliczając z wzoru pierwszego czas:

$$t = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$$

i wstawiając do wzoru drugiego, otrzymamy:

$$d = \frac{2v_0^2}{g} \sin \alpha \cos \alpha = \frac{v_0^2}{g} \cdot \sin 2\alpha.$$

Jeżeli kąt α wyrażony jest w postaci różnicy: $\alpha = 45^\circ - \beta$ (rys. 57), wówczas wzór na obliczenie d przybiera inną postać, mianowicie:

$$d = \frac{v_0^2}{g} \sin (90^\circ - 2\beta).$$

Z wzoru tego widać, że odległość d jest największą wtedy, gdy:

$$\sin (90^\circ - 2\beta) = 1; \quad 90^\circ - 2\beta = 90^\circ,$$

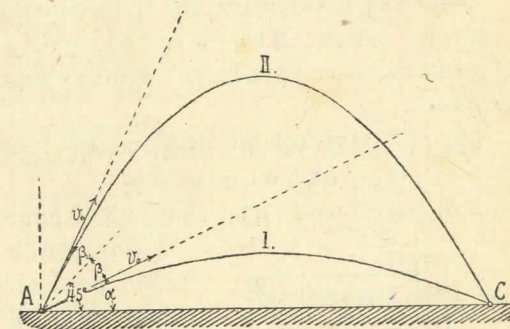
czyli, gdy kąt $\beta = 0$, kąt zaś nachylenia rzutu: $\alpha = 45^\circ$.

Następnie z tegoż wzoru widać, że zamiast liczby $\sin (90^\circ - 2\beta)$ można użyć równej jej co do wielkości i znaku liczby $\sin (90^\circ + 2\beta)$, czyli ta sama odległość rzutu d wypada zarówno przy kącie nachylenia $\alpha = 45^\circ - \beta$ jak i przy kącie $\alpha = 45^\circ + \beta$, a więc przy tej samej prędkości pierwotnej (v_0) rzutu z punktu A można rzucić ciało do punktu C dwoma sposobami po paraboli I lub II (rys. 57).

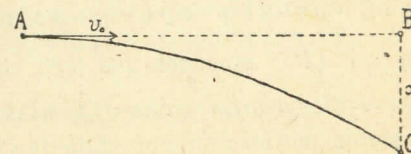
Własność ta znajduje zastosowanie praktyczne w artylerji i pozwala, korzystając z paraboli II, celować i trafiać do przedmiotu C z ukrycia, np. z za góry lub wału fortyfikacyjnego.

97. Przypadkiem szczególnym rzutu ukośnego jest rzut poziomy (rys. 58).

Tor AC tego rzutu można obliczyć i wykreślić w taki sam sposób, jak poprzednio. Przedstawia on również parabolę z wierzchołkiem w początkowym punkcie A drogi. Znając tę krzywą, można, na przykład, obli-



Rys. 57.



Rys. 58.

czyć odległość $BC = x$ między punktem B , do którego wycelowany jest poziomo pocisk, a punktem C , do którego pocisk ten faktycznie trafia. Oznaczając odległość AB przez s , prędkość początkową rzutu przez v_0 , otrzymamy czas (t) trwania ruchu z wzoru:

$$t = \frac{s}{v_0}, \text{ a zatem: } x = \frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2}g \cdot \frac{s^2}{v_0^2}.$$

§ 11. Przeszkody ruchu.

98. Ciał absolutnie swobodnych w naszej ziemskiej przyrodzie niema wcale, gdyż w jakichkolwiek warunkach odbywał się ruch ciała, towarzyszą mu zawsze w większym lub mniejszym stopniu nigdy nieuniknione przeszkody ze strony innych, napotykanym na drodze ciał materialnych.

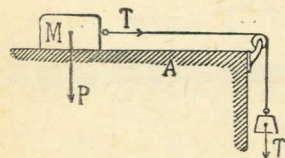
Pierwszy rodzaj przeszkód wynika wtedy, gdy ciało zmuszone jest poruszać się swą powierzchnią zewnętrzną po powierzchni innych ciał; wynika stąd przeszkoda, zwana *tarciem*.

O ile zaś poruszające się ciało zmuszone jest przenikać przez pewną, mniej lub więcej podatną substancję, czyli ośrodek materialny, wynika stąd przeszkoda, zwana *oporem ośrodka*.

99. I. Wyróżniamy dwa rodzaje tarcia:

1-o) przy posuwaniu się,

2-o) przy toczeniu się jednej powierzchni po drugiej.



Rys. 59.

Gdy pewne ciało M (rys. 59), przyciśnięte do powierzchni A siłą P , ma być wprowadzone w ruch po tej powierzchni, wówczas, wobec istnienia tarcia między tem ciałem a powierzchnią A , musi być zastosowana pewna siła T , niezbędna do pokonania tak zwanej *siły tarcia*, działającej zawsze

w kierunku *przeciwnym* do wykonywanego ruchu. Siła ta wynika skutkiem zawadzania o siebie nierówności na powierzchniach ocierających się ciał.

Doświadczalnie stwierdzono, że siła (T) tarcia pierwszego rodzaju jest wprost proporcjonalna do wielkości siły naciskającej (P), stosunek zaś tych sił $\left(\frac{T}{P}\right)$ jest liczbą stałą, noszącą nazwę *spółczynnika tarcia* (f), właściwego danym dwom ocierającym się o siebie powierzchniom. Siła tarcia nie jest przytem wcale zależna od tego, jaką częścią swojej powierzchni ciało M

przylega do powierzchni A . Opierając się na powyższem określeniu, można siłę tarcia obliczyć z wzoru:

$$T = f \cdot P.$$

Co się tyczy współczynnika tarcia (f), to wielkość jego jest zależna z jednej strony od materiału, z drugiej zaś od stanu ocierających się powierzchni.

Staranne wygładzanie oraz wprowadzanie pomiędzy te powierzchnie warstwy cieczy lub smaru może znacznie zmniejszyć tarcie, usunąć je zaś zupełnie nie można żadnymi najdoskonalszymi nawet środkami. Od tarcia zatem nie jest wolna żadna, najdokładniej wykonana i najlepiej obsługiwana maszyna.

Spółczynnik tarcia (f) niektórych materiałów wynosi:

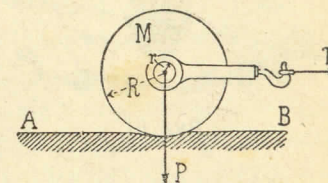
mosiądzu albo żelaza po żelazie:
na sucho 0,4; z użyciem smaru 0,15;

żelaza po drzewie dębowem:
na sucho 0,5; z użyciem smaru 0,2;

cegł po ceglach 0,6; sanek po śniegu 0,03 i t. p.

100. Tarcie rodzaju drugiego przy toczeniu wynika wskutek powstawania nieznacznych wgłębień (rys. 60), jakie toczące się ciało M powoduje na powierzchni AB . Siła tego tarcia (T_1) jest również zależna od siły naciskającej (P) i współczynnika tarcia (f_1) podług wzoru:

$$T_1 = f_1 P.$$



Rys. 60.

Spółczynnik f_1 tarcia tego rodzaju wypada o wiele mniejszy, niż współczynnik tarcia przy posuwaniu. Tem się tłumaczy między innemi użycie kół w pojazdach, wrotkach, rolek, ułatwiających przesuwanie ciężkich mebli, łożysk kulkowych w welocypedach i t. p.

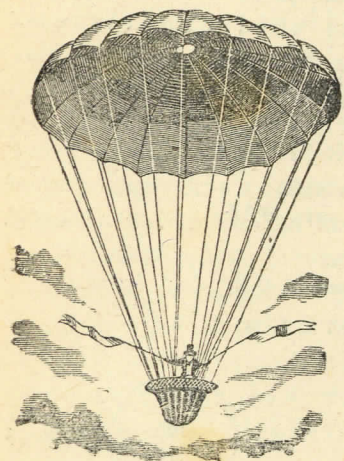
Siła (T_1) tarcia przy toczeniu może być znacznie zmniejszona przez użycie kół (rys. 60) o możliwie dużym promieniu (R), a cienkich osiach (r).

Spółczynnik (f_1) tego tarcia w niektórych przypadkach wynosi:
dla pojazdów po szosach 0,01; po bruku 0,02; po zwykłej drodze 0,08 do 0,16, dla wagonów kolejowych po szynach stalowych 0,004; dla lokomotyw 0,01 i t. d.

Lokomotywa, wprowadzając w ruch pociąg, musi przedewszystkiem pokonać tarcie. O ile jednak podczas nabytego już ruchu siła lokomotywy wystarcza tylko na pokonywanie tych przeszkód ruchu,

czyli innemi słowy tylko równoważy się z siłą tarcia T , zachodzi wówczas ruch *jednostajny*, jak gdyby nie działała żadna siła zewnętrzna, a pociąg ulegał tylko bezwładności. Dopiero skutkiem pewnego nadmiaru siły pociągowej lokomotywy może powstać ruch *przyśpieszony*.

101. II. Co się tyczy oporu ośrodka, to wielkość wynikającej z tego oporu siły, prócz materiału i gęstości samego ośrodka, jest zależna jeszcze od *kształtów geometrycznych* poruszających się ciał i wreszcie w znacznym stopniu od ich *prędkości*.



Rys 61.

Opór ośrodka może być znakomicie zmniejszony przez nadanie ciałom poruszającym się kształtu, zaostrzonego ku przodowi. Takie właśnie kształty posiadają, jak wiadomo, kadłuby statków, pociski strzelnicze, balony sterowe i t. p. Przeciwnie, w celu wytworzenia dużego oporu ośrodka, ciała powinny posiadać dużą i przytem możliwie wklęsłą na przodzie powierzchnię, jaką np. nadaje się spadochronom (rys. 61).

Wpływ prędkości ruchu na wielkość oporu ośrodka nie jest stały. Dostrzeżono, mianowicie, że przy prędkościach nieznacznych opór ten jest wprost proporcjonalny do pierwszej potęgi prędkości; w miarę jednak przyśpieszania ruchu opór może stać się proporcjonalnym do kwadratu, a nawet do sześciastu prędkości.

W rzucie pionowym i ukośnym (patrz poprzedni § 10) przy zbyt dużych prędkościach pierwotnych v_0 (np. przy prędkościach pocisków armatnich, dochodzących do 900 m/sec) wskutek wzmożonego oporu powietrza zachodzą mniej lub więcej znaczne zmiany prędkości ruchu oraz kształtu toru, który w rzucie ukośnym nie jest już dokładną parabolą (rys. 56), lecz tak zw. krzywą balistyczną.

Spadochron (rys. 61), dzięki swej dużej powierzchni, osiąga podczas spadania w krótkim czasie takiej prędkości, przy której siła oporu powietrza równoważy się z ciężarem spadochronu. Od tej chwili aż do końca ruchu spadek odbywa się już z prędkością stałą i stosunkowo nieznaczną. W podobny sposób, jak spadochrony, działają regulatory wiatraczkowe w mechanizmach zegarów, skrzydła ptaków podczas fruwanía i t. p.

102. Wymienione wyżej przeszkody ruchu odgrywają bardzo ważną rolę w życiu i całym układzie naszej ziemskiej przyrody. Przyczyniają się one z jednej strony do utrudnienia lub powstrzymywania ruchu, z drugiej, natomiast, strony, te same przeszkody *umożliwiają powstawanie wszelkich ruchów* w przyrodzie. Bez sił *zewnętrznych*, jakie powstają wskutek tarcia i oporu ośrodka, nie mogłyby się o własnych, t. j. *wewnętrznych*, siłach poruszać zwierzęta ani ludzie na ziemi, ryby w wodzie, ptaki w powietrzu, wreszcie pociągi kolejowe, statki, samochody, samoloty i t. p. Można twierdzić, że bez przeszkód ruchu w przyrodzie naszej istniałoby jedno z dwojga: albo wieczny, bezwładny spoczynek i martwota, albo też wieczny, nigdy i niczem niepowstrzymany ruch.

103. *Ćwiczenie.* Pociąg, ważący $P = 600$ Tonn, wprawia w ruch lokomotywa. Obliczyć minimalny ciężar tej lokomotywy, wiedząc, że współczynnik tarcia pierwszego rodzaju między kołami a szynami wynosi: $f = 0,15$, oraz tarcia drugiego rodzaju dla całego pociągu $f_1 = 0,005$.

Rozwiązanie. Minimalny ciężar (Q) lokomotywy powinien być wyznaczony tak, aby siła tarcia ($T = fQ$), jaka wynika między kołami prowadzącymi lokomotywy a szynami, wystarczała z nadmiarem do otrzymania niezbędnej zewnętrznej siły pociągowej (P_1) lokomotywy, w przeciwnym bowiem razie koła ślizgałyby się bezskutecznie po szynach na jednym miejscu. Ponieważ pociąg waży $P = 600$ Tonn, stąd niezbędną na pokonanie tarcia drugiego rodzaju siłę pociągową P_1 otrzymamy z wzoru:

$$P_1 = f_1 P = 0,005 \cdot 600 = 3 \text{ Tonn.}$$

W takim razie ciężar Q lokomotywy obliczy się z nierówności:

$$fQ > P_1;$$

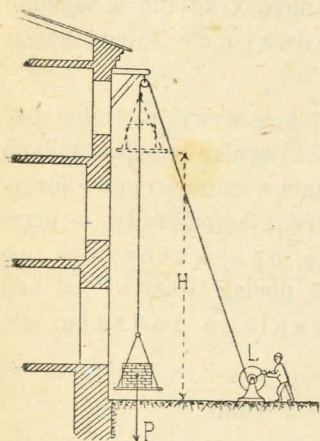
stad:
$$Q > \frac{P_1}{f}; \quad Q > \frac{3}{0,15}; \quad Q > 20 \text{ Tonn};$$

lokomotywa powinna więc ważyć co najmniej 20 Tonn. Prócz siły P_1 , niezbędnej do pokonania tarcia, musi ona wytworzyć jeszcze pewną siłę P_2 , niezbędną do pokonania bezwładności pociągu i nadania mu mniej lub więcej szybkiego ruchu (patrz § 7, art. 70).

§ 12. Praca mechaniczna.

104. Wyraz *praca*, używany w mowie potocznej, oznacza wszelką czynność, połączoną z pewnym *wysiłkiem*, któremu towarzyszy *ruch*. Określeniu temu odpowiada nawet tak zwana praca umysłowa, gdyż, jak tego dowodzą badania fizjologiczne, podczas myślenia zachodzi również pewien wysiłek fizyczny i ruch w tkankach mózgowych myślącego osobnika.

W niektórych wypadkach wydaje się napozór, że praca może być wykonywana bez żadnego ruchu. Wiadomo, na przykład, że trzymając nieruchomo jakiś ciężar przez pewien czas w rękach, odczuwamy w mięśniach rąk znużenie, mięśnie te bowiem muszą wówczas nie tylko wytwarzać siłę, ale i wykonywać niedostrzegalne ruchy, które mają na celu powstrzymywanie ciężaru od spadku. To znaczy, że w przypadku tym również zostaje wykonana pewna praca.



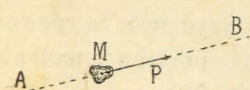
Rys. 62.

W życiu praktycznym ilość albo wartość pewnej wykonanej pracy oblicza się zawsze proporcjonalnie do obydwóch jej czynników: siły i ruchu.

Wiadomo, na przykład, że należność za przewiezienie ładunku na pewną odległość zawsze oblicza się stosownie do ciężaru przewiezionego ładunku oraz do odbytej przez ten ładunek drogi. Robotnik, który zapomocą lewaru L (rys. 62) podnosi cegły na górne piętra kamienicy, otrzymuje za swą pracę zapłatę z jednej strony w stosunku do ilości lub ciężaru (P) podniesionych cegieł, z drugiej zaś — w stosunku do wysokości (H), na którą te cegły zostały podniesione.

105. Opierając się na tych przykładach, wziętych z życia praktycznego, określamy pojęcie pracy mechanicznej w sposób następujący:

Praca mechaniczna zostaje wykonana wtedy, gdy odbywa się ruch pod działaniem siły.



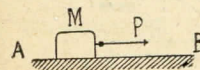
Rys. 63.

Siła P (rys. 63), gdy działa na zupełnie swobodne ciało materialne M , wprawia je w ruch i wytwarza pracę w kierunku linii AB , zgodnej z linią działania siły P . Wiadomo jednak, że ciała zupełnie swobodnych w naszej przyrodzie niema. Ruch ciał nie tylko napotyka przeszkody w po-

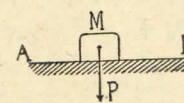
staci tarcia lub oporu ośrodka, ale nadto tor tego ruchu zwykle jest z góry wyznaczony przez tak zwane więzy w postaci, na przykład, szyn toru kolejowego, po których zmuszone są poruszać się wagony. Więzy stwarza też zwykle siła ciężkości, która pozwala poruszać przedmioty tylko po powierzchni, do której one przylegają u dołu.

106. Jeżeli kierunek siły P (rys. 64) pozostaje *równoległym* do kierunku toru AB , po którym ciało M zmuszone jest poruszać się wskutek istniejących więzów, praca wytwarza się wówczas tylko w kierunku działania siły P , jak gdyby ciało M było swobodne.

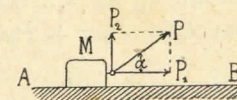
O ile zaś siła P (rys. 65) działa *prostopadle* do kierunku możliwego ruchu na powierzchni podpory AB , nie może ona wówczas ani wywołać ruchu ciała M , ani wykonać pracy.



Rys. 64.



Rys. 65.



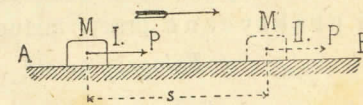
107. W przypadku ogólnym, gdy kierunek siły P (rys. 66) tworzy pewien kąt (α) z kierunkiem AB możliwego ruchu, siła P , jako wielkość kierunkowa, może być uważana jako rezultat składania dwóch innych, niezależnych od siebie wektorów sił: P_1 i P_2 , z których jedna (P_1) skierowana jest równolegle, druga zaś (P_2) — prostopadle do kierunku drogi AB . Udział w ruchu i pracy bierze tylko siła składowa P_1 , czyli innymi słowy tylko rzut siły P na kierunek możliwego ruchu AB .

Rzut ten można obliczyć trygonometrycznie z wzoru:

$$P_1 = P \cos \alpha.$$

Co się zaś tyczy składowej P_2 , może ona tylko wpływać na zwiększenie lub zmniejszenie tarcia podczas ruchu (§ 11, art. 99).

108. Mając na uwadze ten przypadek ogólny, twierdzimy, że ilość wykonanej pracy jest wprost proporcjonalna do wielkości rzutu siły na kierunek możliwego ruchu, oraz do długości przebytej w tym kierunku drogi. Jeżeli ciało M (rys. 67) pod działaniem stałej siły P przebyło od położenia I do położenia II drogę s , równoległą do kierunku działania siły P , wówczas ilość wykonanej pra-



Rys. 67.

cy (L), zgodnie z powyższem określeniem, jest proporcjonalna do iloczynu z wielkości siły (P) przez długość przebytej drogi (s) i może być wyrażona wzorem matematycznym:

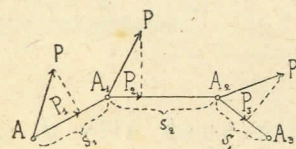
$$L = P \cdot s \dots \dots \dots (1)$$

Z wzoru tego widać, że *praca mechaniczna mierzy się iloczynem, z siły działającej przez długość drogi, przebytej w kierunku tej siły*¹⁾.

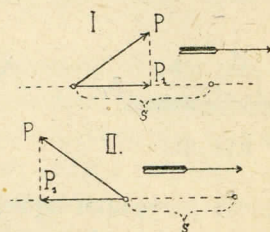
Stąd wymiar pracy w zależności od znanych już wymiarów siły: $[MLT^{-2}]$ (§ 7, art. 68) i drogi $[L]$, jest:

$$[ML^2T^{-2}].$$

109. Praca jest wielkością bezkierunkową, czyli skalarną, przy wszelkich bowiem dowolnych zmianach kierunku siły (P) (rys. 68) i drogi (s) pracę stanowi tylko suma iloczynów z poszczególnych rzutów tej siły: $P_1, P_2, P_3 \dots$ przez długości przebywanych odcinków drogi: $s_1, s_2, s_3 \dots$. Zatem praca całkowita: $L = P_1s_1 + P_2s_2 + P_3s_3 + \dots$



Rys. 68.



Rys. 69.

Wielkość pracy może być jedynie wyróżniana znakiem algebraicznym, mianowicie, umówimy się uważać ją za dodatnią wtedy (rys. 69, I), gdy kierunek ruchu (s) zgadza się z kierunkiem rzutu siły (P_1); praca jest natomiast ujemną wtedy (rys. 69, II), gdy siła (P_1) przeciwdziała ruchowi (s).

110. Jednostkę bezwzględną pracy na zasadzie wzoru (1) wyznacza się w zależności od jednostek bezwzględnych siły (1 dyna) i drogi (1 cm). Zwiemy ją ergiem i oznaczamy symbolem:

$$1 \text{ erg} = 1 \text{ dyna} \times 1 \text{ cm} = 1 \text{ dynacm}.$$

Erg jest to więc praca, wykonana siłą, równą 1 dynie, na drodze równej 1 centymetrowi, przebytej w kierunku działania tej siły.

Prócz tej jednostki bezwzględnej używane są większe od niej jednostki praktyczne pracy, mianowicie:

$$1 \text{ Kilogramometr} = 1 \text{ Kg} \cdot 1 \text{ m} = 1 \text{ Kg} \cdot \text{m},$$

¹⁾ Bardzo często słyszy się błędne określenia pracy w rodzaju: „praca równa się sile pomnożonej przez drogę”.

oraz jednostka, znajdująca zastosowanie głównie w elektrotechnice, zwana 1 joule¹⁾; wynosi ona 10^7 ergów.

Kilogramometr może być obliczony w ergach, wiadomo bowiem, że: 1 Kg (siła) = $981 \cdot 10^3$ dyn; 1 m = 100 cm: w takim razie:

$$1 \text{ Kg} \cdot \text{m} = 981 \cdot 10^3 \text{ dyn} \cdot 100 \text{ cm} = 98100000 \text{ erg};$$

$$\text{albo: } 1 \text{ Kg} \cdot \text{m} = 9,81 \cdot 10^7 \text{ ergów},$$

a ponieważ: $10^7 \text{ erg} = 1$ dżaul, stąd:

$$1 \text{ Kg} \cdot \text{m} = 9,81 \text{ dżaula}.$$

111. Pewna ilość pracy może być wykonana w dłuższym lub krótszym przeciągu czasu; zależność między wykonaną pracą a czasem jej trwania określa się tak zwaną *dzielnoscią* albo *mocą mechaniczną*.

Dzielnosć albo moc mechaniczna oznacza ilość pracy, wykonanej w jednostce czasu; ściślej zaś mówiąc, jest to stosunek wykonanej pracy do czasu jej trwania.

Jednostką absolutną dzielnosci jest 1 erg w 1 sekundzie czyli symbolicznie:

$$1 \text{ erg/sek}.$$

W użyciu są również jednostki praktyczne, mianowicie: 1 Kilogramometr w 1 sekundzie, symbolicznie:

$$1 \text{ Kg} \cdot \text{m/sek};$$

następnie tak zwany „koń parowy”, oznaczamy symbolem:

$$1 \text{ HP}^2).$$

Koń parowy wynosi $75 \text{ Kg} \cdot \text{m/sek}$ i taką jest w rzeczywistości moc konia przeciętnej siły. Jednostki tej używają w technice do oznaczania mocy wszelkich maszyn.

W elektrotechnice dzielnosć oznacza się zwykle w dżaulach na 1 sekundę; odpowiednia jednostka nosi nazwę *watt*³⁾, przyczem:

$$1 \text{ uat} = 1 \text{ dżaul/sek} = 10^7 \text{ ergsek};$$

wyższą od niej jednostką jest:

$$1 \text{ kilouat} = 1000 \text{ uatów}.$$

Koń parowy może być obliczony w jednostkach bezwzględnych albo też w elektrotechnicznych, mianowicie:

$$1 \text{ HP} = 75 \text{ Kg} \cdot \text{m/sek} = 75 \cdot 9,81 \cdot 10^7 \text{ erg/sek} = 736 \cdot 10^7 \text{ erg/sek};$$

$$\text{albo: } 1 \text{ HP} = 736 \text{ uatów} = 0,736 \text{ kilouatów}.$$

W przybliżeniu można przyjmować, że:

$$1 \text{ HP} = \frac{3}{4} \text{ kilouata}.$$

¹⁾ Na cześć znakomitego fizyka angielskiego Joule'a (czyt. dżaul).

²⁾ Od wyrazów angielskich: horse power = siła końska.

³⁾ Na cześć znakomitego mechanika angielskiego Watta (czyt. uat).

§ 13. Energja i jej odmiany.

112. Aby pewne ciało ważkie M (rys. 70) unieść z powierzchni ziemi na wysokość h , należy pokonać siłę P ciężaru tego ciała i wykonać wskutek tego pracę w ilości:

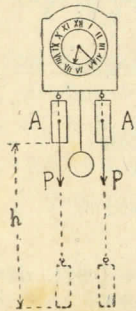
$$L = Ph.$$

Jeżeli po wyniesieniu na wysokość h ciało M zostanie tam odparte i zatrzymane, zawiera ono wówczas w sobie *zapas pracy* w tej samej ilości, jaka była zużyta na podniesienie tego ciała do góry. Po uwolnieniu od podparcia ciało M , spadając ku ziemi, może zapomocą nici i bloka pociągnąć za sobą inne ciało K . Nić będzie wówczas wyprężona siłą, równą ciężarowi P , a ponieważ ciało K do chwili spadnięcia na ziemię ciała M przejdzie w kierunku ciągnącej go siły drogę $KK' = h$, znaczy to, że ilość wykonanej wówczas pracy teoretycznie będzie równa iloczynowi Ph .

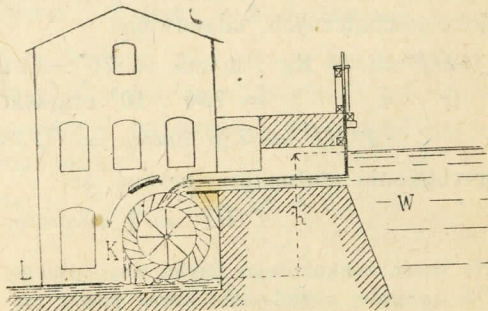
Ową zdolność do wykonania pewnej ilości pracy, jaką zyskuje ciało M , wyniesione na wysokość h , zwiemy **energją** tego ciała.

113. Dopóki energja, w ten lub inny sposób nagromadzona w pewnym ciele, przebywa w niem podczas *spoczynku* w postaci *nieruchomego zapasu pracy*, zwiemy ją *energją potencjalną*, albo *energją położenia*. Po wprowadzeniu ciała w ruch energja ta może być stopniowo przetworzona na pracę mechaniczną.

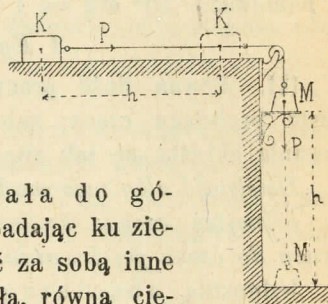
Podobny zapas nagromadzonej energii potencjalnej widzimy, na przykład, w mechanizmie zegara (rys. 71), gdzie energja ta zawiera się w podciągniętych na wysokość h ciężarkach (A) lub w nakręconej sprężynie, zarówno bowiem podciągnięcie ciężarków, jak i nakręcenie sprężyny



Rys. 71.



Rys. 72.



Rys. 70.

zegarowej wymaga wykonania pewnej ilości pracy. Praca ta zużywa się stopniowo na poruszanie mechanizmu zegara. Zbiornik wody W (rys. 72), którego poziom leży na wysokości h nad poziomem kanału odpływowego L , stanowi również zapas energii potencjalnej, z którego można czerpać pracę i zużywać ją na obracanie koła młyńskiego K i wszystkich połączonych z niem wewnątrz młyna maszyn.

114. Ciała mogą posiadać zdolność do wykonywania pracy nie tylko w stanie spoczynku, jako energję potencjalną, lecz i *podczas ruchu*. Wiadomo już (§ 8), że ciała, wprowadzone w ruch, posiadają pęd (mv), który z chwilą napotkania na drodze pewnej przeszkody może wytworzyć popęd (It). Ponieważ zaś przy popędzie zachodzi działanie siły F , zatem wytwarza się praca. Zdolność ciał do wykonywania pracy na skutek nabytego przez te ciała pędu zowie się *energją kinetyczną* albo *energją ruchu*.

115. Przypuśćmy, że ciało materialne, obdarzone pędem mv , zużywa ten pęd w całości na wytworzenie pewnej stałej siły popędowej P , działającej w kierunku pędu na drodze długości s . Kosztem całego pędu, aż do chwili zatrzymania się ciała, zostaje wówczas wykonana praca w ilości:

$$L = Ps.$$

Siła popędowa P sprawia w tym przypadku ruch jednostajnie-zmienny z pewnym stałym opóźnieniem $= a$; można więc na mocy II zasady Newtona siłę P wyrazić iloczynem $m \cdot a$, drogę zaś s i czas t obliczyć z wzorów (7) i (8) dla ruchu jednostajnie-opóźnionego (§ 4, art. 51), mianowicie:

$$\begin{aligned} v - at &= 0 \\ s &= vt - \frac{at^2}{2}. \end{aligned}$$

Rugując z pierwszego równania czas $t = \frac{v}{a}$ i podstawiając we wzorze drugim, otrzymamy:

$$s = \frac{v^2}{a} - \frac{av^2}{2a^2} = \frac{v^2}{2a};$$

zatem ilość pracy L , otrzymanej kosztem zużytego pędu, obliczy się z wzoru:

$$L = Ps = ma \cdot \frac{v^2}{2a};$$

albo:

$$L = \frac{mv^2}{2} \quad (2)$$

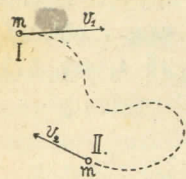
Otrzymane wyrażenie, przedstawiające zapas energii kinetycznej ciała w ruchu, wyprowadził po raz pierwszy uczony niemiecki

Leibnitz na początku wieku XVIII i nazwał je „*żywą siłą*” (*vis viva*). Nazwa ta dotąd jest używana w fizyce, jakkolwiek w zasadzie jest nieślusna, wyraża bowiem nie siłę, lecz zgoła odmienne od niej pojęcie — energję.

Wzór (2) na żywą siłę wskazuje, że energja kinetyczna jest wprost proporcjonalna do masy poruszającego się ciała oraz do kwadratu jego prędkości. Prędkość gra tu więc znacznie większą rolę, niż masa; to też głównie tylko dzięki dużej prędkości posiadają takie silne działanie dynamiczne młoty, kafary, pociski strzelnicze i t. p.

116. Widzimy więc, że energja kinetyczna czyli żywa siła, również, jak i energja potencjalna, może być przetworzona wprost na pracę mechaniczną. To znaczy, że *energja w obydwóch odmianach powinna być mierzona temi samemi jednostkami, co i praca*, a więc również jak i praca należy do wielkości bezkierunkowych czyli *skalarnych*.

Ponieważ o ilości energii kinetycznej poruszającego się ciała decyduje wyrażenie żywej siły ($\frac{mv^2}{2}$), stąd wynika, że dla tego samego ciała o masie m energja kinetyczna zależna jest tylko od kwadratu prędkości, zupełnie zaś jest niezależna od jej kierunku, ani też od kształtu i długości przebytej drogi. O ile w położeniu I (rys. 73) ciało m posiada pewną prędkość v_1 , w położeniu zaś II inną prędkość v_2 , wówczas w energii tego ciała zachodzi zmiana, która ilościowo wyrazi się różnicą:



Rys. 73.

$$\frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2}$$

O ile przytem $v_1 > v_2$, wypadnie stąd liczba dodatnia, która oznacza, że ciało m , przechodząc po zupełnie dowolnej drodze od położenia I do II, *utraciło* taką właśnie ilość swej energii kinetycznej i wykonało wzamian za to odpowiednią ilość pracy:

$$L = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2}$$

O ile zaś $v_1 < v_2$, oznacza to, że podczas przejścia od położenia I do II ciało *zyskało* z zewnątrz pewną ilość energii, która zwiększyła jego żywą siłę i która również odpowiada ilości pracy L , ilość ta jednak jest wówczas liczbą *ujemną*.

117. Wiemy już, że zmniejszenie pędu i żywej siły powoduje popęd i wykonanie odpowiedniej ilości pracy. Nawzajem, kosztem popędu

i pracy, czerpanej z pewnego zapasu energii potencjalnej, może być otrzymana równoważna jej ilość energii kinetycznej czyli żywej siły.

W ten to sposób energja potencjalna zbiornika W wody (rys. 72) z chwilą otwarcia stawideł przetwarza się na energję kinetyczną płynącego potoku wody, który jest wówczas w stanie poruszać koło młyńskie K .

118. Jeżeli pewne ciało M (rys. 74) o ciężarze F , wyniesione na wysokość h , posiadało w położeniu I ilość energii potencjalnej:

$$E_{pot.} = Ph,$$

to podczas spadania tego ciała zachodzi stopniowa zamiana jego energii potencjalnej na kinetyczną. Naprzykład, w położeniu II ciało posiada *pozostałą* w niem jeszcze ilość energii potencjalnej:

$$E_{pot.} = Px,$$

a oprócz tego *już nabytą* ilość energii kinetycznej:

$$E_{kin.} = \frac{mv^2}{2};$$

ale ponieważ prędkość (v) spadku w położeniu II jest: $v = gt$ (§ 10), stąd:

$$E_{kin.} = \frac{mg^2t^2}{2} = mg \cdot \frac{gt^2}{2};$$

we wzorze tym iloczyn mg jest, jak wiadomo, miarą ciężaru P , wyrażenie zaś $\frac{gt^2}{2}$ oznacza długość drogi, przebytej w spadku, czyli:

$$mg = P, \quad \frac{gt^2}{2} = h - x,$$

a zatem:

$$E_{kin.} = P(h - x).$$

Suma zaś obydwóch rodzajów energii w położeniu II jest:

$$E_{pot.} + E_{kin.} = Px + P(h - x) = Ph.$$

Ogólna więc ilość energii jest taka sama, jak ilość początkowej energii ciała w położeniu I.

Stąd wniosek, że przez cały czas trwania spadku suma energii potencjalnej i kinetycznej ciała spadającego pozostaje ilościowo *niezmienną*.

119. Pojedynczy ten fakt przeistaczania się energii z jednej postaci na inną bez zmiany ogólnej jej ilości dowodzi, że energja jest czemś w istocie swej niezmiennem. Szereg zaś innych faktów, z którymi zapoznamy się w następnych działach fizyki, doprowadził w połowie ubiegłego stulecia do odkrycia niezmiennie ważnego i doniosłego prawa



Rys. 74.

przyrody; jest niem **prawo zachowania energii**. Prawo to głosi, że *ilość energii w całym świecie jest stałą i niezmienną*¹⁾. Energia, również jak i materia, nie może być zniszczona, ani też wytworzona z niczego; w przyrodzie możliwe są jedynie przemiany energii z jednej jej postaci na inne, ze ściśle jednak zachowaniem jej ilości.

120. Zamiana energii potencjalnej na kinetyczną lub odwrotnie to tylko jedno z licznych, znanych dziś w nauce przeobrażeń energii. Mówimy tu tylko o przeobrażeniach tak zwanej energii mechanicznej, pochodzącej bezpośrednio z dynamicznego pojęcia pracy. Sama przez się rodzi się jednak kwestja następująca: co właściwie dzieje się z energią spadającego ciała (rys. 74), gdy znajduje się ono już w położeniu III, dopada do ziemi i tam się zatrzymuje?

Niema wówczas już mowy o istnieniu ani energii potencjalnej (gdyż wysokość $x = 0$), ani kinetycznej (gdyż prędkość $v = 0$). W zamian jednak za utraconą energję mechaniczną ukazuje się, jako jej kompensata (wyrównanie), nowa, na pozór nic z nią nie mająca wspólnego postać energii: jest nią *ciepło*, któremu będzie poświęcony dalej obszerny dział fizyki.

Dlatego to wielokrotne uderzanie młotem o zimne kowadło, pocieranie rąk lub innych przedmiotów o siebie wywołuje znaczne nieraz rozgrzanie tych przedmiotów.

Nie wdając się na razie w szczegółowe rozstrząsanie tych zjawisk, zaznaczamy tylko ważny fakt, że kosztem energii mechanicznej otrzymuje się ciepło, albo też w odpowiednich warunkach inne odmiany energii, jak: głos, światło, elektryczność, magnetyzm i t. d., z którymi zapoznamy się w dalszych działach fizyki.

121. Zjawisko przeistaczania się energii mechanicznej na cieplną zachodzi najczęściej podczas pokonywania zwykłych przeszkód ruchu: tarcia lub oporu ośrodka. Ponieważ od przeszkód tych, jak to już wiemy, nie jest wolna żadna, najdoskonalsza nawet maszyna, stąd wniosek, że wszelka maszyna podczas ruchu musi zużywać pewną ilość udzielonej jej energii na pokonywanie przeszkód swego ruchu. Wskutek tego *zawsze wywiązuje się odpowiednia ilość ciepła*, które bezpowrotnie rozprasza się w otaczającej przestrzeni.

122. Ważny ten pewnik naukowy wraz z odkryciem prawa zachowania energii położył raz na zawsze kres uporczywym dociekaniom, ja-

¹⁾ Przypuszczamy przytem, że świat nasz stanowi odosobniony układ ciał fizycznych, do którego należy słońce wraz z planetami. Nie posiadamy danych do twierdzenia, że prawo to rozciąga się na cały wszechświat.

kie z dawien dawna nęciły umysły ludzkie. Dociekania te dotyczyły historycznego zagadnienia „perpetuum mobile” czyli maszyny, poruszającej się wiecznie.

Mimo pewne pozory prawdopodobieństwa, maszyna taka jest w rzeczywistości fikcją, mrzonką, niemożliwą do urzeczywistnienia. Nie tylko bowiem mowy być nie może o tem, aby jakaś maszyna mogła dostarczać w nieograniczonej ilości pracy czyli energii za darmo, to znaczy bez pobierania wzamian za tę energję z zewnątrz, ale nie może ona nawet sama przez się wiecznie się poruszać bez wykonywania pracy, dla której zawsze potrzebna jest pewna ilość energii.

Najumiejętniej i najdokładniej zbudowana maszyna po wprowadzeniu jej w ruch może, dzięki znacznemu zapasowi udzielonej jej energii kinetycznej, poruszać się nieraz bardzo długo (np. dobrze zbudowane wahadło może kołysać się przez kilka dni), jednak zapas ten z biegiem czasu musi się wyczerpać na pokonywanie nieuniknionych przeszkód ruchu, a wtedy ruch maszyny musi ustać dla braku energii.

Wobec tego wszelka maszyna może dostarczyć zawsze tylko część tej ilości energii, jaką pobiera sama z zewnątrz. Stosunek (k) ilości energii wydanej (E) do pobranej (E_0), czyli stosunek:

$$k = \frac{E}{E_0},$$

zowie się współczynnikiem wydajności danej maszyny i jest zawsze liczbą mniejszą od jedności.

123. Ćwiczenie 1. Jaką dzielność (moc) powinien posiadać motor elektryczny, aby był w stanie podnosić windą ciężar $P = 2$ Tonn na wysokość $h = 20$ m w czasie $t = 1$ min?

Rozwiązanie. Pracę windy w jednostce czasu czyli jej dzielność (moc) mechaniczną obliczymy z wzoru:

$$N = \frac{Ph}{t} = \frac{2 \text{ Tonn } 20 \text{ m}}{1 \text{ min}} = \frac{(2 \cdot 981 \cdot 10^6) \text{ dyn} \cdot (20 \cdot 100) \text{ cm}}{60 \text{ sek}} = 6540 \cdot 10^7 \text{ erg/sek} = 6540 \text{ uat.} = 6,54 \text{ kilouat.} = \text{około } 9 \text{ HP.}$$

Ćwiczenie 2. Gazy prochowe, działając w ciągu czasu $t = 0,005$ sek, wysadzają z karabinu kulę o masie $m = 20$ gr z prędkością $v = 500$ m/sek. Z jaką siłą kolba karabinu uderza w chwili wystrzału o ramię strzelca?

Rozwiązanie. Z równania pędu i popędu:

$$mv = Pt$$

obliczymy żadaną siłę P podług wzoru:

$$P = \frac{mv}{t} = \frac{20 \text{ gr } 500 \text{ m/sek}}{0,005 \text{ sek}} = \frac{20 \text{ gr } (500 \cdot 100) \text{ cm/sek}}{0,005 \text{ sek}} = 20 \cdot 10^7 \text{ dyn} = \frac{20 \cdot 10^7}{981 \cdot 1000} = 204 \text{ Kg.}$$

Ćwiczenie 3. Wagon kolejowy o masie $m = 20$ tonn toczy się z prędkością $v = 1,2$ m/sek. Wagon ten zatrzymuje człowiek siłą, wynoszącą $P = 40$ Kg. W jakim czasie i na jakiej odległości wagon zostanie zatrzymany, oraz jaką ilość pracy musi przytem wykonać ów człowiek?

Rozwiązanie. Z równania pędu i popędu

$$mv = Pt$$

$$\begin{aligned} \text{obliczamy czas: } t &= \frac{mv}{P} = \frac{20 \text{ tonn } 1,2 \text{ m/sek}}{40 \text{ Kg}} = \\ &= \frac{(20 \cdot 10^6) \text{ gr} \cdot (1,2 \cdot 100) \text{ cm/sek}}{(40 \cdot 981 \cdot 10^3) \text{ dyn}} = \frac{60000}{981} = 61 \text{ sek.} \end{aligned}$$

Wykonana praca (L) jest równa utraconej żywej sile wagonu, mianowicie:

$$\begin{aligned} L &= \frac{mv^2}{2} = \frac{20 \text{ tonn } (1,2 \text{ m/sek})^2}{2} = \\ &= \frac{(20 \cdot 10^6) \text{ gr} \cdot (1,2 \cdot 100 \text{ cm/sek})^2}{2} = 144 \cdot 10^9 \text{ erg} = \\ &= \frac{144 \cdot 10^9}{9,81 \cdot 10^7} = 1468 \text{ Kg} \cdot \text{m}. \end{aligned}$$

Drogę przebytą (s) otrzymamy, dzieląc pracę przez siłę popędową podług wzoru:

$$s = \frac{L}{P} = \frac{1468 \text{ Kg} \cdot \text{m}}{40 \text{ Kg}} = 36,7 \text{ m}.$$

C. NAUKA O RÓWNOWADZE SIŁ (STATYKA).

§ 14. Podstawowe zasady statyki.

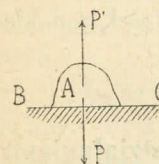
124. Część mechaniki, zwana *statyką*, ma na celu badanie warunków *spoczynku*, czyli tak zwanej *równowagi* ciał pod działaniem sił *zewnętrznych*. Ponieważ siły zewnętrzne działaniem swym sprawiają wogóle ruch, stąd równowaga możliwa jest tylko wtedy, gdy działanie dynamiczne wszystkich sił, z uwzględnieniem ich wielkości i kierunków, sprowadza się w rezultacie *do zera*. Równowaga następuje zwykle wskutek oddziaływania (na mocy III zasady Newtona), jakie siłom zewnętrznym, działającym na ciała, przeciwstawiają więzy oraz przeszkody ruchu.

Naprzykład, przedmiot A (rys. 75) spoczywa nieruchomo na podstawie BC dlatego, że sile ciężkości P przeciwstawiona jest równa jej co

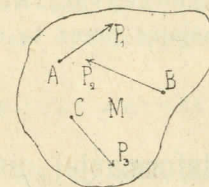
do wielkości siła oddziaływania, czyli tak zwana *siła odporowa* P' nieruchomej podstawy BC .

Jeżeli popychając ręką pewien nieruchomy przedmiot, np. stół, nie jesteśmy w stanie go poruszyć, znaczy to, że siła ręki równoważy się wówczas z siłami, wynikającymi wskutek tarcia, jakie istnieje między nogami stołu a podłogą.

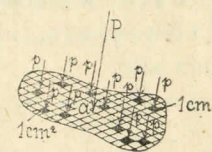
125. Pozostając w spoczynku, ciało M (rys. 76) może ulegać działaniu różnych sił P_1 , P_2 i P_3 w pewnych punktach A , B i C , zwanych punktami przyłożenia sił. O ile siły nie są skupione w pojedynczych punktach, lecz rozłożone w ten lub inny sposób na pewnej powierzchni, powstaje wówczas *ciśnienie*, którego wielkość w poszczególnych miejscach powierzchni określa siła, przypadająca na jednostkę powierzchni, albo też stosunek siły do powierzchni, na której siła ta rozłożona jest jednostajnie. Całkowita siła ciśnienia, przypadająca na pewną powierzchnię, zowie się *parciem*.



Rys. 75



Rys. 76.



Rys. 77.

Jeżeli więc na pewnej powierzchni a (rys. 77) działa *parcie* w postaci siły P i wytwarza na każdej jednostce tej powierzchni (np. 1 cm^2) ciśnienie p , wówczas zależność między *parciem* P , ciśnieniem p , a wielkością powierzchni a wyraża się wzorem:

$$P = p \cdot a.$$

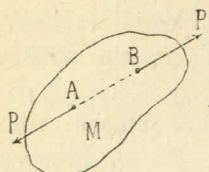
Jako jednostka praktyczna w mechanice i technice używane jest ciśnienie, wynoszące 1 Kg na 1 cm^2 , co wyrażamy symbolem:

$$1 \text{ Kg/cm}^2.$$

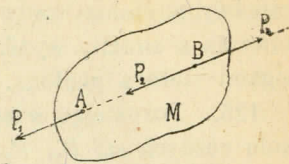
126. Naukę o równowadze rozpoczynamy od dwóch zasadniczych pewników statyki. Pewniki te dotyczą ciał i układów *sztywnych*, nie ulegających żadnym odkształceniom (deformacjom) pod wpływem przyłożonych do nich sił ¹⁾:

¹⁾ Warunkowi temu ciała stale ulegają tylko w pewnym stopniu, najtwardsze bowiem z pośród nich, pod działaniem dużych sił mogą ulegać odkształceniom.

1. Dwie siły P (rys. 78), równe i wprost sobie przeciwnie, przyłożone do jednego punktu albo do dwóch punktów A i B , leżących na wspólnej linii działania sił, wzajemnie się znoszą, a sztywne ciało M pod działaniem takich dwóch sił pozostaje w równowadze.



Rys. 78.



Rys. 79.

2. Jeżeli w punkcie A (rys. 79) ciała M przyłożona jest pewna siła P_1 , wówczas na linii jej działania w dowolnym punkcie B mogą być przyłożone dwie siły P_2 i P_3 wprost sobie przeciwnie i równe każdej siły P_1 . Działanie siły P_1 wskutek tego nie ulegnie żadnej zmianie; po odrzuceniu jednak dwóch wzajemnie równoważących się sił P_1 i P_3 pozostanie działanie siły P_2 w punkcie B , co oznacza, że siłę można przenosić wzdłuż linii jej działania do dowolnych punktów ciała, nie zmieniając przez to ani wielkości, ani kierunku działania siły.

§ 15. Odkształcenia (deformacje) ciał pod działaniem sił.

127. Siły, działające na ciało materialne, wywołują w nim zawsze pewne mniejsze lub większe zmiany postaci lub objętości, a co zatem idzie i gęstości. Owe odkształcenia czyli deformacje ciał mogą być dwojakie:

1^o) odkształcenia *tylko objętości i gęstości* z zachowaniem podobieństwa postaci zewnętrznej;

2^o) odkształcenia *tylko postaci* ciał bez zmiany ich objętości i gęstości.

Do deformacji pierwszego typu zaliczamy *rozciąganie*, względnie *ściskanie* ciała jednakowo we wszystkich kierunkach; deformacje typu drugiego wywołuje *zsuniecie* lub *skręcenie*, najczęściej zaś podczas działania sił zachodzą odkształcenia obu typów jednocześnie w różnych kombinacjach.

128. Ciała, w których odkształcenia znikają zupełnie po usunięciu sił, które je wywołały, zwiemy *doskonale sprężystymi*. W rzeczywistości ciał takich w przyrodzie niema, gdyż pod działaniem sił większych mogą powstawać odkształcenia trwałe czyli pozostające po usunięciu sił.

Niema również w przyrodzie ciał *zupełnie wolnych od sprężystości*, to znaczy takich, w których odkształcenia pozostają całkowicie po usunięciu sił, które je wywołały.

Własności sprężyste w najwyższym stopniu uwydatniają się w ciałach *stałych* i względem obu wspomnianych typów odkształceń; *cieczki* i *gazy* posiadają tylko sprężystość względem zmian swej objętości lub gęstości, nie ujawniają, natomiast żadnej sprężystości przy zmianach ich postaci.

129. Ciała, posiadające jednakowe własności sprężyste we wszelkich kierunkach, noszą nazwę *równokierunkowych* (izotropowych). Do ciał tego rodzaju zaliczamy wodę i wogóle ciecze będące w równowadze, szkło jednorodne i starannie odlane, metale niekryształiczne i t. p. Ciała *różnokierunkowe* (anizotropowe) posiadają niejednakowe własności sprężyste w różnych kierunkach. Do takich zaliczamy: drzewo budulcowe, minerały osadowe i wreszcie ciała, które stały się anizotropowymi wskutek trwałego odkształcenia ich w pewnym kierunku, np. druty.

130. Niezbyt duże odkształcenia sprężyste czyli zanikające po usunięciu sił, które je wywołały, podlegają następującym *prawom Hooke'a* ¹⁾:

1) Odkształcenie jest wprost proporcjonalne do siły, która je wywołuje;

2) Tej samej wielkości odkształcenia sprężyste, wykonane w kierunkach wprost przeciwnych, odpowiadają siłom tej samej wielkości, ale o kierunkach wprost przeciwnych. Naprzykład, rozciągnięciu odpowiada ściśnięcie, wygięciu do góry — wygięcie na dół, skręceniu w lewo — skręcenie w prawo i t. p.

131. Siły zewnętrzne wywołują wewnątrz ciała pewne *naprężenia*, rachowane na jednostkę przekroju poprzecznego w danym miejscu ciała. Siła P , działająca na przekrój q , wywołuje w nim naprężenie:

$$p = \frac{P}{q} \dots \dots \dots (1)$$

132. Jeżeli pierwotny wymiar linjowy, względnie pierwotna objętość ciała wyrażają się liczbami L i V , a pod działaniem sił powstają odkształcenia sprężyste l , względnie v , wtedy stosunek odkształcenia do wymiaru pierwotnego zwiemy *odkształceniem względnym*

$$\text{linjowem: } \lambda = \frac{l}{L},$$

$$\text{albo objętościowem: } \omega = \frac{v}{V}.$$

¹⁾ Czyt. Huka.

133. Stosunek naprężenia (p), rachowanego na jednostkę powierzchni do odkształcenia względnego (λ albo ω) zwiemy *spółczynnikiem sprężystości* albo *modułem Young'a*.

W celu wyznaczenia tego współczynnika przy rozciąganiu zawieszamy pręt, nit albo drut o długości pierwotnej L i przekroju poprzecznym q i obciążamy go siłą rozciągającą P . Zmierzywszy zapomocą bardzo dokładnych przyrządów mierniczych wydłużenie l , obliczamy naprężenie: $p = \frac{P}{q}$ oraz odkształcenie względne: $\lambda = \frac{l}{L}$, poczem otrzymamy moduł Young'a przy rozciąganiu z wzoru:

$$\varepsilon = \frac{p}{\lambda} = \frac{P \cdot L}{q \cdot l} \quad (2)$$

Aby zrozumieć znaczenie matematyczne liczby ε , przypuśćmy, że wydłużenie pręta równa się jego długości pierwotnej ($l = L$), co zresztą jest zwykle niewykonalne, gdyż pręt przed dojściem do tej granicy może utracić sprężystość i ulec pęknięciu. Przyjmując nadto: $q = 1$, otrzymamy:

$$\varepsilon = \frac{P \cdot L}{1 \cdot L}; \text{ albo: } \varepsilon = P.$$

Wynik ten wskazuje, że współczynnik sprężystości czyli moduł Younga oznacza siłę, powiększającą dwukrotnie długość pręta po rozciągnięciu bez zatrącenia jego własności sprężystych.

134. Rozciąganiu podłużnemu towarzyszy zawsze niedostrzegalne zazwyczaj zwięźnienie poprzeczne. Stosunek zaś tego zwięźnienia do wydłużenia nosi nazwę *spółczynnika Poisson'a*.

Spółczynnik ten dla żelaza i stali wynosi przeciętnie $\frac{1}{4}$, dla kauczuku $\frac{1}{2}$, dla korka 0. (To znaczy, że korek przy ściskaniu wcale nie rozciąga się w poprzek).

135. Ciało, poddane ze wszystkich stron ciśnieniu p , rachowanemu na jednostkę powierzchni, ulega zmniejszeniu swej objętości bez zmiany podobieństwa postaci. Oznaczając objętość pierwotną ciała przez V , a odkształcenie przez v , znajdziemy odkształcenie objętościowe względne:

$$\omega = \frac{v}{V}$$

oraz odpowiedni współczynnik sprężystości:

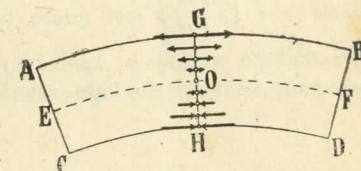
$$\sigma = \frac{p}{\omega} = \frac{pV}{v} \quad (3)$$

Spółczynnik sprężystości czyli moduł Younga przy rozciąganiu (ε) oraz przy ściskaniu (σ) wyrażony w milionach gramów czyli tonnach na 1 cm^2 , wynosi:

dla żelaza
" stali
" miedzi
" ołowiu
" kauczuku

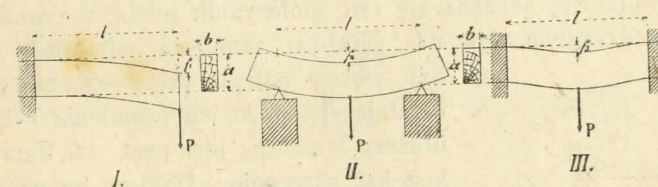
ε	σ
1900	1400
2100	1700
1250	1600
180	0
0,01	0,63

136. Podczas zginania ciał zachodzi odkształcenie złożone, mianowicie, w jednej połowie $ABEF$ (rys. 80) zginanej belki $ABCD$ zachodzi rozciąganie, w drugiej zaś $EFCD$ — ściskanie wygiętego. W przekroju poprzecznym GH naprężenia rozciągające i ściskające wzrastają stopniowo od linii obojętnej EOF , gdzie naprężenie równa się zeru ($p = 0$) i osiągają największą swą wartość na powierzchni zewnętrznej AGB lub CHD .



Rys. 80.

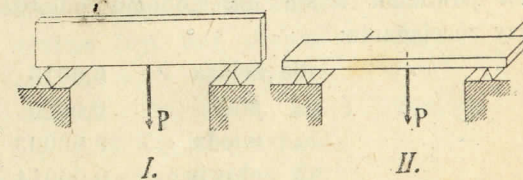
Nie możemy wdawać się w szczegółowe rozważania teoretyczne zjawiska zginania, zauważymy jedynie, iż odkształcenie czyli tak zwana strzałka zgięcia (f) zależy nie tylko od wielkości zginającej siły P (rys. 81), ale również od wymiarów poprzecznych belki (a i b) oraz od sposobu jej



Rys. 81.

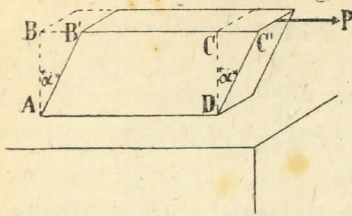
umocowania. Przy tej samej sile zginającej i wymiarach belki zgięcie największe (f_1) powstaje wówczas, gdy belka ta umocowana jest jednym tylko końcem (rys. 81, I); najmniejsza, natomiast, strzałka zgięcia (f_3) powstaje wtedy, gdy belka zostanie umocowana nieruchomo na obu swych końcach (rys. 81, III).

Strzałka zgięcia belki spada mniejsza, a sama belka jest wytrzymalsza na zgięcie wtedy, gdy układamy ją na podstawach „kantem” (rys. 82, I), niż wtedy, gdy jest ułożona „napłask” (rys. 82, II).



Rys. 82.

137. Odkształcenie, zwane *zsunieciem*, zachodzi wówczas, gdy siła P (rys. 83) działa w nieznacznej odległości i równolegle do nieruchomo umocowanej podstawy AD ciała. Z pierwotnej swej postaci $ABCD$ ciało odkształca się wówczas do postaci $AB'C'D$, nie zmieniając przytem swej objętości, ani gęstości.



Rys. 83.

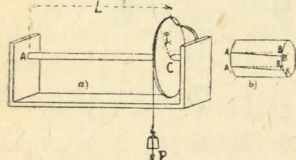
Miarą odkształcenia względnego w tym wypadku jest stosunek zsunęcia (BB') do odległości (AB) danego przekroju od podstawy nieruchomej AD . Stosunek ten $\left(\frac{BB'}{AB}\right)$ jest miarą bardzo małego kąta α , na który odchyła się bok AB po zsunieciu, współczynnikiem zaś sprężystości (τ) jest wtedy stosunek naprężenia p do kąta zsunęcia α czyli:

$$\tau = \frac{p}{\alpha} \quad (4)$$

Spółczynnik ten wynosi:

dla żelaza	750	Tonn	na 1 cm ²
" stali	810	" "	" "
" miedzi	460	" "	" "
" ołowiu	180	" "	" "
" kauczuku	0,003	" "	" "

139. Najłatwiej oznacza się ten współczynnik przez *skręcanie* prętów o przekroju okrągłym (rys. 84). Kątowi zsunęcia odpowiada wówczas kąt obrotu całego pręta zapomocą siły P , działającej na końcu promienia r koła. Im dłuższy i cieńszy jest pręt AC , tem większy jest kąt skręcania. Dotyczy on włókien, położonych na powierzchni zewnętrznej pręta.



Rys. 84.

140. Jeżeli, wskutek zbyt dużych naprężeń odkształcenia pozostają częściowo lub całkowicie po usunięciu sił, które je wywołały, oznacza to, że naprężenia w danym ciele przeszły tak zw. *granice sprężystości*. Odpowiada ona pewnemu ściśle określone odkształceniu względnemu i wynosi przy rozciąganiu:

dla żelaza	0,0015
" stali	0,0020
" miedzi	0,00093
" ołowiu	0,00014
" kauczuku	1,0000 (dwukrotne wydłużenie).

Ze względu na wytrzymałość części maszyn i budowli naprężenia i odkształcenia w tych częściach nie powinny nigdy osiągać granicy sprężystości. Zwykle uwzględnia się naprężenia rozrywające:

dla żelaza	4	Tonny	na 1 cm ²
" stali	8	" "	" "
" miedzi	3	" "	" "
" lin konopnych	1	" "	" "
" drzewa sosnow.	0,4	" "	" "

Naprężenia zgniatające:

dla żelaza lanego	3,0	Tonny	na 1 cm ²
" granitu	1,6	" "	" "
" cegły	0,2	" "	" "
" drzewa	0,4	" "	" "

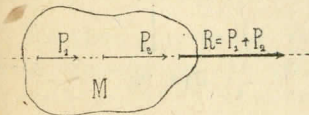
Naprężenia bezpieczne podług norm praktycznych powinny stanowić $\frac{1}{4}$ do $\frac{1}{5}$ naprężeń maksymalnych dla żelaza i stali, oraz $\frac{1}{3}$ do $\frac{1}{5}$ dla drzewa.

§ 16. Składanie i rozkładanie sił.

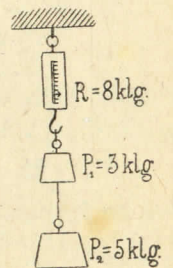
141. Podobnie jak w kinematyce istnieje zasada niezależności ruchów, tak też odpowiednio w dynamice i statyce istnieje zasada niezależności działania sił. Na mocy tej zasady jednoczesne działanie pewnej liczby sił, niezależnych od siebie na ciało materialne może być zastąpione działaniem jednej tylko siły, zwanej *wypadkową* i otrzymywanej przez dodawanie geometryczne sił *składowych* zapomocą ich wektorów.

Przy podobnem składaniu sił mogą zachodzić następujące przypadki szczególnie:

142. 1. Siły składowe mają wspólną linię i zgodne zwroty działania (rys. 85). Wypadkowa (R) takich dwóch sił (P_1 i P_2) jest wtedy równa *sumie* sił składowych i ma wspólną z nimi linię działania i zwrot. Wynik ten można zilustrować doświadczalnie (rys. 86), czepiając do wagi sprężynowej ciężarki $P_1 = 3$ Kg, $P_2 = 5$ Kg; siła wypadkowa R , rozciągająca sprężynę, mierzy wówczas 8 Kg.



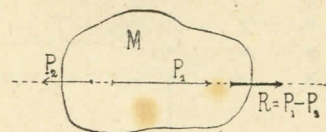
Rys. 85.



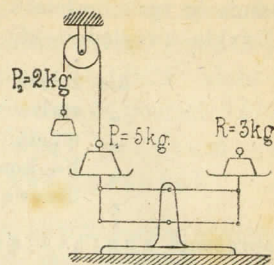
Rys. 86.

143. 2. Z dwóch sił (P_1 i P_2), mających wspólną linię działania, lecz *wprost przeciwne* zwroty (rys. 87), tworzy się

wypadkowa R , równa różnicy między siłą składową większą (P_1) a mniejszą (P_2); wypadkowa ta ma linię działania i zwrot taki, jak siła większa (P_1).



Rys. 87.

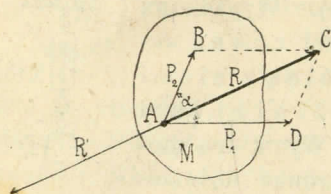


Rys. 88.

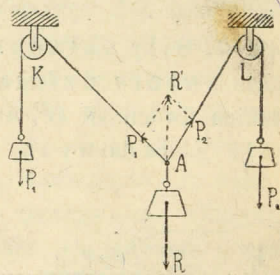
Możemy zilustrować ten przypadek doświadczalnie, kładąc na jednej szalce wagi (rys. 88) ciężarek $P_1 = 5$ Kg i czepiając do niego zapomocą nici i bloka ciężarek $P_2 = 2$ Kg. Dla równowagi potrzeba wówczas na drugiej szalce położyć ciężarek, odpowiadający sile wypadkowej: $R = P_1 - P_2 = 3$ Kg.

W przypadku bardziej ogólnym, gdy na ciało działa kilka sił, mających wspólną linię działania, ale *rozmaite* zwroty, ich wypadkowa będzie oczywiście równa co do wielkości i zwrotu (czyli znaku) *sumie algebraicznej* sił składowych.

144. 3. Wypadkowa R dwóch sił P_1 i P_2 (rys. 89), których linie działania przecinają się pod pewnym kątem (α) jest sumą geometryczną wektorów P_1 i P_2 sił składowych. Jej wielkość, kierunek i zwrot wskazuje przekątnia AC równoległoboku $ABCD$, albo bok zamykający trójkąta ABC , zbudowanego na wektorach sił składowych¹⁾. Aby ciało M pozostało w równowadze, należy zastosować siłę (R'), równą i wprost przeciwną sile wypadkowej (R).



Rys. 89.



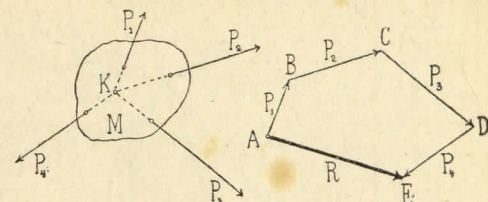
Rys. 90.

Zasadę tę można sprawdzić doświadczalnie, zawieszając trzy ciężarki P_1 , P_2 i R (rys. 90) zapomocą bloków K i L na trzech niciach, połą-

¹⁾ Zasadę równoległoboku sił podał Newton, jako uzupełnienie swojej II zasady dynamiki.

czonych w punkcie A . Budując przy tym punkcie w kierunkach wypreżonych nici wektory sił składowych P_1 i P_2 i, odnajdując ich wypadkową R' , można się przekonać, że jest ona równa i wprost przeciwna do napięcia trzeciej nici pod działaniem ciężarka R .

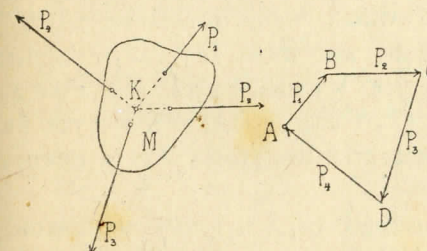
145. W przypadku bardziej ogólnym, gdy na ciało M (rys. 91) działa kilka sił (P_1 , P_2 , P_3 i P_4), których linie działania przecinają się



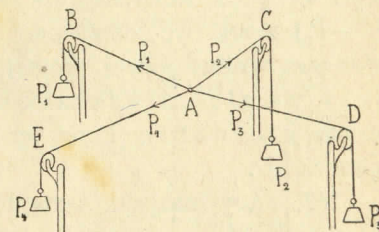
Rys. 91.

w jednym punkcie K , wypadkowa R po wykonaniu dodawania geometrycznego wektorów składowych przedstawia się jako bok zamykający (AE) wielokąta ($ABCDE$), utworzonego z wektorów sił składowych P_1 , P_2 , P_3 i P_4 .

W przypadku szczególnym wielokąt sił $ABCD$ (rys. 92) może zamykać się w początkowym punkcie A . Wynik ten oznacza, że pod działaniem podobnego układu sił ich wypadkowa, jest równa zeru, a ciało, na które działają te siły, znajduje się w równowadze. Każda z sił równoważy wówczas wypadkową wszystkich pozostałych sił układu.



Rys. 92.



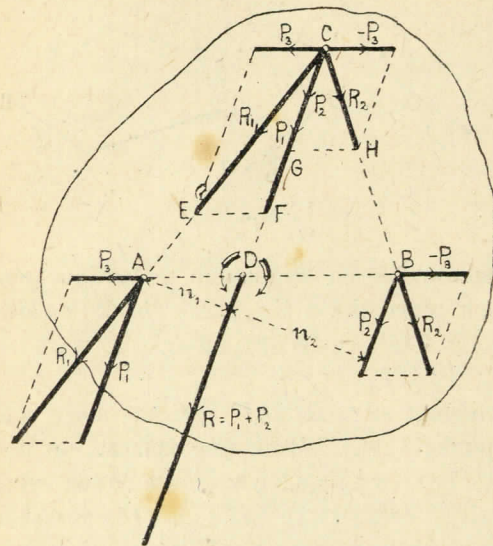
Rys. 93.

Można to zilustrować doświadczalnie, zawieszając na kilku niciach połączonych w punkcie A (rys. 93), ciężarki P_1 , P_2 , P_3 i P_4 i budując wielokąt sił podług kierunków wypreżonych nici.

Powyższy przypadek składania sił jest ciekawy z tego względu, że pozwala oznaczyć minimum pracy, niezbędnej na przeciągnięcie poszczególnych ciężarów P_1 , P_2 , P_3 i P_4 z punktów B , C , D i E do wspólnego punktu przecięcia A nici. Zapomocą więc modelu mechanicznego, wyobrażonego na rys. 93, może być rozwiązane praktycznie następujące zagadnienie:

Znaleźć taki punkt A , do którego ciężary P_1 , P_2 , P_3 i P_4 z punktów B , C , D i E mogłyby być zwieszone z najmniejszym nakładem pracy i kosztów.

146. 4. Wypadkową dwóch sił P_1 i P_2 (rys. 94), równoległych i skierowanych *zgodnie*, odnajduje się zapomocą następujących rozważań geometrycznych:



Rys. 94.

W punktach A i B prócz sił danych (P_1 i P_2) mogą być przyłożone dwie dowolne, ale równe i wprost sobie przeciwne siły (P_3 i $-P_3$), działające wzdłuż prostej AB . Nowe te siły w niczem nie zmieniają działania sił P_1 i P_2 , ale dodane do nich geometrycznie, tworzą dwie siły wypadkowe R_1 i R_2 , których linie działania przecinają się w pewnym punkcie C .

Siły R_1 i R_2 mogą być przeniesione do tego punktu i rozłożone tam na swoje pierwotne składowe (P_1 i P_3 ,

P_2 i $-P_3$), z których dwie równe i wprost sobie przeciwne siły (P_3 i $-P_3$) mogą być odrzucone, pozostałe zaś dwie (P_1 i P_2) działają wówczas wzdłuż jednej prostej, zatem ich wypadkowa (R) równa jest sumie sił składowych (P_1 i P_2) i działa w tym samym kierunku. Linia jej działania przecina prostą AB w pewnym punkcie D .

147. Aby znaleźć następnie odległości (n_1 i n_2) siły wypadkowej R od sił składowych, należy uwzględnić 2 pary trójkątów podobnych, mianowicie: $\triangle ACD \sim \triangle CEF$, oraz $\triangle DCB \sim \triangle CGH$. Z podobieństwa tych trójkątów wynikają następujące 2 proporcje:

$$\frac{CF}{CD} = \frac{EF}{AD}, \quad \frac{CG}{CD} = \frac{GH}{DB}, \quad \text{albo:} \quad \frac{P_1}{CD} = \frac{P_3}{AD}, \quad \frac{P_2}{CD} = \frac{P_3}{DB},$$

dzieląc te proporcje przez siebie stronami, otrzymamy:

$$P_1 : P_2 = DB : AD; \text{ albo:}$$

$$P_1 : P_2 = n_2 : n_1 \dots \dots \dots (1)$$

Ostatnia proporcja oznacza, że odległości sił składowych od linii działania siły wypadkowej są w tym przypadku odwrotnie proporcjonalne do sił składowych.

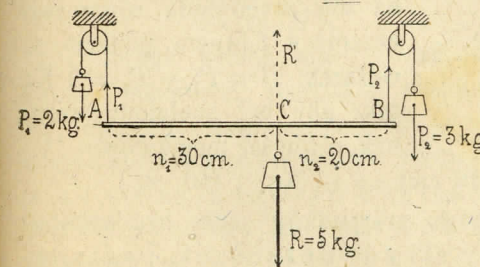
148. Z proporcji (1) otrzymujemy nadto równość:

$$P_1 n_1 = P_2 n_2 \dots \dots \dots (2)$$

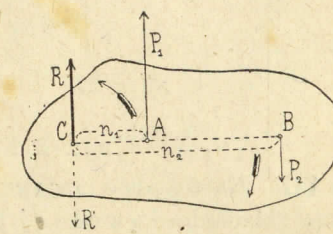
która oznacza, że iloczyny sił składowych przez ich odległości od siły wypadkowej są równe sobie. Iloczyny te nioszą w mechanice nazwę *momentów statycznych*, odległości zaś n_1 i n_2 sił, tworzących te momenty względem wypadkowej, zwiemy *ramionami momentów*. Łatwo domyślić się, że względem dowolnego punktu D na linii działania wypadkowej siły P_1 i P_2 mogą wykonywać ruchy obrotowe w kierunkach *przeciwnych*, a ponieważ momenty tych ruchów są nadto równe sobie, oznacza to, że ciało nie będzie wcale wykonywało ruchu obrotowego, lecz *tylko postępowy* wzdłuż linii działania siły wypadkowej R . O ile wzdłuż tej samej linii będzie działała tej samej wielkości, ale wprost przeciwna siła $R' = -R$, ciało pozostanie wówczas w zupełnym spoczynku czyli równowadze.

149. Powyższy przypadek składania sił równoległych można sprawdzić doświadczalnie zapomocą bardzo lekkiego, albo zrównoważonego uprzednio pręta AB (rys. 95), zawieszonego w punktach A i B na dwóch niciach. Nici te przechodzą przez bloki i są obciążone na końcach ciężarkami: $P_1 = 2 \text{ Kg}$ i $P_2 = 3 \text{ Kg}$, równowaga zaś osiąga się przez zawieszenie ciężarka $R = P_1 + P_2 = 5 \text{ Kg}$ w takim punkcie C na pręcie, aby była spełniona równość momentów statycznych: $P_1 n_1 = P_2 n_2$; $(2 \text{ Kg}) \cdot (30 \text{ cm}) = (3 \text{ Kg}) \cdot (20 \text{ cm})$.

Siła R równoważy wówczas działanie wypadkowej R' sił P_1 i P_2 .



Rys. 95.



Rys. 96.

150. Aby znaleźć wypadkową dwóch sił P_1 i P_2 (rys. 96) równoległych, ale mających zwroty *przeciwnie*, przypuszczamy, że wypadkowa ta położona jest nazewnątrz za większą siłą składową (P_1) i ma zgodny z nią kierunek i zwrot działania. Jeżeli więc taka wypadkowa R istnieje, wówczas dla otrzymania równowagi wystarczy w punkcie jej przyłożenia C zastosować siłę R' , równą i wprost przeciwną do R . Siła R' równoważy wówczas działanie sił P_1

i P_2 , albo, co jest oczywiście to samo, siła P_1 równoważy działanie wypadkowej sił R' i P_2 , co prowadzi do warunków, znanych już z przypadku poprzedniego, mianowicie:

$$1) P_1 = R' + P_2 \quad 2) R'n_1 = P_2(n_2 - n_1).$$

Pierwszy z tych warunków daje równość:

$$R' = P_1 - P_2;$$

co oznacza, że siła wypadkowa równa jest różnicy między większą siłą składową a mniejszą, działa nazewnątrz po stronie siły składowej większej i ma zgodny z nią zwrot.

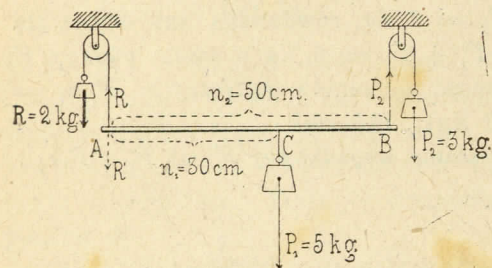
Podstawiając wartość R' w warunku drugim, otrzymamy:

$$(P_1 - P_2)n_1 = P_2(n_2 - n_1);$$

skąd po uproszczeniu wypada równość:

$$P_1 n_1 = P_2 n_2,$$

która oznacza, że w przypadku tym momenty statyczne sił składowych względem dowolnego punktu C na linii działania siły wypadkowej, również jak i w poprzednim przypadku, powinny być równe i posiadać przeciwne kierunki ruchu obrotowego.



Rys. 97.

Po zawieszeniu w punkcie C lekkiego albo zrównoważonego uprzednio pręta AB (rys. 97) ciężarka większego $P_1 = 5 \text{ Kg}$, a w punkcie B — mniejszego $P_2 = 3 \text{ Kg}$, potrzeba dla zachowania równowagi uczepić w pewnym punkcie A ciężarek: $R = P_1 - P_2 = 2 \text{ Kg}$ tak, aby był spełniony warunek równości momentów:

$$P_1 n_1 = P_2 n_2; (5 \text{ Kg}) \cdot (30 \text{ cm}) = (3 \text{ Kg}) \cdot (50 \text{ cm}).$$

151. Na zasadzie ostatnich dwóch przypadków może być wykonywane składanie dowolnej liczby sił równoległych, posiadających rozmaite zwroty. Mając dane, na przykład, trzy siły: P_1 , P_2 i P_3 (rys. 98), odnajdujemy najpierw wypadkową R' dla sił P_1 i P_2 z warunków:

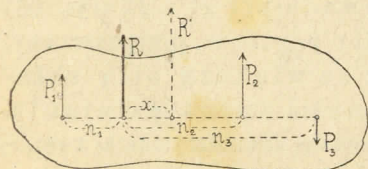
$$1) R' = P_1 + P_2$$

$$2) P_1(n_1 + x) = P_2(n_2 - x),$$

następnie wypadkową ostateczną dla sił R' i P_3 z warunków:

$$3) R = R' - P_3$$

$$4) R'x = P_3 n_3.$$



Rys. 98.

Rugując z pierwszych dwóch równości R' i x i wstawiając w pozostałych dwóch, otrzymamy:

$$R = P_1 + P_2 - P_3 \\ P_1 n_1 - P_2 n_2 + P_3 n_3 = 0.$$

Równość druga zawiera momenty statyczne sił składowych P_1 , P_2 i P_3 względem dowolnego punktu na linii działania siły wypadkowej R . Jedne z tych momentów ($P_1 n_1$ i $P_3 n_3$) wypadły jako liczby dodatnie, moment, natomiast $P_2 n_2$ wypadł jako liczba ujemna. Widzimy stąd, że znak algebraiczny momentu statycznego siły zależy od kierunku możliwego ruchu obrotowego. Jeżeli kierunek ten jest zgodny z ruchem wskazówek zegara, przypisujemy momentowi znak dodatni (momenty $P_1 n_1$ i $P_3 n_3$); w przeciwnym wypadku moment uważamy za ujemny (moment $-P_2 n_2$).

152. Postępując w podobny sposób dla czterech i większej liczby sił, przyjdziemy do wniosku ogólnego, że wypadkowa kilku sił równoległych równa jest co do wielkości i zwrotu ich sumie algebraicznej; linia zaś jej działania odnajduje się z warunku, aby suma algebraiczna momentów statycznych wszystkich sił składowych względem dowolnego punktu na linii działania wypadkowej była równą zero.

Stosując siłę R' równą i wprost przeciwną do wypadkowej R (rys. 99), otrzymamy równowagę ciała. To znaczy, że względem dowolnego punktu A , siły R i R' mają wtedy momenty statyczne równe i wprost przeciwne, czyli:

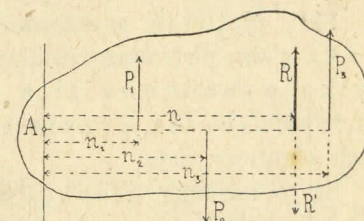
$$Rn = R'n.$$

Ponieważ jednak siła R zamienia swym działaniem wszystkie składowe P_1 , P_2 i P_3 , stąd wniosek, że suma algebraiczna momentów wszystkich sił składowych względem dowolnego punktu A jest równoważna momentowi statycznemu siły wypadkowej R względem tegoż punktu A , mianowicie (rys. 99):

$$-P_1 n_1 + P_2 n_2 - P_3 n_3 = Rn = -R'n.$$

O ile układ sił równoległych jest w równowadze, ogólna ich wypadkowa sprowadza się wówczas do zera, to zaś oznacza, że i suma momentów statycznych wszystkich sił względem dowolnego punktu również sprowadza się wówczas do zera.

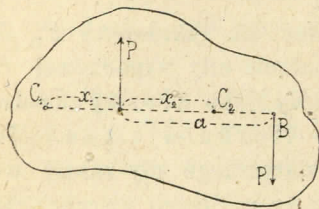
153. Przy składaniu dwóch sił równoległych o zwrotach przeciwnych zachodzi osobliwy przypadek wtedy, gdy obie siły składowe



Rys. 99.

P (rys. 100) są sobie równe. Ich wypadkowa (R) równa jest wówczas zeru:

$$R = P - P = 0.$$



Rys. 100.

Wynik ten oznacza, że ciało nie może mieć wówczas ruchu *postępowego*. Mimo to jednak równowagi w tym wypadku nie będzie, przypuszczając bowiem, że pewna siła równoważna przyłożona jest w jakimś punkcie C_1 poza siłami składowymi albo też w punkcie C_2 pomiędzy nimi, przekonamy się, iż w obydwóch przypadkach

suma algebraiczna momentów pod żadnym warunkiem nie może być równą zeru, lecz zawsze wypadnie pewną liczbą stałą. Jakoż, dla punktu C_1 otrzymamy:

$$P(x_1 + a) - Px_1 = Pa;$$

dla punktu zaś C_2 :

$$Px_2 + P(a - x_2) = Pa.$$

Układ taki zwiemy w mechanice **parą sił**, odległość (a) pomiędzy nimi *ramieniem* tej pary, stałą zaś sumę (Pa) momentów statycznych zwiemy *momentem obrotowym* pary, gdyż od wielkości tego momentu zależy wytwarzany przez parę ruch obrotowy ciała.

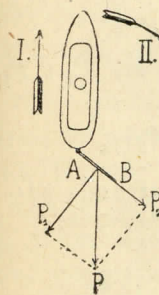
154. Możliwość powstawania par dowodzi, że zupełna równowaga ciała, poddanego działaniu sił, może zachodzić wtedy, gdy nie tylko wypadkowa siła sprowadza się do zera, lecz nie otrzymuje się przytem żadnej pary sił, mogącej sprawić ruch obrotowy ciała.

Są to warunki niezbędne i wystarczające dla otrzymania równowagi, o ile mamy do czynienia z ciałem sztywnym, niepodlegającym żadnym odkształceniom (deformacjom) pod działaniem sił zewnętrznych. Warunki te nie są jednak wystarczające wtedy, gdy ciało łatwo ulega odkształceniu, jest łatwo ściśliwe, rozciągliwe, giętkie, płynne i t. p.; prócz bowiem tych warunków niezbędnych, zachodzi wówczas konieczność wprowadzania pewnych warunków dodatkowych, zabezpieczających ciało niezmiennosc jego kształtu i objętości. Oznaczenie tych warunków należy jednak do zakresu teorii sprężystości, oraz tak zwanej wytrzymałości materiałów.

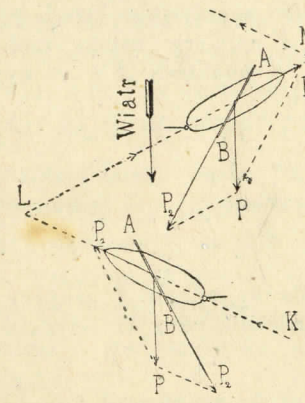
155. Na tych samych zasadach, co i składanie, odbywa się również *rozkładanie sił*. Czynności tej dokonywa się zwykle wtedy, gdy siła,

wskutek istniejących więzów czy przeszkód, może nadawać ruch postępowy albo obrotowy tylko w pewnym określonym kierunku, nie zgodnym jednak z kierunkiem jej działania. Siła ulega nadto rozkładowi wtedy, gdy działanie jej zostaje zrównoważone przez oddziaływanie pewnych nieruchomych punktów lub powierzchni, nie leżących na linii działania siły. Zasadę tę wyjaśnimy na następujących przykładach:

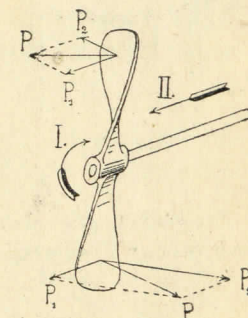
156. 1. Działanie sterów przy statkach odbywa się w ten sposób, że płaszczyzna sterowa AB (rys. 101) po odpowiednim odchyleniu ulega podczas ruchu statku sile (P) oporu wody. Siła ta rozkłada się przytem tak, że tylko jedna jej składowa (P_1) prostopadła do steru wywołuje ciśnienie i moment obrotowy całego statku (w kierunku strzałki II); druga zaś składowa P_2 , nie natrafiając na żaden opór ze strony płaszczyzny sterowej, przesuwają tylko wzdłuż niej wodę.



Rys. 101.



Rys. 102.

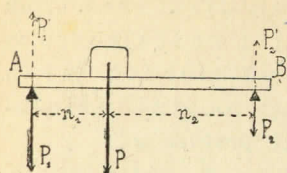


Rys. 103.

2. Z tej samej zasady rozkładania sił korzystają żeglarze, ustawiając płaszczyznę żagla AB (rys. 102) tak, aby z siły wiatru (P) otrzymać dwie składowe (P_1 i P_2); z tych pierwsza (P_1) posuwa statek naprzód po linii KL albo LM , druga zaś (P_2) przesuwają tylko powietrze po powierzchni żagla. Lawirując w ten sposób po linii łamanej $KLM...$, statek żaglowy może, jak to wskazuje rysunek, posuwać się naprzód nawet przy zupełnie niepomysłnym kierunku wiatru.

3. Śmigła (albo śmigła), używane przy samolotach, balonach sterowych i t. p., działają w ten sposób, że siła P (rys. 103) oporu powietrza, wywołana szybkim ruchem obrotowym śmigła w kierunku strzałki I, rozkłada się na P_1 i P_2 . Z tych pierwsza skierowana jest równoległe do osi śmigła i nadaje całej maszynie ruch postępowy w kierunku strzałki II; druga zaś składowa (P_2) styczna do powierzchni śmigła, przesuwają tylko po niej powietrze:

W podobny sposób działają skrzydła wiatraków, śruby okrętowe, wentylatory mechaniczne i t. p.

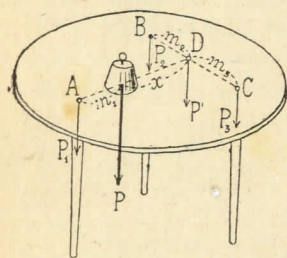


Rys. 104.

4. Jeżeli pewien ciężar P (rys. 104) spoczywa nieruchomo na belce, podpartej w dwóch punktach A i B , wówczas siła P ulega rozkładowi na dwie równoległe do niej składowe P_1 i P_2 , które w punktach podparcia A i B równoważą się tej samej wielkości siłami odporowemi P_1' i P_2' .

Wielkości tych składowych mogą być obliczone ze znanych warunków statyki.

$$P_1 + P_2 = P; \quad P_1 n_1 = P_2 n_2.$$



Rys. 105.

5. W podobny sposób można obliczyć składowe ciężaru P (rys. 105) w przypadku, gdy ciężar ten spoczywa na trzech podporach A , B i C . Siłę P najpierw należy rozłożyć na składowe P_1 i P' w punktach A i D ; wypadają stąd dwa warunki:

$$P_1 + P' = P; \quad P_1 m_1 = P' x;$$

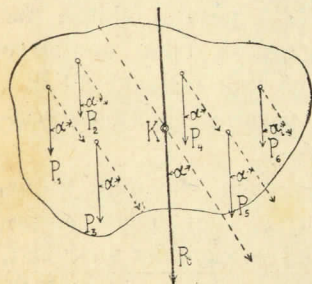
siła P' ulega z kolei rozkładowi na siły P_2 i P_3 w punktach B i C podług równań:

$$P_2 + P_3 = P'; \quad P_2 m_2 = P_3 m_3.$$

Przypadek, gdy ciało posiada więcej, niż 3 podpory jest statycznie nieoznaczony i wymaga wprowadzenia pewnych warunków dodatkowych.

§ 17. Środek ciężkości i masy.

157. Gdy na pewne ciało (rys. 106) działają w jednakowych kierunkach siły równoległe $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$, wówczas wspólna ich wypadkowa równa jest ich sumie:



Rys. 106.

$$R = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n$$

i posiada określoną linię działania.

O ile następnie wszystkie siły składowe, nie zmieniając swych wielkości ani punktów przyłożenia, odchyłają się o pewien jednakowy kąt (α), wypadkowa ich (R) również odchyli się o taki sam kąt α , nie zmieniając swej wielkości. Można wówczas dowieść graficznie i rachunkowo, że linia działania wypadkowej (R), przy wszelkich tego rodzaju zmianach jej kierunku, zawsze przechodzi przez pewien niezmienny

punkt (K), który zowie się *środkiem układu sił równoległych*: $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$.

158. Ponieważ wszelkie ciało materialne składa się z olbrzymiej liczby punktów ważkich, w których przyłożone są siły ciężkości o kierunkach równoległych (pionowych), niezależnych od zmian postawy ciała, stąd wniosek, że każde ciało materialne posiada pewien stały punkt, jako środek układu sił ciężkości, działających na poszczególne części tego ciała. Niezmienny ten punkt ciała zwiemy *środkiem ciężkości*, a ponieważ rozkład ciężaru i masy ciała pozostają w bezpośrednim związku z sobą, stąd wspomniany punkt jest zarazem *środkiem masy* danego ciała. Wychodząc z tej zasady, uważamy ciężar ciała za wypadkową ciężarów wszystkich poszczególnych jego części; punkt przyłożenia tej wypadkowej leży w środku masy danego ciała.

W przyszłości będziemy używali jedynie miarodajnego pojęcia *środka masy*, gdyż punkt ten w niezmiennym ciele lub układzie jest faktycznie *stały* i ściśle oznaczony, natomiast, środek ciężkości może się zmieniać zależnie od zmian położenia ciała względem środka ziemi.

159. Środek ciężkości i masy znajduje się nie tylko w każdym pojedynczym ciele materialnym, ale również w każdym układzie w ten lub inny sposób połączonych z sobą ciał czy punktów materialnych. Punkt ten może być wyznaczony rachunkowo z następujących rozważań:

Pewne dowolne ciało M (rys. 107) przedstawia zespół punktów materialnych, poddanych działaniu sił równoległych:

$$p_1, p_2, p_3, \dots, p_n.$$

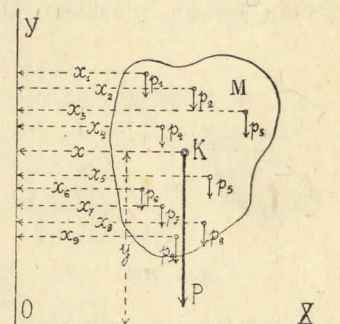
Suma momentów statycznych wszystkich tych sił względem pewnego punktu O może być przyrównana do momentu statycznego siły wypadkowej (P), przyłożonej w środku masy K . Wypadnie stąd równanie:

$$Px = p_1 x_1 + p_2 x_2 + p_3 x_3 + \dots + p_n x_n.$$

W równaniu tem $x, x_1, x_2, x_3, \dots$ oznaczają ramiona momentów odpowiednich sił względem punktu O .

Wiedząc nadto, że siła wypadkowa:

$$P = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n,$$



Rys. 107.

można obliczyć ramię x momentu tej siły podług wzoru:

$$x = \frac{p_1 x_1 + p_2 x_2 + p_3 x_3 + \dots + p_n x_n}{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n} \quad (1)$$

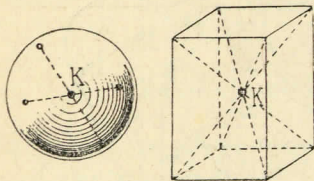
W ten sposób została znaleziona jedna z dwóch współrzędnych (x i y) poszukiwanego środka masy K ciała.

W sposób analogiczny można obliczyć współrzędną y tego punktu, skierowując wszystkie siły równolegle do osi OX . Wypadnie wówczas z równania momentów statycznych:

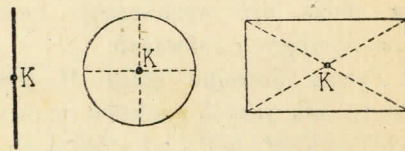
$$y = \frac{p_1 y_1 + p_2 y_2 + p_3 y_3 + \dots + p_n y_n}{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n} \quad (2)$$

a wtedy położenie środka ciężkości i masy K jest ściśle wyznaczone.

160. Obliczenie współrzędnych środka masy K podług wzorów (1) i (2) może być uskutecznione tylko zapomocą wyższego rachunku matematycznego i tylko dla ciał o wiadomych i foremnych kształtach geometrycznych. W pewnych jednak prostych przypadkach środek masy brył i figur płaskich odnajduje się z łatwością bez użycia rachunku wyższego. Naprzykład, środek jednolitej i jednorodnej w całej swej masie kuli, albo prostopadłościanu (rys. 108) leży oczywiście w środku geometrycznym (K), na przecięciu średnic kuli, albo przekątnych w prostopadłościanie. To samo można powiedzieć o środku masy odcinka prostej, płaskiego koła lub okręgu i prostokąta (rys. 109).

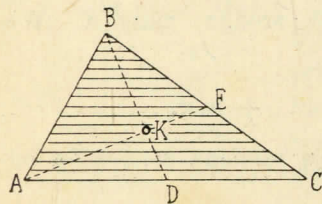


Rys. 108.



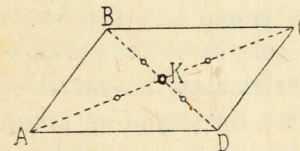
Rys. 109

Łatwo również odnaleźć środek masy płaskiego jednorodnego trójkąta ABC (rys. 110), dzieląc bowiem ten trójkąt na nieskończoną ilość wąskich pasków elementarnych równoległe do jednego z boków, np. AC , widzimy, że środki wszystkich tych pasków, a więc i poszukiwany środek masy (K) całego trójkąta wypadają na środkowej BD . Punkt K odnajduje się więc na przecięciu środkowych BD i AE trójkąta. Z geometrii wiadomo, że punkt ten wypada w odległości równej $\frac{2}{3}$ każdej ze środkowych, licząc od

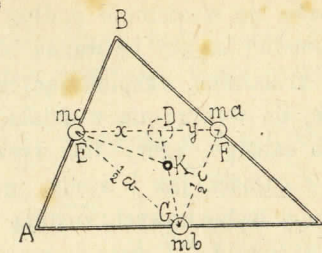


Rys. 110.

wierzchołka. Na tej zasadzie środek masy K równoległoboku $ABCD$ (rys. 111) leży w punkcie przecięcia jego przekątni, gdyż na liniach tych leżą środki trójkątów ABD i BCD albo ABC i ACD .



Rys. 111.



Rys. 112.

Aby odnaleźć środek masy trójkąta ABC (rys. 112), zbudowanego z trzech jednorodnych odcinków:

$$AB = c; \quad BC = a; \quad AC = b,$$

przypuszczamy, że masa jednostki długości wynosi m , masy zaś poszczególnych boków trójkąta: ma , mb i mc skupione są w ich środkach geometrycznych E , F i G . Środek D dwóch z tych mas, naprzykład, ma i mc odnajdziemy z warunku:

$$ma : mc = x : y$$

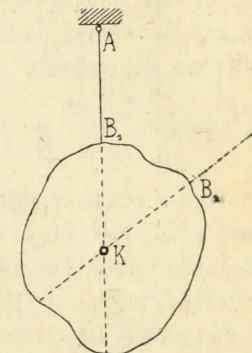
albo:

$$x : y = a : c = \frac{1}{2}a : \frac{1}{2}c,$$

co oznacza, jak to wiadomo z geometrii, że punkt D leży na dwusiecznej GD kąta EGF , a więc ogólny środek masy K całego trójkąta ABC wypadnie na przecięciu dwusiecznych trójkąta EFG .

161. Środek masy K płaskiej figury dowolnego kształtu M (rys. 113), można wyznaczyć praktycznie, zawieszając tę figurę na nici AB_1 przyczepionej w dowolnym punkcie B_1 . Kierunek wypreżonej nici podczas równowagi przechodzi, oczywiście, przez poszukiwany punkt K . Zawieszając następnie tę samą figurę w innym dowolnym punkcie B_2 i wykreślając w obydwóch przypadkach na powierzchni figury linie proste w kierunku wypreżonej nici, odnajdziemy środek masy (K) na przecięciu się tych prostych.

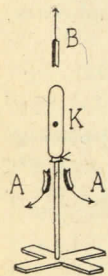
162. Środek masy ma bardzo ważne znaczenie w mechanice ciał i układów stałych. Zapomocą wyższej analizy matematycznej można dowiedzieć, że wszelki ruch *postępowy* ciała lub układu ciał odbywa się tak, jak gdyby cała masa była skupiona w jednym tylko punkcie, mianowicie w swym środku. Tor, po którym punkt ten porusza się pod działaniem bezwładności lub sił zewnętrznych, nie ulega żadnej zmianie na-



Rys. 113.

wet wtedy, gdy ciało czy układ zmieni swój kształt lub objętość pod działaniem sił wewnętrznych, siły te bowiem zawsze działają tak, że znoszą się wzajemnie podług III zasady Newtona. Jako wybitny przykład, potwierdzający tę ważną zasadę mechaniki, może służyć ruch pocisków armatnich, eksplodujących (rozrywających się) podczas lotu. Pociski te, po wyrzuceniu z działa, zakreślają pewne torzy krzywe i trafiają do tego samego, zgóry im wyznaczonego celu zarówno wtedy, gdy dolatują w całości, jak i wtedy, gdy pod działaniem zawartych w nich substancji wybuchowych zostają podczas lotu rozerwane na szczątki.

163. Środek masy pewnego ciała lub układu może zmienić swoje położenie lub kierunek swego ruchu tylko pod działaniem sił zewnętrznych. Osadzona na drążku



Rys. 114.

raca (rys. 114) wraz ze swym nabojem przedstawia układ nieruchomy ze środkiem masy w pewnym punkcie K . Podczas wybuchu gazy prochowe wypływają z racy w kierunku strzałek A , ale ponieważ punkt K pozostaje nieruchomy, dlatego to raca pędzi w kierunku strzałki B do góry. W taki sam sposób można wytłumaczyć zjawisko cofania się wstecz armat i fuzyj w chwili wystrzału. Trudność chodzenia po zupełnie gładkim i śliskim lodzie również tłumaczy się zasadą zachowania środka masy, wszelki bowiem własny ruch człowieka, stojącego na lodzie, np., wysunięcie nogi, powoduje jednocześnie ruch całego ciała w kierunku przeciwnym, aby mógł pozostać niezmiennym środek masy. Kot, rzucony z podniesionymi do góry łapami, przed spadnięciem na ziemię, instynktownie wykonywa różnymi częściami swego ciała pewne ruchy, które, nie zmieniając toru pionowego, po którym porusza się środek masy, pozwalają jednak zwierzęciu zmienić postawę ciała tak, aby mogło ono bezpiecznie spaść łapami na dół.

§ 18. Rodzaje równowagi ciał.

164. Ciało ciężkie znajduje się w równowadze wtedy, jeżeli jego ciężar w ten lub inny sposób zostaje przeniesiony na pewną ilość nieruchomych punktów lub powierzchni podpierających, które wytwarzają wówczas, na mocy III zasady Newtona, równe i wprost przeciwne zewnętrzne siły oddziaływania (siły odporowe).

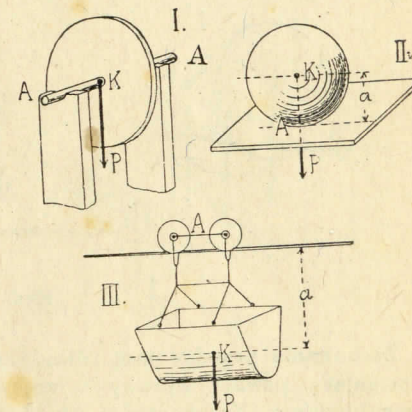
Zależnie od tego, jak zachowują się ciała po wyprowadzeniu ich z równowagi, wyróżniamy następujące trzy jej rodzaje:

1-o) *równowagę obojętną*, czyli taką, która zachowuje się nadal po nieznacznym poruszeniu i zmianie postawy ciała, przebywającego w spoczynku;

2-o) *równowagę stałą (trwałą)*, zachodzącą wtedy, gdy ciało po wyprowadzeniu z równowagi wraca znów do swego pierwotnego położenia i wreszcie:

3-o) *równowagę chwiejną lub nietrwałą*, przy której ciało po wytrąceniu z równowagi więcej już do niej nie powraca i ulega przewróceniu lub spadnięciu.

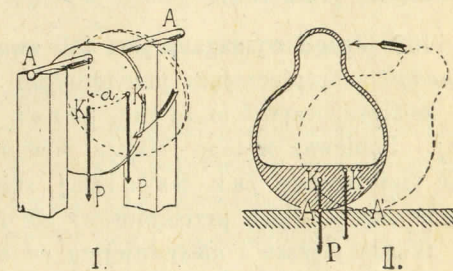
165. Niezbędny warunek równowagi obojętnej wymaga, aby *środek masy* danego ciała przy wszelkich nieznacznym zmianach jego położenia pozostawał nieruchomym, albo też poruszał się w płaszczyźnie poziomej, nie podnosząc się, ani opadając. Podobnemu warunkowi czyni, na przykład, zadość jednorodny krążek (rys. 115, I), osadzony w środku (K) swej masy na nieruchomej poziomej osi AA ; kula (rys. 115, II), ustawiona na płaszczyźnie poziomej; wózek kolejki wiszącej (rys. 115, III), zawieszony na poziomo naciągniętej linie i t. p.



Rys. 115.

166. W położeniu równowagi *stałej* przy wszelkim nieznacznym odchyleniu ciała od tego położenia środek masy *podnosi się*, w spoczynku zaś zajmuje *najniższe* swe

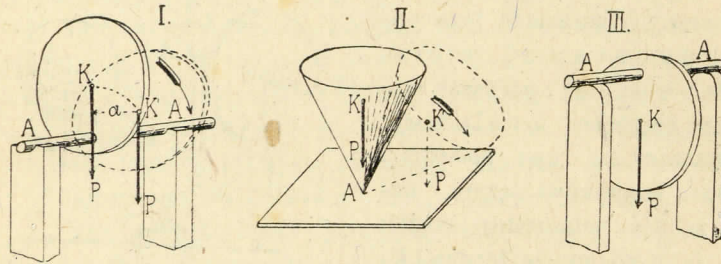
położenie. Tak właśnie zachowuje się krążek (rys. 116, I), osadzony na osi AA powyżej środka lub niewyrotna zabawka (rys. 116, II) podparta poniżej środka swej masy K . Po odchyleniu każdego z tych przedmiotów od położenia równowagi siła ciężkości (P), przyłożona w środku masy (K), wytwarza względem punktu czy linii podparcia (A) moment obrotowy (Pa) w takim kierunku, że ciało, po wykonaniu pewnej liczby wahań tam i z powrotem, powraca do pierwotnego położenia równowagi.



Rys. 116.

167. W położeniu równowagi *chwiejnej* środek masy ciała zajmuje *najwyższe* ze swoich położań, *obniża się* zaś po najbliższym odchyleniu, poczem ciało do pierwotnego stanu równowagi już nie powraca. W takiej właśnie równowadze znajduje się krążek

(rys. 117, I), podparty poniżej środka (K) swojej masy, stożek (rys. 117, II), ustawiony na wierzchołku, wreszcie krążek (rys. 117, III), którego linia podparcia (AA) leży wprawdzie nad środkiem (K) jego masy, ale znajduje się na najwyższych punktach krzywych podstawek. Po odchyleniu każdego z tych przedmiotów od położenia równowagi siła ciężkości (P) powoduje moment obrotowy w takim kierunku, że uniemożliwia powrót do równowagi.



Rys. 117.

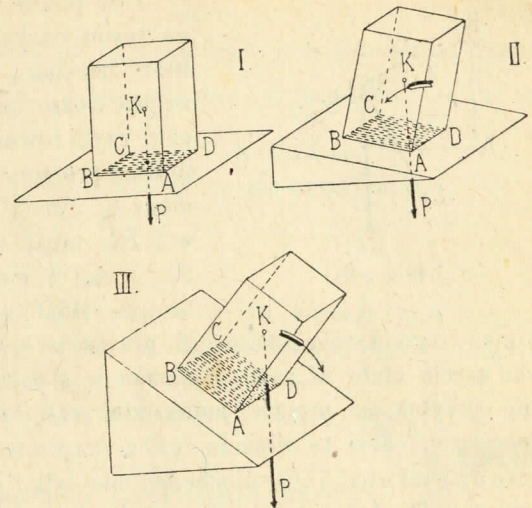
Zachowanie przedmiotom równowagi chwiejnej jest wogóle rzeczą trudną wymagającą pewnej wprawy i zręczności. Efektowne popisy, dokonywane przez kuglarzy, linoskoczków, akrobatów i t. p., polegają głównie na umiejętności zachowania równowagi chwiejnej własnego ich ciała lub innych przedmiotów. Linoskoczek, chodzący po naciągniętej linie, zaopatruje się dla bezpieczeństwa w długi, ciężki drąg, którym zręcznie manipulują w ten sposób, aby ogólny środek masy ciała i drąga wypadł zawsze na pionie, przechodzącym przez linę.

168. Jeżeli wymagana jest tak zwana *stateczność* albo *pewność równowagi*, zabezpieczająca przedmiotom ważkim postawę nieruchomą, jest to możliwe oczywiście tylko przez nadanie równowagi trwałej. Ponieważ w tego rodzaju równowadze środek masy ciała powinien być umieszczany jak najniżej, stąd staje się zrozumiałe, dlaczego dolne części takich przedmiotów, jak lampy, kałamarze, pomniki i t. p. są zawsze cięższe i masywniejsze od części położonych wyżej.

Podpierając przedmiot nie w jednym, ale w większej liczbie punktów, albo też na pewnej powierzchni, należy dla osiągnięcia pewności równowagi zachować warunek, aby pionowa linia działania ciężaru, wychodząca ze środka masy (K) przedmiotu (rys. 118, I i II), trafiała wewnątrz figury, która łączy wszystkie punkty lub ogranicza powierzchnię podparcia. Skoro zaś ta linia pionowa wychodzi z granic wspomnianej figury (rys. 118, III), przedmiot pod działaniem momentu siły ciężkości (P) ulega przewróceniu. Na tej zasadzie człowiek i zwierzęta mogą utrzymywać równowagę swych ciał wtedy tylko, gdy pion, spuszczonego ze środka ich masy, trafia

w granicach linii, otaczającej zzewnątrz i łączącej z sobą stopy ich nóg.

Niosąc ciężar na plecach, człowiek z konieczności pochyla całe ciało naprzód. Czworonogi, dzięki większej liczbie punktów podparcia w swych kończynach, rozłożonych przystem na większych odległościach od siebie, posiadają też większą pewność równowagi ciał, aniżeli człowiek i zwierzęta dwunożne.



Rys. 118.

§ 19. Machiny proste.

169. Pod nazwą *machin prostych* w fizyce znane są przyrządy, pozwalające działanie pewnej siły, zwanej oporem pożytecznym (P), zrównoważyć lub pokonać działaniem drugiej, tak zwanej siły czynnej (Q), przyłożonej w innej części mechanizmu. Użyteczność każdej z takich machin zasadza się głównie na tem, aby z jej pomocą można było nieznaczną siłą czynną pokonać dużą siłę oporu pożytecznego, przyczem stosunek tych sił ($\frac{Q}{P}$) nosi nazwę *przekładni*. Im mniejszy jest ten stosunek, ten korzystniejsza jest machina.

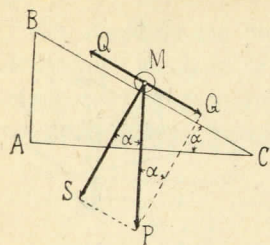
Ponieważ wszelka, najstaranniej i najdokładniej nawet wykonana machina posiada zawsze tak zwane opory szkodliwe w postaci tarcia, sztywności i t. p., stąd siła czynna rzeczywista (Q') wypadła zawsze nieco większa od siły teoretycznej (Q), obliczonej z pominięciem oporów szkodliwych.

Stosunek ($\frac{Q}{Q'}$) siły czynnej teoretycznej do rzeczywistej wypadła więc zawsze liczbą mniejszą od jedności i nosi nazwę *spółczynnika skutku* pożytecznego danej maszyny; im ta liczba bliższa jest jedności, tem doskonalszą i użyteczniejszą jest machina.

Z machin prostych rozpatrzmy: równię pochyłą, klin, śrubę, dźwignię, oraz kołowrót i bloki wraz z ich kombinacjami.

170 ⁺ *Równia pochyła*—jest to linia lub płaszczyzna (rys. 119), nachylona pod pewnym kątem (α) względem kierunku poziomego. Wy-

różniamy następujące elementy równi pochyłej: podstawę: $AC = a$, wysokość: $AB = h$, oraz długość: $BC = l$.



Rys. 119.

Gdy pewne ciało ważkie M znajduje się na równi pochyłej, wówczas jego ciężar (P) który uważamy za opór pożyteczny, może być rozłożony w kierunku możliwego ruchu, czyli równoległe do długości (BC) równi oraz prostopadłe do tego kierunku. Z otrzymanych dwóch składowych (Q i S) udział w ruchu może mieć jedynie składowa Q , składowa zaś S wywołuje jedynie działanie siły tarcia. Dopóki siła Q nie jest w stanie pokonać tego tarcia, ciało M pozostaje w spoczynku; przy nieznacznym zaś tarcia ciało M może pozostać w spoczynku tylko wtedy, gdy zostanie przyłożona jeszcze jedna siła (Q'), równa i wprost przeciwna do pierwszej. Jest to właśnie siła czynna teoretyczna, siła zaś rzeczywista (Q'), niezbędna nie tylko do równowagi, lecz i do poruszania ciała po równi pochyłej do góry wzdłuż BC , musi prócz siły teoretycznej (Q) pokonać jeszcze opory szkodliwe.

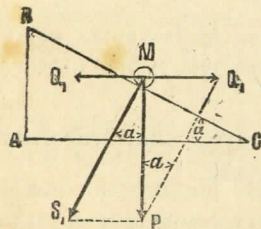
171. Siłę teoretyczną Q (rys. 119) można obliczyć na zasadzie podobieństwa trójkątów prostokątnych ABC i MPQ (mających równe kąty (α) o ramionach wzajemnie prostopadłych) z proporcji:

$$\frac{AB}{BC} = \frac{Q}{P} = \frac{h}{l}; \text{ stąd: } Q = P \cdot \frac{h}{l} \quad (1)$$

Z otrzymanego wzoru widać, że siła czynna (Q), a zarazem i przekładnia $\left(\frac{Q}{P}\right)$ równi pochyłej są tem mniejsze, im mniejszy jest stosunek $\frac{h}{l}$ czyli im mniejszy jest kąt nachylenia (α) równi do poziomu.

Ten sam wynik można otrzymać, używając wzoru trygonometrycznego:

$$Q = P \sin \alpha.$$



Rys. 120.

172. Siła czynna, równoważąca ciężar ciała na równi pochyłej, może mieć kierunek równoległy do podstawy równi (rys. 120). Uwzględniając składowe S_1 i Q_1 ciężaru P , oraz podobieństwo trójkątów ABC i PMQ_1 , otrzymamy proporcję:

$$\frac{AB}{AC} = \frac{Q_1}{P} = \frac{h}{a};$$

stąd siła czynna teoretyczna:

$$Q_1 = P \cdot \frac{h}{a} \quad (2)$$

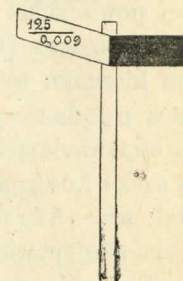
Przypadek ten w porównaniu do poprzedniego jest, jak widać, mniej korzystny, stosunek bowiem $\frac{h}{a}$ jest większy od stosunku $\frac{h}{l}$, a zatem: $Q_1 > Q$.

Tę samą zależność można wyrazić wzorem trygonometrycznym:

$$Q_1 = P \tan \alpha,$$

wiadomo zaś, że: $\tan \alpha > \sin \alpha$.

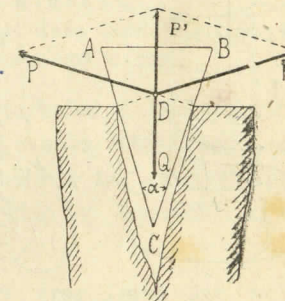
173. Równia pochyła znajduje liczne i częste zastosowania w życiu praktycznym. Zasadę tej najprostszej z machin widzimy np. w drągach, służących do wtaczania ciężarów na wozy, w schodach, po których tem łatwiej i wygodniej jest chodzić, im są mniej spadziste i t. p.



Rys. 121.

Zwykle drogi i koleje żelazne na pochyłościach gór należy na tej samej zasadzie budować z możliwie nieznacznym nachyleniem, przez co z konieczności długość toru wypada większa, a linja jego zawilsza. Każdy odstęp toru kolejowego o pewnym nachyleniu wskazują tablice (rys. 121), na których liczba górna (125) wskazuje długość danego odstępu toru w metrach, liczba zaś dolna (0,009) oznacza stosunek wysokości (h) do podstawy (a) równi pochyłej ($\tan \alpha$), a więc wielkość nachylenia toru na tym odstępie. Na zupełnie poziomych odcinkach toru tabliczki mają również kierunek poziomy i dolną liczbę równą zeru.

174. Klin ABC (rys. 122) przedstawia jakby dwie równie pochyłe, złożone podstawami. Po wbiciu w szczelinę, na ściany klina w kierunkach do nich prostopadłych działają dwie siły P , stanowiące opór pożyteczny i dające, po przeniesieniu do punktu przecięcia D , wspólną siłę wypadkową P' . Siła ta może wypchnąć klin ze szczeliny, o ile jest w stanie pokonać wynikające na jego ścianach siły tarcia. Przy zbyt dużym zaś tarcia wbity klin tkwi w szczelinie nieruchomo, pomimo ciśnienia na jego boki.



Rys. 122.

Aby wbić klin dalej, należy zastosować siłę czynną (Q), która teoretycznie równa jest i wprost przeciwna sile P' , wypychającej klin; w rzeczywistości zaś, ze względu na tarcie musi być od tej siły znacznie większa. Oznaczając długość (AC) klina przez b , grubość (AB) przez a , można

siłę czynną teoretyczną (Q) obliczyć na zasadzie podobieństwa trójkątów ABC i DPP' z proporcji:

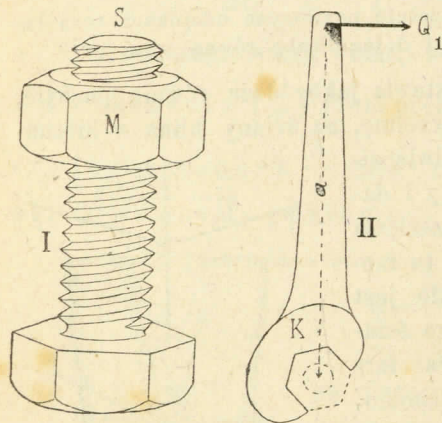
$$\frac{AB}{AC} = \frac{a}{b} = \frac{Q}{P}; \quad \text{stad: } Q = P \cdot \frac{a}{b};$$

to znaczy, że siła, utrzymująca klin, jest tem mniejsza, im mniejszy jest stosunek $\frac{a}{b}$, oraz kąt (α) klina, a zatem im klin jest ostrzejszy.

Ostrzejszy klin posiada przytem większe tarcie na swych bokach i mocniej trzyma się w szczelinie, niż klin tęp.

Na własnościach klina oparte jest użycie wszelkich narzędzi, służących do krajania, skrobania, rąbania, łupania i t. p.

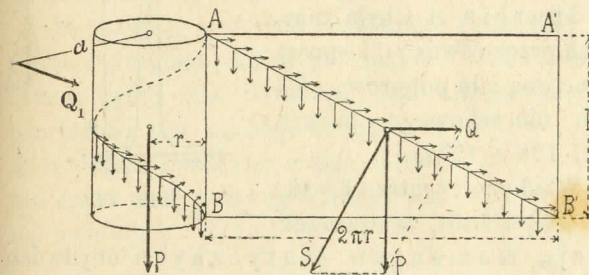
175. Śruba (rys. 123, I) jest to walec obrotowy, posiadający na swej powierzchni gwint czyli wyżłobienie, nacięte po linii krzywej, zwanej śrubową (helisą). Linja ta obiega powierzchnię walca w niezmiennym kierunku względem podstawy, przez co po rozwinięciu powierzchni walca na płaszczyźnie staje się linią prostą. Odległość wzdłuż śruby, odpowiadająca jednemu obrotowi gwintu dokoła osi walca, zowie się wysokością albo skokiem gwintu. Śruba połączona jest zwykle z tak zw. naśrubkiem albo mutrą M , której otwór również posiada na swej powierzchni gwint, dostosowany do gwintu śruby. Do silnego zakręcania śrub i muter używa się klucza K (rys. 123, II), z którego pomocą siła czynna (Q_1), działająca na końcu ramienia a , może wywołać znaczny moment obrotowy $Q_1 a$. Opór pożyteczny stanowi siła P (rys. 124), wyprężająca śrubę wzdłuż osi. Aby znaleźć związek między siłami P i Q , uwzględnimy jeden obrót czyli skok gwintu o wysokości h i rozwiniemy go na płaszczyznę. Linja śrubowa przedstawia wówczas prostą, a właściwie równię pochyłą ($AB'B$) o wysokości równej h i podstawie (BB') równej obwodowi walca $2\pi r$ (r —promień walca).



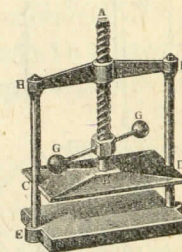
Rys. 123.

ca). Siła P , wyprężająca śrubę, działa równomiernie wzdłuż całej linii (AB') gwintu i może być rozłożona tak, jak w przypadku drugim równi pochyłej (patrz rys. 120), tworząc składowe S i Q . Z tych siła S powoduje znaczne tarcie, dzięki czemu śruba, najbardziej nawet rozciągnięta

siłą P , zwykle się nie odkręca; siła zaś Q działa równomiernie na całej linii gwintu stycznie do powierzchni walca śrubowego i wytwarza sumaryczny moment obrotowy $= Qr$. Działanie tego momentu może być zrównoważone, a następnie pokonane działaniem momentu obrotowego $Q_1 a$ siły czynnej, przyłożonej na końcu ramienia a klucza (rys. 123, II).



Rys. 124.



Rys. 125.

Mając równość obu tych momentów:

$$Qr = Q_1 a,$$

oraz znaną zależność dla równi pochyłej (patrz art. 172, wzór 2):

$$Q = P \cdot \frac{h}{a} = P \cdot \frac{h}{2\pi r},$$

można obliczyć siłę czynną teoretyczną podług wzoru:

$$Q_1 = \frac{Qr}{a} = P \cdot \frac{rh}{a2\pi r} = P \cdot \frac{h}{2\pi a}.$$

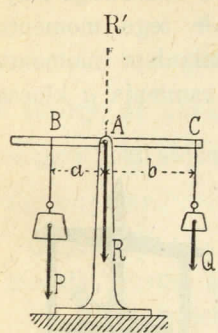
Z wzoru tego widać, że siła (Q_1), niezbędna do zakręcenia śruby i wywołania w niej napięcia (P), jest tem mniejsza, im mniejszy jest skok (h) gwintu, a dłuższe ramię (a) klucza.

Siła czynna rzeczywista, ze względu na duże tarcie, jest zwykle znacznie większa od teoretycznej, obliczonej z ostatniego wzoru.

Śruba znajduje szerokie zastosowanie w technice i budownictwie; używana jest do sztywnego i trwałego łączenia z sobą rozmaitych części maszyn i budowli, do wytwarzania dużych ciśnień w tak zwanych prasach śrubowych (rys. 125), do uszczelniania klap w kranach i zaworach i t. p.

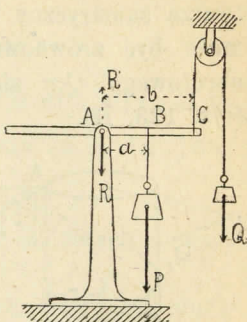
176. Dźwignie. Dźwignię tworzy sztywny drąg, pręt lub belka o jednym tylko punkcie podparcia A (rys. 126 i 127). Zależnie od tego, czy punkt A wypada pomiędzy siłami, działającymi na dźwignię, czy też poza niemi, wyróżniamy dźwignię rodzaju pierwszego (rys. 126) i drugiego (rys. 127). Sama belka dźwigniowa zwykle jest lekka, albo też ciężar jej jest zrównoważony względem punktu podpar-

cia A . Jeżeli w pewnym punkcie B dźwigni przyłożona jest siła (P) oporu pożytecznego, w innym zaś punkcie C —siła czynna (Q),



Rys. 126.

wówczas równowaga tak obciążonej dźwigni możliwa jest tylko pod warunkiem, aby wypadkowa (R) sił P i Q trafiła na punkt podparcia A i była zniesiona przez równą jej i wprost przeciwną siłę odporową (R') tego nieruchomego punktu (rys. 126 i 127).



Rys. 127.

Wiadomo (patrz § 16, art. 146 i 149), że warunek

ten określa się równością momentów statycznych obydwóch sił P i Q względem punktu przyłożenia A ich wypadkowej; zatem dla dźwigni obu rodzajów musi być spełniona równość:

$$Pa = Qb;$$

stąd siła czynna:

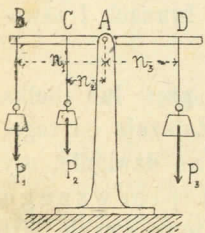
$$Q = P \cdot \frac{a}{b} \dots \dots \dots (3)$$

Z równości tych widać, że siła czynna (Q) oraz przekładnia ($\frac{Q}{P}$) są tem mniejsze, a więc dźwignia tem korzystniejsza, im krótsze jest ramię (a) siły (P) oporu pożytecznego, a dłuższe ramię (b) siły czynnej (Q).

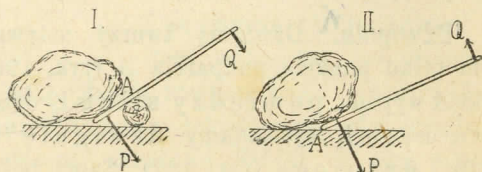
Ostatni wzór daje wartość siły czynnej teoretycznej, siła zaś czynna rzeczywista musi być od tej nieco większa wobec nieuniknionych oporów szkodliwych.

Dźwignia może zachowywać się w równowadze pod działaniem nie tylko dwóch, ale wogóle dowolnej ilości sił, trzeba tylko każdorazowo spełnić warunek, aby suma *algebraiczna* momentów statycznych wszystkich sił, działających na dźwignię względem punktu podparcia A wypadła równą zeru. Naprzykład, dla dźwigni, obciążonej trzema siłami P_1 , P_2 i P_3 (rys. 128), należy spełnić warunek:

$$-P_1n_1 - P_2n_2 + P_3n_3 = 0.$$



Rys. 128.

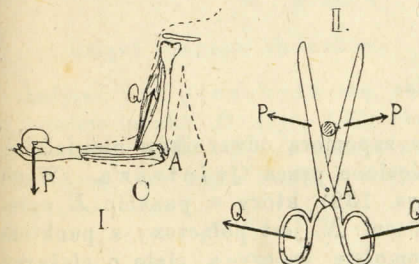


Rys. 129.

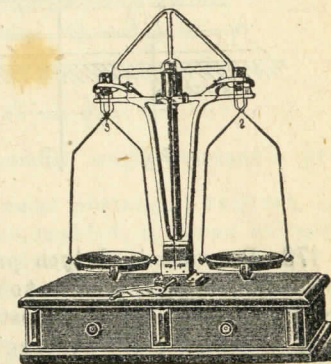
177. Mimo swej prostoty dźwignia ma bardzo obszerne zastosowanie w technice i w życiu codziennem. Zwykły drąg może być używany do poruszania ciężkich przedmiotów jako dźwignia rodzaju pierwszego (rys. 129, I) lub drugiego (rys. 129, II).

Liczne narzędzia, służące do użytku codziennego, jak: szczypce, kleszcze, obcęgi, nożyczki (rys. 130, II) i t. p., przedstawiają w różny sposób skombinowane dźwignie obydwóch rodzajów.

Mechanizm ramienia ludzkiego (rys. 130, I) jest również dźwignią rodzaju drugiego, która posiada, jak widać, niekorzystny stosunek ramion, gdyż siła czynna (Q) tak zwanego mięśnia dwugłowego (bicepsa) przyłożona jest na zbyt krótkim ramieniu (AC), wskutek czego mięsień ten musi mieć znaczną wielkość i silną budowę.



Rys. 130.



Rys. 131.

178. Do najważniejszych zastosowań praktycznych dźwigni należą **wagi** różnych typów. Zwykłej budowy waga belkowa albo talerzykowa (rys. 131) posiada belkę w postaci równoramiennej dźwigni rodzaju pierwszego, ustawionej w celu zmniejszenia tarcia na ostrzach i podstawkach, wykonanych z bardzo mocnych i twardych materiałów (stali hartowanej, agatu i t. p.). Aby waga była rzetelną, to znaczy, aby ciężar i masa ciała, na niej ważonego, były podczas równowagi ściśle równe ciężarowi i masie odważników (ciężarków), położonych na drugim talerzyku wagi, potrzeba spełnić szereg warunków:

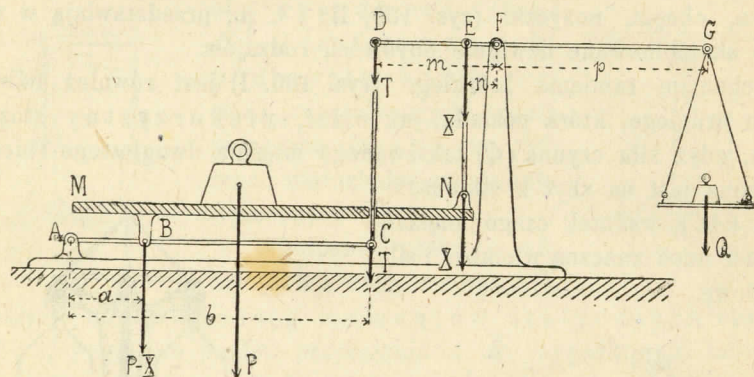
1-o) aby ramiona dźwigni wagowej między punktem podparcia a punktami zawieszenia talerzyków były dokładnie równe sobie; wówczas też równe będą zawieszane na nich ciężary i ich momenty statyczne;

2-o) aby nieobciążona belka wagowa bez talerzyków była dokładnie zrównowazona względem punktu swego podparcia;

3-o) aby talerzyki posiadały jednakowe masy i kształt.

Można w razie potrzeby ważyć rzetelnie również i na wadze fałszywej. Należy w tym celu zamiast odważników użyć najpierw tak zwanej

tary w postaci drobnego śrutu, piasku i t. p., zanim nie zostanie osiągnięta równowaga. Wówczas ciało zważone należy zdjąć, na jego miejsce zaś nałożyć odważników, dopóki znów nie nastąpi równowaga. Oczywiście, że masa i ciężar odważników równe są wówczas masie i ciężarowi zdjętego poprzednio ciała.



Rys. 132.

179. Do ważenia dużych przedmiotów zapomocą odważników niewielkich używane są wagi pomostowe, wynalezione przez Quintenz'a. Waga tego typu składa się z pomostu MN (rys. 132), który w punkcie B opiera się o dźwignię ABC , drugim zaś końcem N jest połączony z punktem E dźwigni górnej $DEFG$. Jeżeli na pomoście spoczywa ciało o ciężarze P , wówczas jedna ze składowych X tego ciężaru zostaje przeniesiona za pośrednictwem pręta NE do punktu E . Składowa druga ($P - X$), działająca na punkt B dźwigni ABC , wywołuje na jej końcu C siłę T , której wielkość może być obliczona ze stosunku ramion a i b dźwigni ABC podług wzoru (art. 176 wzór 3):

$$T = (P - X) \cdot \frac{a}{b}.$$

Siła T działa w dalszym ciągu na punkt D dźwigni górnej, wobec czego dla równowagi należy na końcu ramienia p tej dźwigni zawiesić ciężar Q w punkcie G , zachowując znany warunek równości momentów statycznych, mianowicie:

$$T \cdot m + X \cdot n = Q \cdot p,$$

Dźwignie dolna i górna dobrane są tak, aby posiadały równe stosunki ramion:

$$\frac{a}{b} = \frac{n}{m}.$$

Wobec tego wyrażeniu dla siły T można nadać inną postać, mianowicie:

$$T = (P - X) \cdot \frac{a}{b} = (P - X) \cdot \frac{n}{m};$$

po wstawieniu zaś tej wartości w równaniu momentów, otrzymamy:

$$(P - X) \cdot \frac{n}{m} \cdot m + X \cdot n = Q \cdot p,$$

albo po uproszczeniu:

$$Pn = Qp.$$

Z równości tej widzimy, że równowaga przyrządu jest zależna nie od wielkości sił składowych (X i $P - X$), lecz od wielkości całego ciężaru P , jak gdyby siła ta całkowicie była przyłożona w jednym tylko punkcie E na ramieniu n . Wynik ten oznacza jednocześnie, że równowaga przyrządu jest zupełnie niezależna od położenia ciężaru P na pomoście.

Aby otrzymać w tych warunkach tak zwaną wagę dziesiętną albo decymalną, należy ramiona n i p dźwigni górnej wykonać w stosunku:

$$n : p = 1 : 10; \quad \text{wówczas: } Q = \frac{1}{10} P.$$

Dla wagi zaś setnej albo centesimalnej powinno być:

$$n : p = 1 : 100; \quad Q = \frac{1}{100} P.$$

Dzięki równości stosunków: $\frac{a}{b} = \frac{n}{m}$ pomost wagi Quintenz'a podczas

kołysań nie przechyla się, zachowując wciąż postawę poziomą, jeżeli bowiem punkt B (rys. 132) obniża się, na przykład, o pewną odległość x , wówczas punkt C , a wraz z nim i D obniżają się o odległość tyle razy większą, ile razy ramię b większe jest od a . Obniżenie punktów C i D wynosi więc:

$$x \cdot \frac{b}{a},$$

obniżenie zaś punktów E i N na tej samej zasadzie wynosi:

$$\left(x \cdot \frac{b}{a}\right) \cdot \frac{n}{m};$$

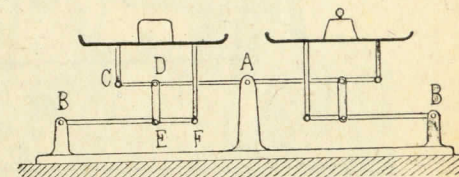
ale ponieważ: $\frac{n}{m} = \frac{a}{b}$, wobec tego: $\frac{b}{a} \cdot \frac{n}{m} = 1$; $x \cdot \frac{b}{a} \cdot \frac{n}{m} = x$.

Wypadło więc, że punkt N również obniży się o odległość x , czyli, że pomost zachowa postawę poziomą.

180. W handlu używane są również wagi pomysłu Roberval'a. Waga tego typu w udoskonalonej nieco konstrukcji (rys. 133) przedstawia kombinację dźwigni CDA i BEF , dobranych tak, aby była spełniona proporcja:

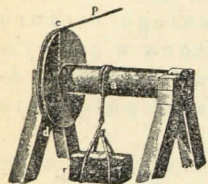
$$\frac{AC}{AD} = \frac{BF}{BE}.$$

Dzięki temu warunkowi, tale-
rzyki wagi podczas kołysań nie
przechylają się, a równowaga przy-



Rys. 133.

rządu również, jak w wagach pomostowych, jest niezależna od miejsca ciał ważonych i ciężarków na szalkach. Wagi Roberwala są dogodniejsze w użyciu od zwykłych wag talerzykowych, posiadają jednak tę samą wadę, co i wagi pomostowe, mianowicie: czułość ich oraz dokładność ważenia, wskutek tarcia w przegubach (zawiasach) mechanizmu, są nieznaczne.



Rys. 134.

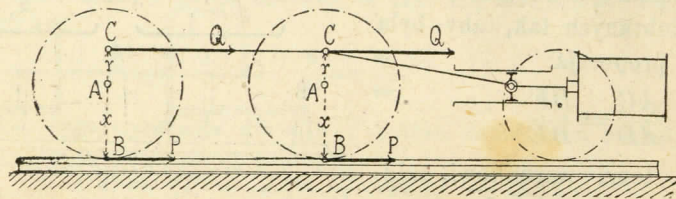
181. Kołowrót. Prosta ta machina znana jest w wielu odmianach. Rysunek 134 wyobraża, naprzykład, kołowrót, składający się z grubego wału i osadzonego na nim sztywnie koła. Kręcąc to koło z nieznacznym wysiłkiem, można podnosić duże ciężary zapomocą liny, nawiniętej na wał. Siła oporu pożytecznego P (rys. 135), która zwykle jest przyłożona na obwodzie koła mniejszego o promieniu r , zostaje zrównoważona i pokonana działaniem siły czynnej (Q), przyłożonej na obwodzie koła lub korby o większym promieniu R . Warunek równowagi całego kołowrotu wymaga, aby momenty obrotowe obydwóch sił (P i Q) względem wspólnej ich osi (A) były równe i miały kierunki przeciwne, musi więc być spełniona równość: $Pr = QR$ stąd zaś siła czynna, teoretyczna:

$$Q = P \cdot \frac{r}{R}.$$

W kołowrocie widzimy takie same ustosunkowanie sił i ramion, jak i w dźwigni. Stąd łatwo zrozumieć, dlaczego, koła prowadzące lokomotyw towarowych są mniejsze, niż koła lokomotyw osobowych. Mechanizm korbowy lokomotywy (rys. 136) jest, jak widać, jedną z odmian kołowrotu, dla którego spełniony jest warunek:

$$Qr = Pr, \text{ gdzie } P \text{ oznacza siłę tarcia między kołami a szynami;}$$

$$\text{stąd promień kół } x = \frac{Qr}{P}.$$



Rys. 136.

Siła P jest tem większa, im większy jest ciężar całego pociągu i lokomotywy. Wobec tego promień x kół prowadzących lokomotyw towarowych powinien być mniejszy, niż w lokomotywach osobowych.

182. Kołowrót znajduje ważne zastosowanie techniczne w tak zwanych pędniach (transmisiach) trybowych oraz pasowych. Pędnię trybową w najprostszym przypadku stanowią dwa kołowroty, połączone z sobą zapomocą kół zębatych czyli trybów (rys. 137). Pomiedzy trybami w miejscach ich zazębienia wynikają równe i wprost sobie przeciwne siły T . Uwzględniając te siły, oraz wielkości: oporu pożytecznego (P), siły czynnej (Q) i promieni kołowrotów (r_1, r_2, r_3 i r_4), otrzymamy dwa warunki równowagi:

$$Tr_2 = Qr_1; \quad Tr_3 = Pr_4;$$

dzieląc zaś je przez siebie stronami, otrzymamy:

$$\frac{r_2}{r_3} = \frac{Q}{P} \cdot \frac{r_1}{r_4};$$

stąd przekładnia:

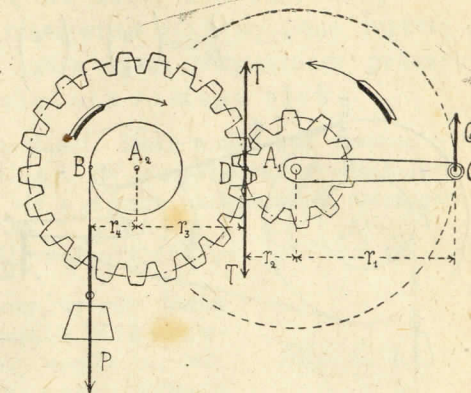
$$\frac{Q}{P} = \frac{r_2}{r_1} \cdot \frac{r_4}{r_3};$$

a siła czynna teoretyczna:

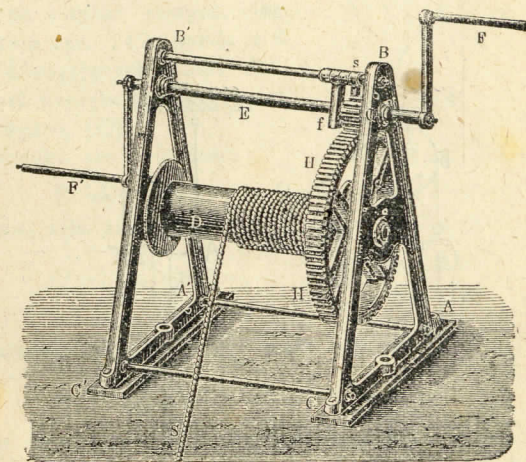
$$Q = P \cdot \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \cdot \left(\frac{r_4}{r_3} \right).$$

Otrzymane wzory dowodzą, że zarówno przekładnia, jak i siła czynna w pędni trybowej zależne są od stosunków promieni obydwóch kołowrotów. Praktyczne urzeczywistnienie takiej pędni widzimy w lewarze czyli przystawce ręcznej na rys. 138.

Jeżeli pędnia składa się z większej liczby zazębionych między sobą parami kołowrotów, jak to ma miejsce, na przykład, w mechanizmach zegarowych, wówczas przekładnia całego mechanizmu rów-



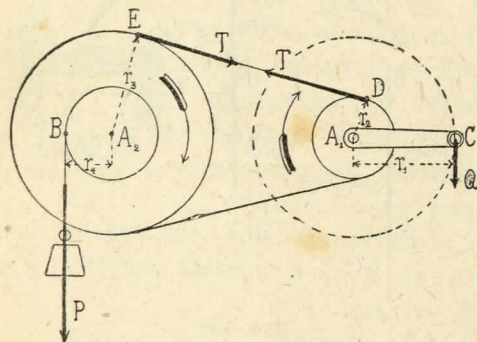
Rys. 137.



Rys. 138.

na jest iloczynowi przekładni wszystkich poszczególnych kołowrotów. Ponieważ stosunki promieni równe są stosunkom obwodów kół, te zaś są proporcjonalne do ilości zębów na trybach (z_1, z_2, z_3 i t. d.), stąd przekładnia może być obliczona z wyrażenia:

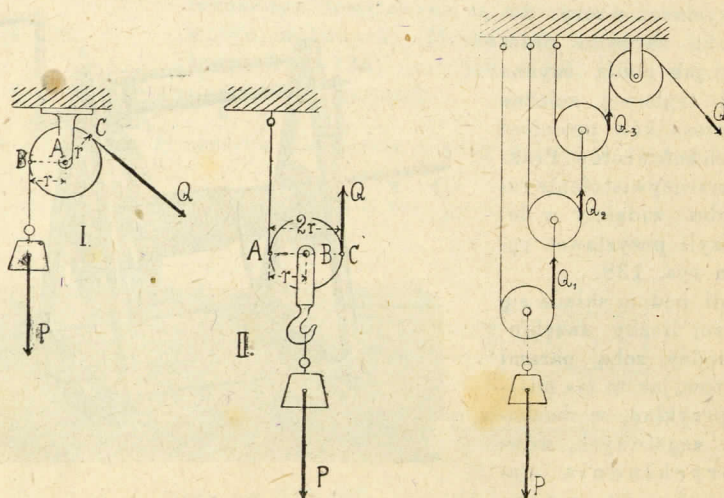
$$\frac{Q}{P} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right) \cdot \left(\frac{z_4}{z_3}\right) \cdot \left(\frac{z_6}{z_5}\right) \text{ i t. d.}$$



Rys. 139.

184. Bloki czyli kółki. Zależnie od sposobu zawieszenia, wyróżniamy blok rodzaju pierwszego albo stały (rys. 140, I), oraz blok rodzaju drugiego albo przesuwany (rys. 140, II). Blok rodzaju pierwszego nie daje żadnej wygranej na sile, gdyż z równości momentów obrotowych: $Pr = Qr$ wynika, że teoretycznie: $P = Q$.

W rzeczywistości zaś siła czynna wypada nawet nieco większa od siły (P) oporu pożytecznego ze względu na tarcie w osi bloka, sztywność pasa albo liny i t. p. Bloki stałe służą więc tylko do zmiany kierunku działania siły i ruchu.



Rys. 140.

Rys. 141.

Pędnia trybowa znajduje częste zastosowanie w budowie maszyn.

183. W zupełnie analogiczny sposób, z użyciem tych samych znakowań, równości i wzorów może być obliczona przekładnia i siła czynna w pędni pasowej (rys. 139). Zamiast zębów trybowych, kołowroty są tu połączone sprężystym i silnie naciągniętym pasem albo liną, w której również wynikają dwie równe i wprost sobie przeciwne siły T .

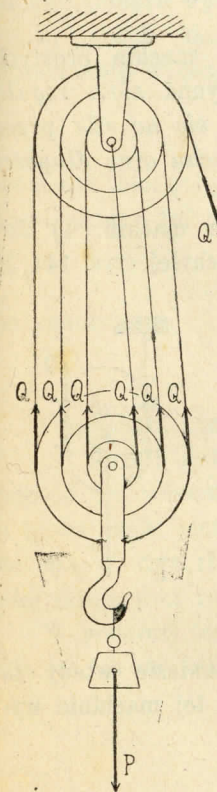
W bloku przesuwym (rys. 140, II) powinna być spełniona równość momentów obrotowych względem punktu zawieszenia, mianowicie:

$$Pr = Q \cdot 2r; \text{ stąd: } Q = \frac{1}{2} P.$$

Bloki te dają więc wygraną na sile, nie zmieniając kierunku ruchu. Siła czynna rzeczywista (Q_1) wypadnie większą od obliczonej siły Q , musi bowiem prócz oporu pożytecznego pokonywać opory szkodliwe oraz połowę ciężaru samego bloka.

185. W celu zmniejszenia przekładni, bloki mogą być łączone w tak zwane wielokółki albo wciągi. W wielokółku, wyobrażonym na rys. 141, siłę czynną (Q) oblicza się z szeregu następujących zależności:

$$Q_1 = \frac{1}{2} P; \quad Q_2 = \frac{1}{2} Q_1 = \frac{1}{2^2} P; \quad Q_3 = \frac{1}{2^3} P = Q.$$



Rys. 142.

To znaczy, że gdy liczba użytych kółek przesuwanych jest wogóle n , siłę czynną (Q) można obliczyć wówczas z wzoru ogólnego:

$$Q = \frac{1}{2^n} P;$$

stąd wielokółki tego typu noszą nazwę potęgowych i mogą dawać znaczną wygraną na sile.

Ze względu na niezbyt dogodną konstrukcję wielokółek potęgowych stosowane są przeważnie tak zw. wielokółki krotne. Przy użyciu, na przykład, 3 bloków przesuwanych i tyluż stałych, jak wskazuje rys. 142; każda z 6 nici, dźwigających bloki dolne, jest napięta (teoretycznie) siłą czynną (Q).

Wynika stąd równość:

$$6 Q = P,$$

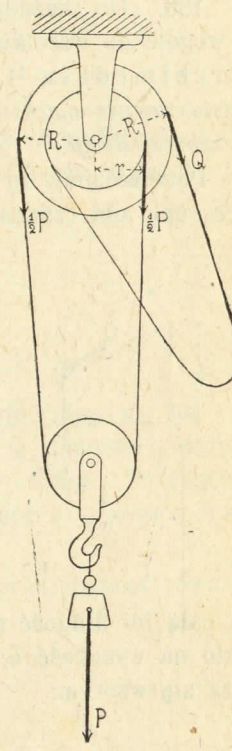
z której siła czynna:

$$Q = \frac{1}{2 \cdot 3} P.$$

Przy użyciu n bloków przesuwanych wypadnie wzór ogólny:

$$Q = \frac{1}{2n} P.$$

Liczba n wchodzi w tym wzorze nie jako wykładnik potęgi, lecz jako czynnik, stąd wielokółki tego typu noszą nazwę krotnych i dają w porównaniu do poprzednich mniejszą wygraną na sile.



Rys. 143.

W użyciu również są tak zwane wielokrażki czyli wciagi różnicowe (rys. 143). Górny blok takiego wielokrażka składa się z dwóch sztywnie połączonych z sobą spółosiowych bloków o nieznaczonej różnicy $(R - r)$ ich promieni. Uwzględniając działanie na ten blok trzech sił: $\frac{1}{2}P$, $\frac{1}{2}P$ i Q , oraz momenty obrotowe tych sił względem osi bloka z obu stron, otrzymamy następujący warunek równowagi:

$$\frac{1}{2}PR = \frac{1}{2}Pr + QR;$$

albo:

$$QR = \frac{1}{2}P(R - r);$$

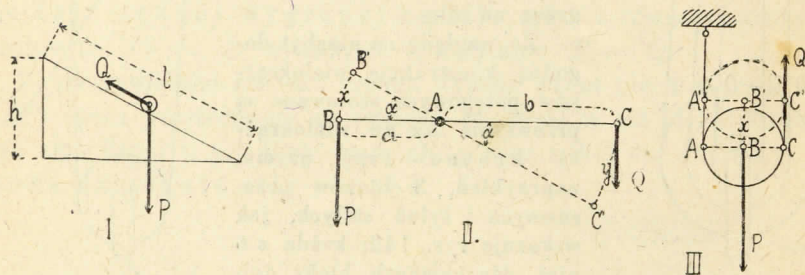
stąd siła czynna:

$$Q = \frac{1}{2}P \frac{R - r}{R}.$$

Wypada ona tem mniejsza, a wielokrażek ma tem korzystniejszą przekładnię, im mniejsza jest różnica $(R - r)$ promieni bloka górnego. Stąd wielokrażek zowie się różnicowym.

186. Do każdej z opisanych w tym rozdziale machin prostych i wogóle do wszelkich machin może być stosowana słynna złota reguła Archimedesesa ¹⁾. Reguła ta głosi, że ile zyskuje się na sile przez zastosowanie maszyny, tyleż się traci na prędkości ruchu oraz długości przebytej drogi.

Potwierdzimy tę regułę dla niektórych z opisanych machin. 1) Jeżeli, np., siła czynna (Q) przesunie ciało po równi pochyłej (rys. 144, I)



Rys. 144.

na całą jej długość (l), siła (P) oporu pożytecznego uniesie wtedy to ciało na wysokość h ; wiadomo zaś, że przekładnia w tej maszynie wyraża się wzorem:

$$\frac{Q}{P} = \frac{h}{l};$$

¹⁾ Archimedes, wielki mędrzec grecki z III wieku przed nar. Chr., wstawił się wielu ważnymi odkryciami w dziedzinie matematyki i mechaniki. Wynalazł i zbudował dużo machin oraz podał ich teorię. Budowane podług pomysłów Archimedesesa maszyny wojenne wyrządzały, jak twierdzą kroniki, wielkie straty Rzymianom, oblegającym Syrakuzy — miasto rodzinne Archimedesesa.

wypada więc, że stosunek sił jest równy odwrotnemu stosunkowi przebytych przez nie dróg i prędkości. Z równości tej, wyrażającej „złotą regułę” Archimedesesa, można otrzymać inną, mianowicie:

$$Ql = Ph.$$

Jest to, jak widać, równość prac, wykonanych przez każdą z sił P i Q . To znaczy, że „złota reguła” w istocie swej opiera się na prawie zachowania energii i jest matematycznym wyrazem tego prawa, ostatnia bowiem równość oznacza, że energia, dostarczona przez działanie siły czynnej (Ql), teoretycznie równa jest ilości energii (Ph), zużytej na pokonanie siły (P) oporu pożytecznego. W rzeczywistości część energii czynnej (Ql) zużywa się prócz tego na pokonanie nieuniknionych oporów szkodliwych.

2) Jeżeli mamy dźwignię rodzaju pierwszego (rys. 144, II), której przekładnia wyrażona jest wzorem:

$$\frac{Q}{P} = \frac{a}{b},$$

wówczas, biorąc pod uwagę długości (x i y) łuków, zakreślonych końcami ramion tej dźwigni, otrzymamy (wobec równości kątów α) proporcję:

$$\frac{a}{b} = \frac{x}{y};$$

to znaczy, że:

$$\frac{Q}{P} = \frac{x}{y}.$$

Otrzymana równość wyraża „złotą regułę”.

3) Jeżeli blok przesuwany (rys. 144, III) zostanie uniesiony na wysokość x , wówczas pod działaniem siły czynnej Q zostanie zwinięta z bloku część nici o długości $AA' + CC' = 2BB' = 2x$. To znaczy, że siła Q , dwa razy mniejsza od siły P , musi przebyć w porównaniu do niej drogę dwa razy dłuższą.

W podobny sposób „złota reguła” może być potwierdzona również dla innych machin.

MECHANIKA CIECZY.

(HIDROMECHANIKA).

§ 20. Własności fizyczne cieczy. Zasada Pascala.

187. Materja w stanie ciekłym składa się z cząsteczek, rozluźnionych o tyle, że siły spójności działają między nimi w słabym stopniu i uwydatniają się tylko w niewielkich ilościach cieczy, np., w kroplach; w dużych zaś ilościach ciecz dla zachowania niezmiennego kształtu i równowagi powinna być umieszczona w naczyniu, które może być otwarte tylko u góry.

Wskutek łatwej ruchliwości cząsteczek ciecz przystosowuje swój kształt do kształtu naczynia, zewnętrzna zaś jej powierzchnia, czyli tak zwany *poziom swobodny*, przybiera w stanie spoczynku taki kształt, aby położone na nim cząsteczki cieczy były jednakowo odległe od środka ziemi i aby siły ciężkości tych cząsteczek skierowane były prostopadłe (normalnie) do powierzchni poziomu. W tych warunkach siły i ciśnienia we wszystkich punktach poziomu swobodnego są jednakowe, dzięki czemu następuje równowaga.

Powierzchnia swobodna cieczy posiada więc, ściśle mówiąc, kształt kulisty, spółśrodkowy z kulą ziemską, jak to ma miejsce w morzach i oceanach; jedynie w niewielkich ilościach cieczy powierzchnię tę można przyjmować za *płaszczyznę poziomą*.

188. Obok znacznej ruchliwości cieczy są bardzo mało ściśliwe, to znaczy nie ulegają żadnym prawie zmianom objętości pod działaniem największych nawet ciśnień zewnętrznych.

Tą własnością cieczy tłumaczy się między innymi pękanie rur wodociągowych, cylindrów w pompach i maszynach parowych i t. p. Potężne działanie dynamiczne min i torped podwodnych również jest skutkiem nieściśliwości wody, która zachowuje się w podobnych warunkach jak najtwardsze i najsprężystsze ciało stałe.

189. Z łatwej ruchliwości oraz sprężystości cieczy wynika ważna zasada fizyczna, odkryta początkowo przez fizyka holenderskiego Stevin'a później zaś nieco, w wieku XVII, opracowana teoretycznie przez uczonego francuskiego Pascala'a. Zasada ta wyraża się w sposób następujący:

Jeżeli na ciecz, zamkniętą szczelnie ze wszystkich stron w naczyniu, zostanie wywarte w pewnym miejscu ciśnienie, wówczas ciśnienie to udziela się *całej masie cieczy*, oraz dnu i ścianom naczynia; rozchodzi się przytem we wszelkich kierunkach *jednakowo*, działa prostopadłe (normalnie) do powierzchni i wywiera na nią parcie *proporcjonalne do wielkości powierzchni*.

W prosty sposób zasadę tę można sprawdzić, wytłaczając ciecz z naczynia (rys. 145) przez małe otwórki, w różnych miejscach tego naczynia. Ze wszystkich tych otworków ciecz wytryska wówczas z jednakową siłą, prostopadłe do ścian naczynia.

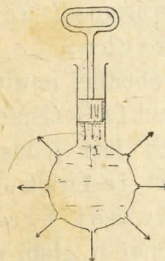


Pascal.

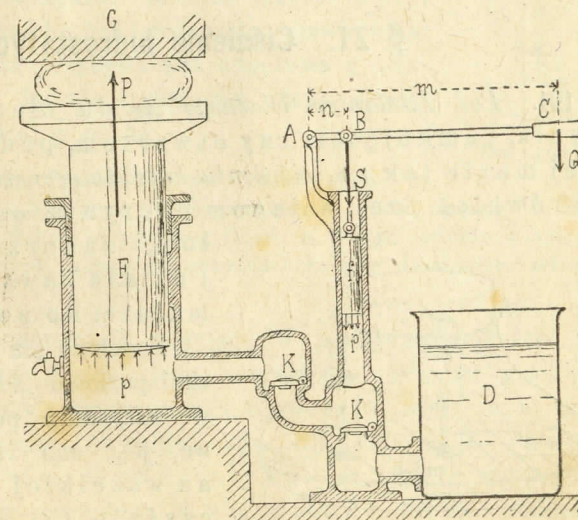
190. Do najważniejszych zastosowań praktycznych wspomnianej zasady należą prasy, czyli tłocznie hydrauliczne. Są to maszyny, pozwalające nieznaczną siłą czynną Q (rys. 146) za pośrednictwem dźwigni ABC , tłoka o niewielkim przekroju poprzecznym (f), oraz cieczy, wywrzeć ciśnienie (p) na tłok o większym przekroju (F) i unieść go siłą (P), znacznie większą od siły czynnej (Q).

Z długości ramion (m i n) dźwigni ABC można obliczyć siłę (S), działającą na tłok f , mianowicie:

$$S = P \cdot \frac{m}{n}.$$



Rys. 145.



Rys. 146.

Siła ta wywołuje pod tłokiem f na całej jego powierzchni dolnej ciśnienie (§ 14, art. 125):

$$p = \frac{S}{f} = \frac{P \cdot \frac{m}{n}}{f}.$$

Ponieważ także ciśnienie, w myśl zasady Pascala, działa na powierzchni dolnej tłoka drugiego o przekroju F , przeto parcie w postaci siły (P), unoszącej ten tłok, może być obliczone z wzoru:

$$P = pF = P \cdot \frac{m}{n} \cdot \frac{F}{f}.$$

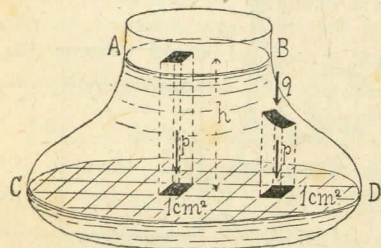
Z wzoru tego widać, że siła P jest tem większa, prasa zaś tem silniejsza, im większy jest stosunek $\frac{m}{n}$ ramion dźwigni, oraz stosunek $\frac{F}{f}$ przekrojów poprzecznych tłoków.

Można nadto łatwo udowodnić, że prasa hydrauliczna, jak każda wogóle machina, podlega „złotej regule” Archimedesesa. Jeżeli, mianowicie, pewna ilość cieczy z naczynia D przez klapy K zostanie wprowadzona zapomocą tłoka f do naczynia, w którym znajduje się tłok F , wówczas objętość tej cieczy równa się iloczynowi z przekroju tłoka (f) przez wielkość (s_1) jego przesunięcia w walcu. Wchodząc pod tłok F , ciecz nie zmienia swej objętości, przeto uniesie ten tłok na odległość s_2 , tyle razy mniejszą od s_1 , ile razy przekrój f jest mniejszy od przekroju F ; czyli wygrana na sile zachodzi wówczas kosztem zmniejszenia długości przebytej drogi.

Prasy hydrauliczne używane są w podnośnikach (windach), olejarniach, w prasowniach siana, w maszynach do nasadzania kół na osi lokomotyw i wagonów, do próbowania wytrzymałości rur i kotłów parowych i t. p.

§ 21. Ciśnienie hydrostatyczne.

191. Pod działaniem własnego ciężaru ciecz w każdym naczyniu, zamkniętem czy otwartem, poddana jest w całej swej masie tak zw. *ciśnieniu hydrostatycznemu*, które udziela się również dnu i ścianom naczynia, oraz wszelkim ciałom, zanurzonym w cieczy, i działa zawsze *prostopadle* (normalnie) do powierzchni.



Rys. 147.

Podobnie jak na swobodnej powierzchni poziomu AB (rys. 147) ciśnienie we wszystkich punktach jest jednakowe, jest ono również jednakowe na wszelkiej poziomej płaszczyźnie CD , położonej w głębi cieczy w pewnej dowolnej odległości (h)

od poziomu swobodnego AB , wszystkie bowiem punkty tej płaszczyzny posiadają jednakowe odległości od środka ziemi, położone zaś na niej cząsteczki cieczy poddane są jednakowym siłom ciężkości i znajdują się w równowadze.

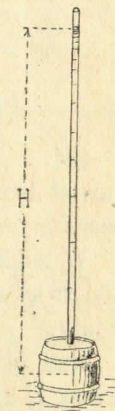
Można się przekonać o tem doświadczalnie, jeżeli naczynie zawiera dwie nie mieszające się z sobą ciecze, np., wodę i oliwę. Powierzchnia CD , rozgraniczająca te ciecze od siebie, w spoczynku jest wówczas zawsze płaszczyzną poziomą.

192. Uwzględniając jednostkę powierzchni (1 cm^2) na płaszczyźnie CD bezpośrednio pod poziomem swobodnym AB , widzimy, że ciśnienie hydrostatyczne (p) na tej części powierzchni mierzy się ciężarem słupka cieczy o przekroju równym 1 cm^2 i wysokości h . Mając nadto wiadomy ciężar właściwy (s) cieczy, można ciśnienie hydrostatyczne (p) w tem miejscu obliczyć z wzoru:

$$p = (1 \text{ cm}^2 \cdot h) \cdot s; \text{ albo: } p = hs \dots \dots (1)$$

Wzór ten oznacza, że w danej jednorodnej cieczy *ciśnienie hydrostatyczne w każdym miejscu jest wprost proporcjonalne do głębokości (h) tego miejsca pod poziomem swobodnym*, wcale zaś jest niezależne od kształtów i wymiarów naczynia, ani od ilości zawartej w niem cieczy.

Obliczone ciśnienie (p) panuje więc we wszystkich punktach płaszczyzny poziomej CD (rys. 147), nawet nie leżących bezpośrednio pod poziomem swobodnym AB . Jakkolwiek bowiem słupek cieczy, położony w tych miejscach nad jednostką powierzchni (1 cm^2), jest krótszy, zato przybywa siła odporowa q ścian naczynia, siła zaś ta, łącznie z ciężarem słupa cieczy, wytwarza również ciśnienie: $p = hs$.

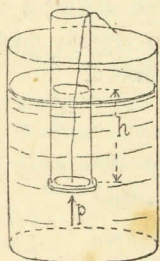


Rys. 148.

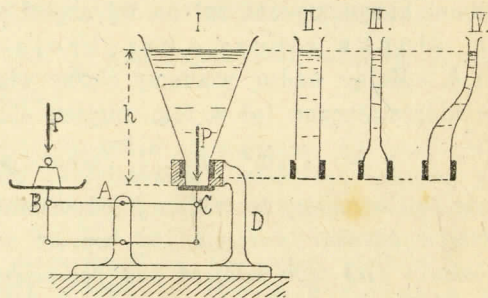
Wychodząc z tej zasady, Pascal dokonał efektownego doświadczenia, rozsadzając beczkę (rys. 148) ciśnieniem wody, nalanej do rury wąskiej, ale wysokiej. Mimo niewielkiej ilości, a dzięki jedynie znacznej wysokości (H) wody w rurze, udało się rozsadzić beczkę działaniem ciśnienia hydrostatycznego.

193. Ciśnienie hydrostatyczne, panujące w pewnej głębokości (h) pod poziomem swobodnym cieczy, jest, oczywiście, siłą *wewnętrzna*, jeżeli więc w danym miejscu cieczy panuje równowaga, wówczas, na mocy III zasady dynamicznej Newtona, sile tej odpowiada równe i wprost jej przeciwne oddziaływanie. Każda warstewka cieczy, jak również każda zanurzona w niej cienka płytka, poddana jest z obu stron równym i wprost przeciwnym siłom, wy-

nikającym z ciśnienia hydrostatycznego i działającym prostopadle (normalnie) do powierzchni. Można się przekonać o tem doświadczalnie, zanurzając w naczyniu z cieczą pusty cylinder szklany (rys. 149), zakryty u dołu cienką płytką ruchomą, przytrzymywaną zapomocą nici. Płytkę ta po zanurzeniu cylindra nie odpada, mimo zwolnienia nici, ulega bowiem działaniu parcia hydrostatycznego z dołu do góry. Wystarczy jednak parcie to zrównoważyć ciężarem słupa o wysokości h tej samej cieczy, nalanej do cylindra, a płytkę natychmiast odpada. Ciśnienie na płytkę jest więc proporcjonalne do głębokości (h) pod poziomem swobodnym i działa do góry.



Rys. 149.



Rys. 150

194. Okoliczność, że ciśnienie hydrostatyczne jest zupełnie niezależne od kształtów i wielkości naczynia, ani od ilości zawartej w niem cieczy wydaje się być czemś nieprawdopodobnem.

W wiekach średnich powstał z tego powodu słynny paradoks ¹⁾ hydrostatyczny, który można uwydatnić w następującem doświadczeniu.

Nad otworem w podstawce D (rys. 150) umieszcza się pokolei naczynia I, II, III i IV rozmaitych kształtów i wielkości, u dołu zaś otwór zasłania się ruchomą płytką C , przytwierdzoną do jednego z ramion wagi ABC . Umieszczając na drugim ramieniu ciężarek P i napełniając naczynia z prawej strony wodą, można się przekonać, że w każdym z użytych pokolei naczyń I, II, III i IV woda powinna być doprowadzona do pewnej, jednakowej dla wszystkich wysokości (h) nad płytką C , aby płytkę ta oddzieliła się od naczynia, a woda zaczęła wytryskiwać nazewnątrz. Oznacza to, że niezależnie od kształtów naczyń, ani od ilości zawartej w nich wody (naczynie I zawiera jej najwięcej, naczynie III — najmniej) każdorazowo na płytkę C działa ta sama siła parcia P , jako skutek tylko ciśnienia hydrostatycznego. Dla układu: płytkę i belka wagowa, ciśnienie to daje siłę zewnę-

¹⁾ Paradoksem zowie się twierdzenie słuszne, ale napozór niedorzeczne.

trzną, która zostaje zrównoważona działaniem ciężaru P na szalce B wagi. Ciężar naczyń, oraz ciężar zawartej w nich wody należą w tych warunkach do innego układu ciał, połączonych z nieruchomą podstawą D .

Gdyby, natomiast, naczynia (I — IV) posiadały dna nieruchome i były ustawiane wraz z wodą wprost na płytce C , wówczas grałby rolę tylko ciężar naczyń i wody, ciśnienie zaś hydrostatyczne na dno stałoby się siłą wewnętrzną, którą znosiłaby również wewnętrzna siła odporowa dna. Wysokość (h) poziomu nie miałaby w tym wypadku żadnego wpływu na równowagę przyrządu.

195. Ciśnienie hydrostatyczne działa prostopadle (normalnie) nie tylko na płaszczyzny poziome, ale na wszelkie wogóle dowolnie nachylone powierzchnie. Jeżeli, na przykład, w głębi cieczy położona jest pewna powierzchnia a (rys. 151), wówczas całkowite parcie (P), działające na tę powierzchnię, może być znalezione jako suma ciśnień hydrostatycznych na wszystkich poszczególnych niezmiernie małych elementach $a_1, a_2, a_3, \dots$ tej powierzchni, położonych odpowiednio w głębokościach $h_1, h_2, h_3, \dots$. Otrzymamy stąd wzór:

$$P = (h_1 a_1 + h_2 a_2 + h_3 a_3 + \dots + h_n a_n) \cdot s,$$

gdzie s oznacza ciężar właściwy cieczy.

Suma iloczynów, stojących w nawiasie, może być przyrównana do iloczynu z całej powierzchni (a) przez pewną głębokość średnią h_0 , a jest nią (patrz Statyka § 17, art. 159) odległość środka powierzchni a od poziomu swobodnego.

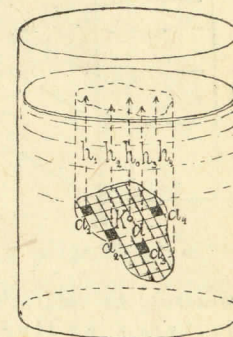
To znaczy, że ostatecznie:

$$P = h_0 a s \dots \dots \dots (2)$$

czyli, że parcie, jakie wytwarza ciśnienie hydrostatyczne na pewną dowolnie nachyloną powierzchnię a , mierzy się ciężarem słupa cieczy o podstawie a i wysokości h_0 swobodnego poziomu cieczy względem środka tej powierzchni.

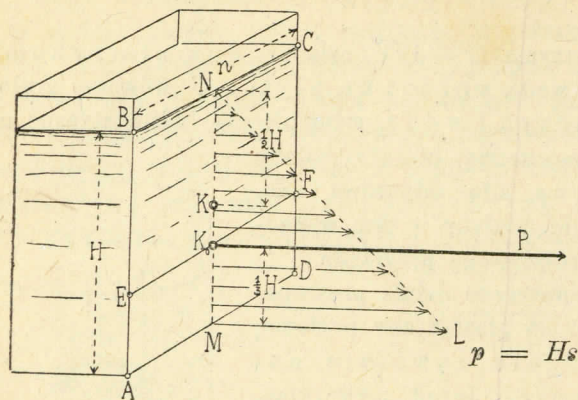
196. Wobec tego parcie P , działające na pionową prostokątną ścianę $ABCD$ (rys. 152) o danej długości n i wysokości H poziomu swobodnego nad dnem, może być obliczone podług wzoru (2). Zakładając w tym wzorze: $h_0 = \frac{1}{2} H$; $a = Hn$, otrzymamy:

$$P = \frac{1}{2} H \cdot (Hn) \cdot s = \frac{1}{2} H^2 n s.$$



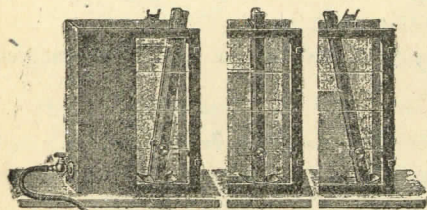
Rys. 151.

Sila ta nie jest rozłożona na ścianie jednostajnie, ciśnienie hydrostatyczne wzrasta bowiem stopniowo od poziomu ($p = 0$) do dna ($p = Hs$). Przebieg tej zmienności może być przedstawiony



Rys. 152.

wniosek, że całą ścianę $ABCD$ można utrzymać w równowadze, podpierając ją tylko wzdłuż prostej poziomej EF (rys. 152), przechodzącej

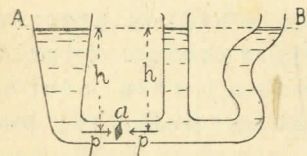


Rys. 153.

przez punkt (K_0) przyłożenia siły wypadkowej P . Jeżeli jednak poziom cieczy w naczyniu podnosi się lub obniża, wówczas, jak wskazuje rys. 153, ściana, na skutek wynikającego stąd momentu obrotowego, przekreca się względem nieruchomej osi w tę lub ową stronę, zależnie od tego, czy punkt przyłożenia siły wypadkowej P podnosi się czy obniża. Na zasadzie podobnych rozważań teoretycznych obliczane

jest parcie wody na tamy, stawidla, wały ochronne na brzegach rzek i t. p.

197. Jeżeli pewna jednorodna ciecz zawarta jest w kilku połączonych z sobą naczyniach I, II i III (rys. 154), wówczas powierzchnie swobodne tej cieczy we wszystkich naczyniach leżą w jednej płaszczyźnie poziomej AB , na wszelką bowiem dowolną powierzchnię a , położoną w miejscu połączenia tych naczyń, działa wówczas z obu stron jednakowe ciśnienie hydrostatyczne (p), które mierzy się odległością (h) środka tej powierzchni od poziomów swobodnych w naczyniach I i II.



Rys. 154.

198. Inaczej przedstawia się zjawisko wtedy, gdy naczynia połączone zawierają nie mieszające się z sobą cieczy o różnych gęstościach. Jeżeli, np., w jednym z dwóch naczyń (rys. 155) znajduje się ciecz o ciężarze właściwym $= s_1$, a poziom jej leży w odległości $= h_1$

nad płaszczyznę poziomą AB , rozgraniczającą ciecz, wówczas w drugim naczyniu ciecz o ciężarze właściwym s_2 ma poziom swobodny w innej odległości (h_2) od tej płaszczyzny granicznej. Ponieważ niżej położona jest ciecz jednorodna, wobec tego na całej płaszczyźnie granicznej AB w obu naczyniach panuje jednakowe ciśnienie hydrostatyczne (p). Wynika stąd równość:

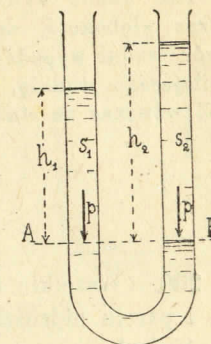
$$p = h_1 s_1 = h_2 s_2,$$

z której otrzymujemy proporcję:

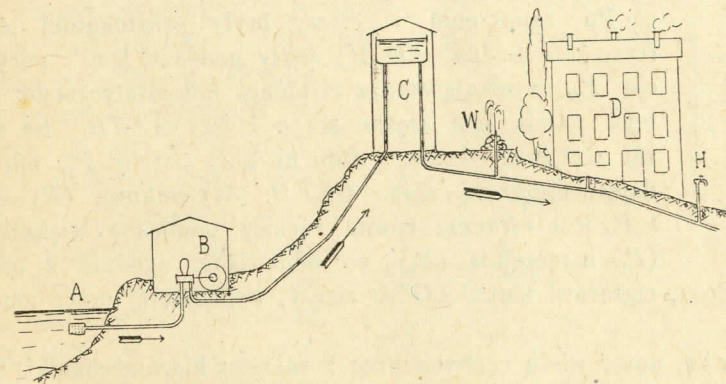
$$h_1 : h_2 = s_2 : s_1 \dots \dots (3)$$

Proporcja ta oznacza, że wysokości poziomów nad płaszczyznę graniczną są wówczas odwrotnie proporcjonalne do ciężarów właściwych lub gęstości cieczy.

199. Zasada ciśnień hydrostatycznych w naczyniach połączonych znajduje ważne zastosowanie praktyczne przy budowie wodociągów, kanalizacji, studni i t. p.

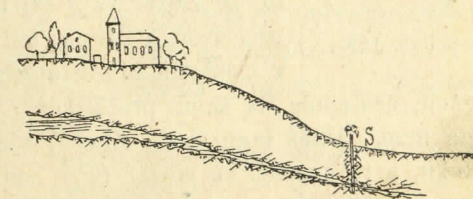


Rys. 155.



Rys. 156.

Instalacja wodociągowa (rys. 156) składa się zwykle ze stacji pomp B , które czerpią wodę z położonego w pobliżu wodozbiornika A i przesyłają rurami podziemnymi do tak zwanej wieży ciśnien C , położonej w najwyższym punkcie danej miejscowości. Ze zbiornika w wieży ciśnien woda dostaje się do sieci rur wodociągowych własnym spadkiem bez użycia maszyn. Może więc zasilać stamtąd domy mieszkalne (D), wodotryski (W), hydranty uliczne (H) i t. d., przy czem w każdym rozgałęzieniu sieci wodociągowej punkt końco-



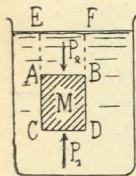
Rys. 157.

wy powinien wypadać niżej od poziomu wody w zbiorniku wieży ciśnien.

Tak zwane studnie artezyjskie (rys. 157), wiercone na znaczną nieraz głębokość, dostarczają wody z żył podziemnych. Jeżeli przytem otwór studni wypada u podnóża góry, poziom zaś wodozbioru podziemnego, zasilającego studnię, jest położony wyżej od tego otworu, woda może tryskać wówczas ze studni obfitym strumieniem do góry.

§ 22. Prawo Archimedes.

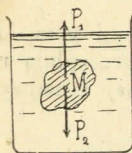
200. Wszelkie ciało stałe, zanurzone w cieczy, poddane jest ciśnieniu i parciu hydrostatycznemu zarówno od góry, jak od dołu i z boków. Ciśnienia boczne, oczywiście, wzajemnie się równoważą, co się zaś tyczy parcia z dołu i z góry, to z dwóch tych sił większą jest siła, działająca z dołu, a stąd *wszelkie ciało, po zanurzeniu w cieczy, traci pozornie na swym ciężarze, a jak tego dowiódł w swoim czasie Archimedes, traci tyle, ile waży wypchnięta przez to ciało ciecz*. Prawo to można udowodnić w sposób następujący:



Rys. 158.

Po zanurzeniu w cieczy bryły prostokątnej $ABCD$ (rys. 158) ściana AB tej bryły poddana jest z góry parciu P_2 , wynikającemu z ciśnienia hydrostatycznego; miarą tego parcia jest ciężar słupa cieczy $AEFB$. Na ścianę zaś CD bryły działa z dołu do góry parcie P_1 , odpowiadające ciężarowi słupa $CEFD$. Wypadkowa (R) sił P_1 i P_2 jest wówczas równa różnicy pomiędzy większą siłą (P_1) a mniejszą (P_2), co odpowiada, zgodnie z prawem Archimedes, ciężarowi słupa $ABCD$ cieczy, wypchniętej przez zanurzone ciało.

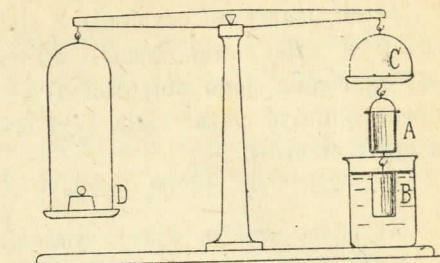
Stevin, autor wielu cennych prac z zakresu hidromechaniki, tę samą zasadę tłumaczy przypuszczeniem, że gdyby wewnątrz nieruchomej cieczy (rys. 159) pewna jej ilość, zawarta w przestrzeni M , *zestawiła się*, nie zmieniając przytem swej gęstości, ani objętości, otrzymana stąd bryła stała (M) przebywałaby nadal w równowadze. Dowodzi to, że ciężar (P_2) tej bryły jest zrównoważony wprost przeciwną i równą mu siłą parcia (P_1), wynikającego z ciśnienia hydrostatycznego w kierunku z dołu do góry.



Rys. 159.

Jeżeli, następnie, ta sama przestrzeń (M) wewnątrz cieczy zostanie zajęta przez jakieś inne ciało, siła P_1 nie zmienia swej wielkości, ani kierunku, a to znaczy, że ciężar (P_2) zanurzonego ciała zostaje wówczas *pozornie zmniejszony o ciężar wypchniętej przez to ciało ilości cieczy*.

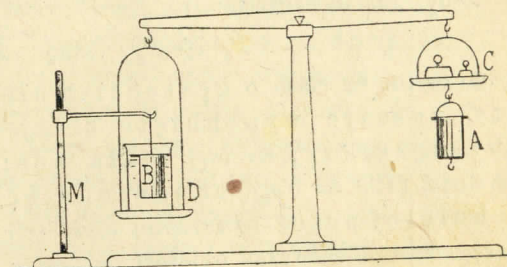
201. Prawo Archimedes można sprawdzić doświadczalnie zapomocą tak zwanej wagi hydrostatycznej. Do szalki C (rys. 160) takiej wagi uczepiony jest cylinder pusty (A), pod nim zaś cylinder masywny (B), szczelnie wypełniający po włożeniu do cylindra A całą jego wewnętrzną objętość.



Rys. 160.

Ciężar obydwóch cylindrów w powietrzu zrównoważony jest odważnikami na szalce D ; po zanurzeniu dolnego cylindra (B) w wodzie waga przechyliła się, powraca zaś do równowagi wtedy, gdy na szalce C będzie dodany ciężar równy ciężarowi wody, wypchniętej przez cylinder masywny (B), albo też, jeżeli cylinder pusty (A) zostanie całkowicie napełniony wodą.

202. Ten sam przyrząd pozwala nadto wykazać, że nie tylko ciecz wywiera ciśnienie i parcie hydrostatyczne na ciało zanurzone, ale, w myśl III zasady dynamicznej Newtona, ciało zanurzone wywiera wówczas na ciecz siłę tej samej wielkości w kierunku *wprost przeciwnym*. Wystarczy w tym celu umieścić na szalce D (rys. 161) naczynie z wodą, odczepić cylinder B i zrównoważyć przyrząd odważnikami na szalce C . Jeżeli następnie cylinder masywny (B) zapomocą podstawki M i nitki zostanie zanurzony do naczynia z wodą na szalce D , przyrząd wychodzi wówczas z równowagi.



Rys. 161.

Zanurzony cylinder (B) ciśnie na wodę taką samą siłą na dół, jaką woda wypiera cylinder do góry. Dla układu: waga-naczynie z wodą, pierwsza z tych sił jest *zewnątrzną*, druga zaś *wewnętrzną*. Pierwszą z tych sił trzeba wtedy zrównoważyć, dokładając odważników na szalce C lub napełniając wodą cylinder pusty (A). W myśl zasady Stevina (art. 200) zanurzony cylinder B działa w tym wypadku tak, jakgdyby do naczynia na szalce D dolano tyle wody, ile jej wypchnął ten cylinder.

203. Zależnie od wielkości ciężaru oraz parcia hydrostatycznego cieczy z dołu do góry, ciało zanurzone może:

1-o) *zatonać*,

- 2-o) utrzymywać się w równowadze w każdym miejscu cieczy,
 3-o) może częściowo wynurzyć się z cieczy, zachowując w tej postawie równowagę.

Jeżeli mamy do czynienia z ciałem jednorodnym i jednolitem, w całej swej masie, wówczas z wiadomego ciężaru właściwego (s_1) tego ciała, jego objętości (v), oraz ciężaru właściwego (s_2) cieczy można obliczyć ciężar ciała (P_1) oraz ciężar (P_2) wypchniętej przez nie cieczy z wzorów:

$$P_1 = vs_1; \quad F_2 = vs_2.$$

Mając na uwadze wyżej wymienione trzy przypadki, znajdziemy, że:
 1-o) dane ciało tonie po zanurzeniu w cieczy wtedy, gdy:

$$P_1 > P_2; \quad vs_1 > vs_2; \quad \text{albo: } s_1 > s_2,$$

a więc, gdy ciężar właściwy albo gęstość ciała zanurzonego jest większa od gęstości cieczy.

2-o jeżeli: $P_1 = P_2$, wówczas: $s_1 = s_2$.

To znaczy, że ciało o gęstości takiej samej, jak i ciecz, zachowuje równowagę obojętną w każdym miejscu cieczy. Przypadek ten można obserwować, zanurzając, na przykład, jajko w roztynie soli odpowiedniej gęstości, albo wpuszczając duże krople oliwy do odpowiednio przyrządzonej mieszaniny wody ze spirytusem.

3-o) jeżeli wreszcie:

$$P_1 < P_2, \quad \text{albo: } s_1 < s_2,$$

oznacza to, że ciało o gęstości mniejszej, niż gęstość cieczy, zostaje wypchnięte z tej cieczy, o tyle tylko jednak, aby ciężar: ($P_1 = vs_1$) ciała został zrównoważony siłą parcia ($P'_2 = v's_2$), odpowiadającą ciężarowi cieczy, wypchniętej przez zanurzoną część (v') tego ciała. Nad poziomem cieczy wystaje wówczas objętość: $v'' = v - v'$.

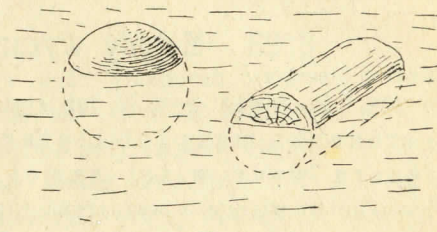
204. Przy zachowaniu ostatniego warunku ciało może pływać na powierzchni cieczy nawet wtedy, gdy jest wykonane z materiału o gęstości większej, niż gęstość samej cieczy, byle tylko posiadało odpowiednio-dużą objętość. Dlatego to statki, budowane przeważnie z żelaza i stali, mogą pływać po wodzie, ale tylko dopóty, dopóki pod działaniem ciśnienia hydrostatycznego woda nie dostanie się przez otwór w kadłubie statku do jego wnętrza; wtenczas bowiem zmniejsza się ilość wypchniętej przez statek wody, a jeżeli weźmie górę siła ciężkości, wówczas statek zatoni.

Słynne w ostatnich czasach statki podwodne budowane są tak, aby nigdy ciężar statku nie przewyższał, lecz był zawsze cokolwiek mniejszy od ciężaru wypchniętej przez statek wody. Ilość tej wody może być w razie potrzeby szybko zmieniana za pomocą silnych pomp, zanu-

rzyć się zaś całkowicie pod poziom wody statek może tylko wtedy, gdy zostanie wprowadzony w ruch przy odpowiednim nastawieniu tak zwanego steru głębokości.

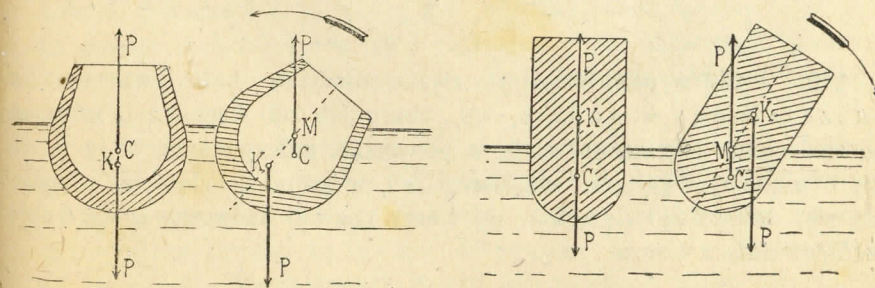
205. Ciała, utrzymujące się na powierzchni cieczy, mogą zachowywać trojaki rodzaj równowagi: obojętną, trwałą i chwiejną (nietrwałą).

W równowadze obojętnej ciało pływające zachowuje się wtedy, gdy środek jego masy przy zmianach postawy ciała nie podnosi się, ani nie opada, ciało zaś pozostaje w spoczynku. Pływająca kula lub walec (rys. 162) mogą służyć jako przykłady podobnego rodzaju równowagi.



Rys. 162.

206. Równowagę trwałą ciało pływające posiada wtedy, gdy po odchyleniu od położenia równowagi znów powraca do tego położenia. Jeżeli punkt K (rys. 163) oznacza przytem środek masy ciała, punkt zaś C — środek masy wypchniętej przez to ciało cieczy (albo tak zwany środek parcia), wówczas ciało przebywa w spoczynku wtedy, gdy ciężar oraz równa mu i wprost przeciwna siła parcia (P) cieczy działają na jednej linii pionowej. Po odchyleniu od tej postawy obie wspomniane siły P tworzą parę sił i wywołują ruch, obrotowy w takim kierunku, że ciało powraca do położenia równowagi. Linia pionowa, wyprowadzona z punktu C po odchyleniu ciała przecina poprzednią pionową w pewnym punkcie M , noszącym nazwę metacentrum. W danym przypadku punkt ten wypadł nad środkiem masy (K) ciała i taki właśnie warunek powinien być spełniony, aby ciało pływające miało zabezpieczoną równowagę stałą. Najłatwiej warunek ten można osiągnąć przez możliwe obniżenie środka masy (K). W tym to właśnie celu statki przed wypłynięciem na pełne morze powinny umieszczać na swym spodzie



Rys. 163.

Rys. 164.

znaczny balast, zabezpieczający je od przewrócenia się podczas kołysania na falach morskich.

207. O ile natomiast metacentrum M (rys. 164) po przechyleniu ciała wypada pod środkiem masy (K), powstająca wówczas para sił nie pozwala już ciału powrócić do pierwotnego położenia równowagi, lecz przewraca je zupełnie. Mamy wówczas do czynienia z równowagą *nietrwałą*, czyli *chwiejną*. Wszystkie trzy rodzaje równowagi można zilustrować zapomocą zanurzonej w wodzie próbówki szklanej, wypełnianej stopniowo rtęcią lub śrutem.

§ 23. Metody wyznaczania gęstości ciał.

208. Ponieważ gęstość lub ciężar właściwy względny otrzymuje się ze stosunku masy lub ciężaru ciała danego do masy lub ciężaru wody w tej samej objętości (§ 1, art. 22), można więc obie te wielkości wyznaczać zapomocą prawa Archimedesesa, używając do tego celu opisanej w poprzednim § wagi hydrostatycznej.

Aby wyznaczyć, na przykład, ciężar właściwy ciała stałego cięższego od wody, wystarczy zawiesić to ciało pod talerzykiem C (rys. 160), znaleźć jego ciężar (p) w powietrzu, a następnie stratę (q) ciężaru tego ciała po zanurzeniu w czystej wodzie. Oczywiście, że poszukiwany ciężar właściwy (s) będzie wówczas wyrażony stosunkiem:

$$s = \frac{p}{q}.$$

209. Jeżeli ciało badane jest lżejsze od wody, wówczas, oznaczwszy ciężar (p) tego ciała w powietrzu, należy zawiesić pod niem kawałek ciała cięższego od wody, np., miedzi lub ołowiu. Po zrównoważeniu przyrządu należy zanurzyć w wodzie najpierw oba zawieszone ciała, a następnie tylko dolne dodatkowe, oznaczając odpowiednie straty (q_1 i q_2) ciężarów tych ciał po zanurzeniu. Oczywiście, że ilość wody, wypchniętej przez ciało badane, wynosi wówczas: $q_1 - q_2$, jego zaś ciężar właściwy:

$$s = \frac{p}{q_1 - q_2}.$$

210. Jeżeli wypada oznaczyć ciężar właściwy ciała łatwo rozpuszczalnego w wodzie, np., cukru lub soli kuchennej, wówczas, po znalezieniu ciężaru (p) ciała w powietrzu, należy zanurzyć je w cieczy o wiadomym ciężarze właściwym (s'), w której to ciało nie rozpuszcza się. Strata (q) ciężaru w tej cieczy pozwoli naówczas znaleźć objętość (v) ciała z wzoru:

$$v = \frac{q}{s'};$$

ciężar zaś właściwy z wzoru:

$$s = \frac{p}{v} = \frac{p}{q} \cdot s'.$$

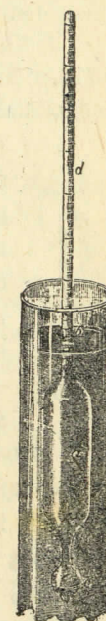
211. Aby wyznaczyć wreszcie ciężar właściwy cieczy, wystarczy uczepić do wagi i zrównoważyć ciężarek, który tonie i nie rozpuszcza się zarówno w tej cieczy, jak i w wodzie. Oznaczając straty jego ciężaru odpowiednio: w cieczy badanej przez q_1 i w wodzie przez q_2 , można ciężar właściwy (s) cieczy obliczyć z wzoru:

$$s = \frac{q_1}{q_2}.$$

212. Opisana metoda wymaga dość złożonych czynności i rachunków, wyniki zaś daje niezbyt dokładne. O wiele prostszymi w użyciu, jakkolwiek również niezbyt dokładnymi przyrządami, opartymi na tej samej zasadzie, są tak zwane areometry. Areometr (rys. 165) składa się zwykle z pustej wewnątrz bańki a , która w celu nadania przyrządowi równowagi trwałej (§ 22, art. 205) po zanurzeniu, obciążona jest u dołu w kulce c pewną ilością ołowiu lub rtęci. U góry przyrząd zaopatrzony jest w wąską rurkę lub sztabkę (d) ze skalą, której podziałka odpowiada celowi, do jakiego przeznaczony jest areometr. Skala areometru absolutnego wskazuje na poziomie cieczy wprost jej gęstość czy ciężar właściwy. Ponieważ każdorazowo po zanurzeniu ciężar całego areometru równy jest ciężarowi cieczy, wypchniętej przez zanurzoną część przyrządu, zatem areometr zanurza się w cieczy tem głębiej, im ciecz ta jest lżejsza i rzadsza, odpowiednio zaś mniej zanurza się w cieczach cięższych i gęstszych.

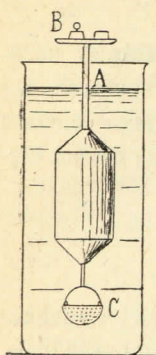
Prócz mierzenia gęstości areometry używane są niekiedy do oznaczania procentowej zawartości pewnych substancyj, rozpuszczonych w cieczy badanej, np., cukru, alkoholu, tłuszczu i t. p.; noszą one wówczas różne specjalne nazwy: sacharometrów czyli cukromierzy (do oznaczania procentowej zawartości cukru), alkoholometrów (do spirytusu), laktometrów (do mleka) i t. p.

213. Istnieją również areometry, pozwalające oznaczać ciężar właściwy nie tylko cieczy, lecz i ciał stałych. Do tego rodzaju przyrządów należy areometr Nicholsona (rys. 166). Areometr ten po zanurzeniu wypycha zawsze tę samą objętość cieczy do pewnej kreski na szyjce A . Wyznaczwszy ciężar (p) pewnego ciała stałego, należy umieścić je obok niezbędnej ilości odważników na szalce (B) areometru,



Rys. 165.

zanurzonego do kreski A w wodzie, następnie zaś przenieść ciało badane do siatki (C) w dolnej części przyrządu i wyznaczyć zapomocą odważników dodatkowych ilość (q) wypchniętej przez to ciało wody. Ciężar właściwy (s) ciała wypadnie wówczas z wzoru: $s = \frac{p}{q}$.



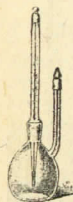
Rys. 166.

Do wyznaczenia ciężaru właściwego cieczy wystarczy znaleźć ciężar całego areometru wraz z odważnikami zanurzonego do kreski A w cieczy badanej (ciężar p_1), oraz w wodzie (ciężar p_2). Wówczas poszukiwany ciężar właściwy:

$$s = \frac{p_1}{p_2}$$

Areometr Nicholsona jest przyrządem również niezbyt dokładnym, jak i poprzednie.

214. Najdokładniejsza metoda wyznaczania gęstości i ciężaru właściwego ciał polega na użyciu tak zwanego piknometru. Jest to (rys. 167) mała bańka szklana o wiadomej i bardzo dokładnie wymierzonej pojemności, którą wskazuje kreska na wąskiej szyjce włoskowatej. Aby przy wykonywaniu pomiaru można było nie uwzględniać rozszerzalności pod wpływem ciepła, przyrząd zaopatrzony jest zwykle w termometr, pozwalający doprowadzać zawartość bańki do pewnej określonej temperatury (zwykle 15°C).



Rys. 167.

W celu wyznaczenia zapomocą piknometru ciężaru właściwego ciała stałego, trzeba napęlić przyrząd do wskazanej kreski czystą wodą i zważyć go (ciężar p_1); następnie należy umieścić obok na tej samej szalce wagi pewną ilość ciała badanego w drobnych kawałkach i zważyć ponownie (ciężar p_2). Zdjąwszy piknometr z wagi, należy całą odważoną ilość ciała badanego wrzucić do bańki, doprowadzić w niej poziom wody znów do wskazanej kreski, zapomocą bibuły osuszyć wewnątrz i nazewnątrz i zważyć po raz trzeci (ciężar p_3). Ciężar ciała badanego jest wówczas równy różnicy ciężarów: $p_2 - p_1$, ciężar zaś wypchniętej wody—różnicy: $p_2 - p_3$, a w takim razie ciężar właściwy (s) ciała badanego wypadnie z wzoru:

$$s = \frac{p_2 - p_1}{p_2 - p_3}$$

W celu oznaczenia gęstości cieczy należy zważyć piknometr pusty (ciężar p_1), potem napęlniony do kreski najpierw cieczą badaną (ciężar p_2) i wreszcie wodą (ciężar p_3). Wówczas ciężar właściwy (s) cieczy badanej otrzymamy z wzoru: $s = \frac{p_2 - p_1}{p_3 - p_1}$.

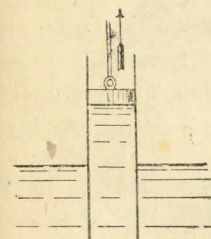
MECHANIKA GAZÓW.

(AEROMECHANIKA).

§ 24. Ciśnienie atmosferyczne. Barometry.

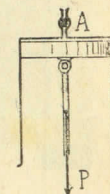
215. Najbardziej rozpowszechnionem i znanem ciałem gazowym jest powietrze, rozpościerające się nad powierzchnią ziemi warstwą o grubości prawdopodobnie 200 — 300 km, zwaną atmosferą. Jako ciało ciężkie, powietrze atmosferyczne poddane jest, również jak i ciecz, w całej swej masie ciśnieniu hydrostatycznemu, pochodzącemu od ciężaru wyżej położonych warstw atmosfery. W warstwach dolnych, w pobliżu powierzchni ziemi ciśnienie to jest największe; zwiemy je tam prosto ciśnieniem atmosfery. Przez długi czas jednak nie mogło być ono ani dostrzeżone, ani wymierzone.

Że powietrze, jako ciało materialne, posiada ciężar, o tem starano się przekonać jeszcze w starożytności. Arystoteles ważył niegdyś w tym celu worek, wydęty powietrzem, a następnie zmięty. Naturalnie, że ciężaru powietrza w ten sposób nie można było wyznaczyć, jak nie można, na przykład, zważyć wody w wodzie, a to ze względu na prawo Archimidesa (patrz mechanika cieczy § 22). Dopiero Galileusz w wieku XVII domyślił się ważyć powietrze w naczyniach sztywnych, z których usuwano powietrze zapomocą pompy.



Rys. 168.

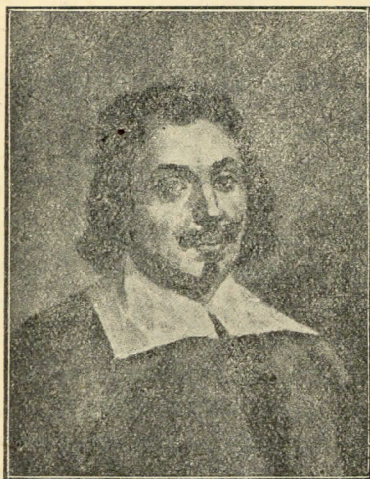
W związku z oznaczaniem ciężaru powietrza uczeni starożytni i średniowieczni usiłowali wytworzyć próżnię (vacuum) czyli przestrzeń, wolną od powietrza i wszelkiej wogóle materji. Gdy jednak wytwarzano taką próżnię pod tłokiem w rurze (rys. 168), zanurzonej w wodzie, okazało się, że woda wchodzi wówczas nieodłącznie za tłokiem do rury. Na widok tego zjawiska w umysłach owoczesnych badaczy naukowych powstało mniemanie, że przyroda posiada „lęk próżni” („horror vacui”). Galileusz, nie godząc się z tem mniemaniem, dowodził natomiast, że próżnia posiada wielką prężność, czego dowodem miał służyć opór sprężysty, jaki stawia tłok (rys. 169) przy wyciąganiu ze szczelnie zamkniętego walca. Po wpuszczeniu powietrza przez kran A opór ten znika natychmiast.



Rys. 169.

216. Dopiero w końcu wieku XVII włoski uczony Torricelli, uczeń Galileusza, pierwszy domyślił się, że przy otrzymywaniu próżni stawia opór prosto ciśnienie atmosfery. Torricelli nie tyl-

ko wykazał obecność tego ciśnienia, ale oznaczył jego wielkość zapomocą nader prostego przyrządu, zwanego barometrem. Przyrząd ten

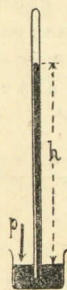


Torricelli.

(rys. 170) składa się z rurki szklanej długości około 1 m, zatopionej na jednym końcu. Po napełnieniu całkowicie rtęcią drugi koniec rurki zatyka się palcem i zanurza następnie do szklaneczki z rtęcią. W górnej części rurki tworzy się wówczas tak zwana „próżnia Torricelli'ego” (wypełniona tylko parą rtęci o znikomym małym ciśnieniu). Wielkość tej próżni można bez żadnego z jej strony oporu zmieniać przez większe lub mniejsze zanurzenie albo też nachylenie rurki barometrycznej.

Przy wszelkich zmianach wielkości próżni zachowuje się niezmiennie

na wysokość (h) górnego poziomu rtęci w rurce nad poziomem zewnętrznym, co oznacza, że ciężar zawartego w barometrze słupa rtęci zrównoważony jest wówczas siłą parcia, wynikającą z ciśnienia (p) atmosfery na zewnętrzny poziom rtęci.



217. Wysokość (h) słupa barometrycznego zmienia się nieznacznie, zależnie od stanu pogody oraz położenia danej miejscowości nad poziomem morza. Do pomiarów fizycznych i chemicznych przyjęto za *normalne ciśnienie atmosfery* które odpowiada wysokości:

$$h = 76 \text{ cm} = 760 \text{ mm}$$

Rys. 170. słupa rtęci w temperaturze 0°C ¹⁾.

Mając nadto wiadomy ciężar właściwy rtęci ($s = 13,6$), można łatwo obliczyć wielkość (p) tego ciśnienia na jednostkę powierzchni. Jest to mianowicie ciężar słupa rtęci o przekroju $= 1 \text{ cm}^2$ i wysokości: $h = 76 \text{ cm}$, wobec czego normalne ciśnienie atmosfery:

$$p = (1 \cdot h) \cdot s = (1 \cdot 76) \cdot 13,6 = 1033,6 \text{ Gr/cm}^2,$$

albo

$$p = 1,033 \text{ Kg/cm}^2,$$

w zaokrągleniu zaś:

$$p = 1 \text{ Kg/cm}^2.$$

¹⁾ Ciśnienie takie zwykle panuje na poziomie oceanów.

Ciśnienie tej wielkości zgodzono się wprost nazywać *atmosferą*, to znaczy, że w przybliżeniu:

$$1 \text{ atm} = 1 \text{ Kg/cm}^2.$$

W miarach angielskich, dość często używanych w technice, to samo ciśnienie odpowiada 15 funtom na 1 cal kwadratowy (symbolicznie 15 *℥.* na 1 *□''*).

Ciśnienie atmosferyczne jest więc bardzo duże; wszelkie jednak przedmioty, oraz organizmy zwierząt i roślin na ziemi znoszą to ciśnienie bez szwanku i przystosowują się do niego w zupełności dlatego, że działa ono *ze wszystkich stron*, na zewnątrz i wewnątrz. Sztuczne zmniejszenie tego ciśnienia w organizmach zwierząt może powodować niebezpieczne skutki, jak wytrysk krwi z naczyń krwionośnych na błonach śluzowych, wypadanie kości ze stawów i t. p.

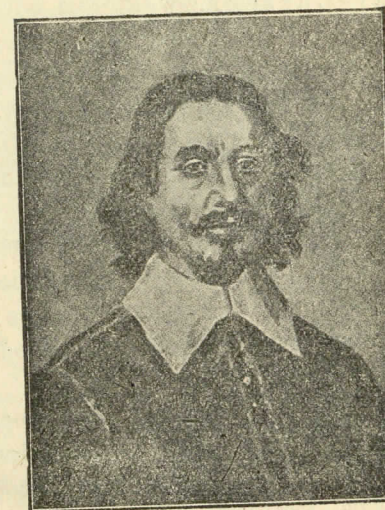
218. Barometry można budować, używając zamiast rtęci innych cieczy, nawet wody, wówczas jednak wysokość słupa barometrycznego zwiększa się w stosunku odwrotnym do gęstości użytej cieczy. Wobec tego, jeżeli normalne ciśnienie atmosfery odpowiada słupowi rtęci o wysokości $= 76 \text{ cm}$, słup wody, podtrzymywany tem samem ciśnieniem w barometrze, musiałby być 13,6 razy większy i wynosiłby:

$$H = 76 \cdot 13,6 = 10336 \text{ cm} = \\ = \text{około } 10 \text{ metrów!}$$

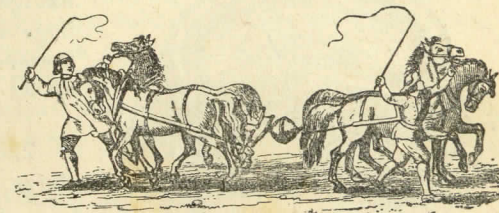
Oczywiście, że budowanie i obsługa takich wysokich barometrów wodnych nastroczałyby dużo trudności.

Słynny wynalazca z czasów średniowiecza Otto von Guericke z Magdeburga budował jednak takie barometry i przepowiadał z ich pomo-

cą zmiany stanu pogody. Ten niezwykle pomysłowy i zręczny eksperymentator wywoływał w swoim czasie powszechny podziw swemi doświadczeniami, opartymi głównie na zastosowaniu ciśnienia atmosfery. Do najbardziej efektownych należy niewątpliwie słynne doświadczenie

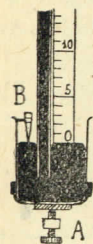


Otto von Guericke.



Rys. 171.

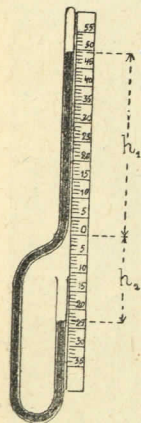
z „półkulami magdeburskimi” (rys. 171), które po wypompowaniu z nich powietrza trzymały się pod ciśnieniem atmosfery tak mocno, że mogły być oderwane od siebie dopiero wysiłkiem znacznej liczby koni.



Rys. 172.

219. Zwykły barometr Torricelli'ego (rys. 170) ma tę niedogodność, że wraz ze zmianą wysokości barometrycznej zmienia się również nieznacznie poziom rtęci w zbiorniku dolnym, co wpływa, oczywiście, na wskazania skali. W celu usunięcia tej niedogodności, Fortin zastosował w zbiorniku swego barometru (rys. 172) ruchome dno ze skóry, pozwalające zapomocą śrubki *A* i ostrza *B* z kości doprowadzać poziom rtęci w zbiorniku każdorazowo do punktu zerowego na skali. Koniec ostrza *B* dotyka wówczas końca swego obrazu na błyszczącej powierzchni rtęci.

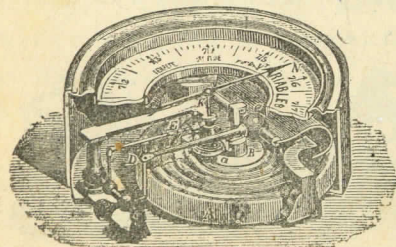
Również racjonalną konstrukcją odznacza się barometr lewarowy Gay-Lussac'a, w którym odczytywana na skali różnica *h* (rys. 173) wysokości poziomów składa się z dwóch części ($h = h_1 + h_2$), rachowanych od punktu zerowego 0 na skali do obydwóch poziomów górnego i dolnego.



Rys. 173.

Mniej dokładnymi, ale zato łatwo przenośnymi i dogodniejszymi w użyciu są barometry metalowe, tak zwane aneroidy. Barometr-aneroid (rys. 174) składa się z puszek metalowej *A*, szczelnie zamkniętej i dokładnie wypróżnionej z powietrza. Górna ściana puszek wykonana jest ze sprężystej sfałowanej blachy stalowej, która, zależnie od zmian ciśnienia zewnętrznego w atmosferze, zmienia nieznacznie swój kształt, poruszając przytem zapomocą odpowiedniego mechanizmu wskazówkę *N* względem okrągłej skali. Podziałka tej skali zwykle jest nacechowana podług wskazań dokładnego barometru rtęciowego, mierzonych w centymetrach lub milimetrach.

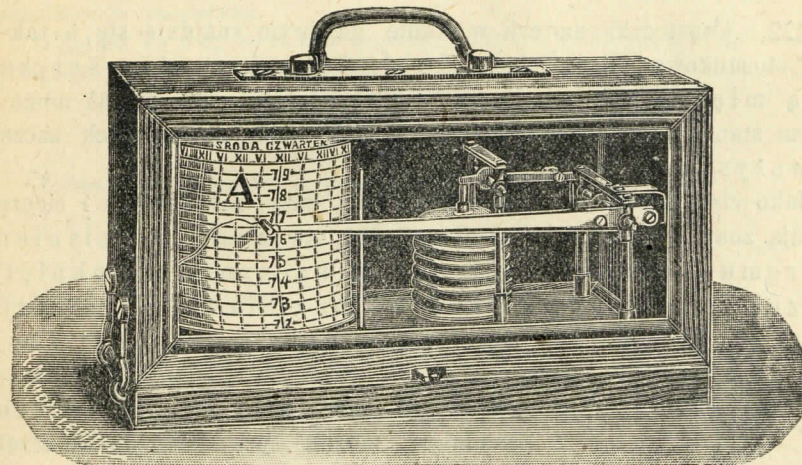
Barometr-aneroid zaopatrzony jest niekiedy w tak zw. barograf czyli przyrząd (rys. 175), zapisujący automatycznie zmiany ciśnienia z biegiem czasu za pośrednictwem mechanizmu dźwigniowego. Wykres ciśnienia otrzymuje się na powierzchni bębna *A*, poruszanego miarowo zapomocą mechanizmu zegarowego.



Rys. 174.

220. Ponieważ ciśnienie w atmosferze, również jak i w cieczach, zależne jest od głębokości pod poziomem swobodnym, przeto ze wskazań

barometru można w przybliżeniu oznaczać wysokość danego punktu obserwacyjnego względem poziomu morza lub powierzchni ziemi. Zapomocą barometru można więc orjentować się w przybliżeniu co do wysokości podczas wchodzenia na góry lub podczas wzlotów napowietrznych. Już Pascal obliczył w swoim czasie ¹⁾, że 10 metrom wzniesienia do góry odpowiada spadek ciśnienia barometrycznego około 1 milimetra słupa rtęci.



Rys. 175.

Ponieważ jednak w górnych warstwach powietrze staje się coraz rzadsze, wobec tego spadek ciśnienia odbywa się tam wolniej. Poczynając, naprzykład, od wysokości 5000 m, ciśnienie barometryczne co 10 m wzniesienia zmniejsza się już tylko o $\frac{1}{2}$ mm. Lotnicy podczas wzlotów zaopatrują się w tak zwane hypsometry, czyli przyrządy barometryczne, których skala wskazuje wprost wysokość wzniesienia nad powierzchnią ziemi.

221. Barometry są niezbędnymi przyrządami w pracowniach fizycznych i chemicznych, na stacjach meteorologicznych i t. p.

Zupełnie dokładny i miarodajny pomiar ciśnienia atmosfery wymaga następujących poprawek do wskazań barometru rtęciowego.

1-o) ze względu na rozszerzalność rtęci przy ogrzewaniu wysokość słupa barometrycznego zapomocą specjalnych tablic poprawia się odpowiednio do temperatury 0° Cels., uznanej za normalną;

2-o) wskazanie barometru sprowadza się zwykle do poziomu morza. W tym celu uwzględnia się wzniesienie danej miejscowości nad tym poziomem i oznacza się odpowiednią poprawkę z tablic hypsometrycznych;

¹⁾ Obliczenia te zostały sprawdzone doświadczalnie przez Periera, szwagra Pascala, podczas wchodzenia na górę Puy-de-Dôme we Francji w r. 1648.

3-o) powinna być uwzględniona ilość zawartej w danej chwili w powietrzu pary wodnej i oznaczone jej ciśnienie z tablic hygrometrycznych. Ciśnienie to należy odjąć od wskazania barometru;

4-o) jeżeli rurka barometryczna jest zbyt wąska, należy jeszcze uwzględnić poprawkę na tak zw. włoskowatość.

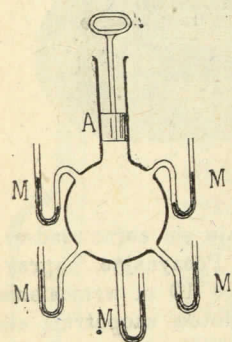
§ 25. Własności i prawa fizyczne, dotyczące gazów.

222. Cząsteczki materji w stanie gazowym znajdują się w tak dużych stosunkowo odległościach od siebie, że siły spójności zanikają między niemi prawie zupełnie, materja zaś może być w tym stanie przechowywana tylko w naczyniach, zamkniętych szczelnie ze wszystkich stron.

Jako ciała łatwo ruchliwe i sprężyste, gazy, również jak i ciecze ¹⁾, ulegają znanej *zasadzie Pascala* (§ 20), to znaczy, że ciśnienie, któremu poddany jest gaz w naczyniu, zamkniętem szczelnie ze wszystkich stron, udziela się jednostajnie

całej masie tego gazu, rozchodzi się jednakowo we wszelkich kierunkach i działa prostopadle (normalnie) do powierzchni.

Zasadę tę można sprawdzić doświadczalnie, wtłaczając albo wyciągając powietrze lub inny gaz z kuli (rys. 176) zapomocą tłoka *A*. Rurki manometryczne *M*, przytwierdzone w różnych miejscach kuli, wskazują wówczas wszędzie jednakowe zmiany ciśnienia.



Rys. 176.

223. Jeżeli w pewnej przestrzeni znajduje się mieszanina kilku gazów, wówczas ogólne ciśnienie, panujące w takiej mieszaninie, jak to wykazał fizyk angielski Dalton, jest równe sumie poszczególnych ciśnień, jakie każdy z gazów posiadałby, gdyby sam tylko wypełniał daną przestrzeń w tej samej temperaturze. Jest to tak zwane *prawo ciśnień cząstkowych*.

224. Gazy, również jak i ciecze, wywierają na każde zanurzone w nich ciało ciśnienie hydrostatyczne, to znaczy, że wszelkie ciało, zanurzone w gazie, również ulega prawu Archimedesasa, a więc traci pozornie na swym ciężarze tyle, ile waży wyparty przez nie gaz.

Wobec tego dokładne ważenie ciał w powietrzu wymaga pewnej poprawki, którą można wyznaczyć zapomocą następujących rozważań:

¹⁾ Gazy i ciecze nazywamy wogóle *plynami*.

Jeżeli pewne ciało jednorodne, posiadające objętość v_1 i ciężar właściwy s_1 , równoważy się podczas ważenia w powietrzu odważnikami, których ciężar wynosi p , objętość v_2 , a ciężar właściwy s_2 , wówczas, oznaczając poprawiony, czyli rzeczywisty ciężar ciała ważonego przez x , ciężar właściwy powietrza przez s_3 , można, z uwzględnieniem prawa Archimedesasa dla ciała ważonego i ciężarków, otrzymać równość:

$$x - v_1 s_3 = p - v_2 s_3,$$

gdzie $v_1 s_3$ i $v_2 s_3$ oznaczają odpowiednio straty ciężaru ciała ważonego i odważników w powietrzu.

Objętość v_1 i v_2 tych ciał można obliczyć z ich ciężaru (p) i ciężarów właściwych (s_1 i s_2) podług wzorów:

$$v_1 = \frac{p}{s_1}; \quad v_2 = \frac{p}{s_2}.$$

Wstawiając te wzory w poprzedniej równości, otrzymamy:

$$x - \frac{p s_3}{s_1} = p - \frac{p s_3}{s_2},$$

skąd już można obliczyć ciężar poprawiony:

$$x = p \left(1 - \frac{s_3}{s_2} + \frac{s_3}{s_1} \right).$$

Z otrzymanego wzoru widać, że poprawka przy ważeniu jest zbyteczna wtedy, gdy:

$$s_1 = s_2,$$

t. j. gdy ciało ważone ma tę samą gęstość, co i odważniki, wtedy bowiem zawsze wypadnie:

$$x = p.$$

225. Prawo Archimedesasa znajduje ważne zastosowanie praktyczne w aeronautyce czyli lotnictwie.

Jeżeli, na przykład, balon o objętości $= v$ wypełniony jest gazem o ciężarze właściwym (s), mniejszym niż ciężar właściwy (s') powietrza, wówczas ciężarowi (p) balonu wraz z całym jego ładunkiem i pasażerami przeciwdziała z dołu do góry siła parcia hydrostatycznego, odpowiadająca ciężarowi wypartego przez balon powietrza. Wypadkowa (R) obydwóch tych sił przedstawia siłę, unoszącą balon do góry. Siłę tę obliczymy z wzoru:

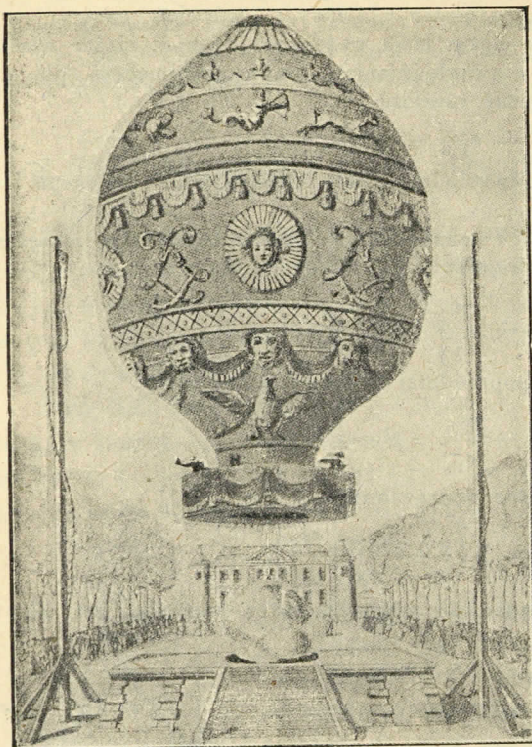
$$R = v s' - (v s + p).$$

Pierwsze balony były budowane we Francji w końcu wieku XVIII przez Charles'a i braci Montgolfier'ów (rys. 177). Prawdziwie jednak użytecznymi stały się balony dopiero wtedy, gdy zastosowano do nich silniki (motory) i stery. Pierwszy taki balon sterowy czyli aerostat zbudował inżynier francuski Santos-Dumont w roku 1900. Obecnie budowane są aerostaty dwóch typów: miękkie i sztywne. Do tych ostatnich należą słynne balony Zeppelina (rys. 178). Zawierają one szereg małych balonów w jednej wspólnej powłoce usztywnionej lekkim szkieletem z prętów alumi-

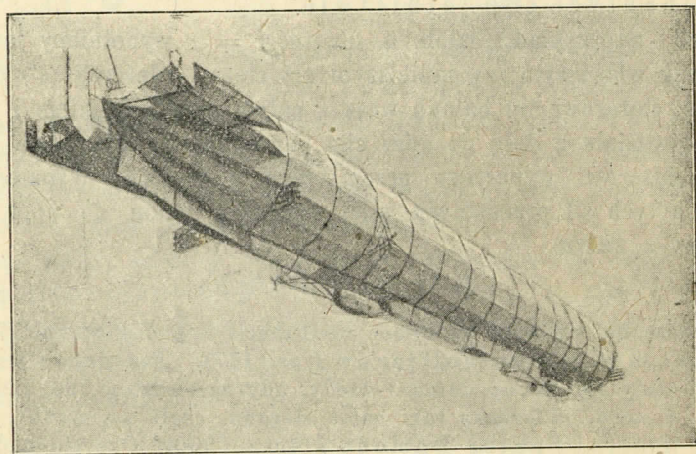
nowych. Do poruszania aerostatów używa się śmig (propellerów), pędzo-

nych zapomocą lekkich, ale silnych motorów benzynowych; kierowanie zaś uskutecznia się zapomocą ruchomych płaszczyzn sterowych, z których jedne służą, jako ster zwrotów, inne zaś—jako ster wysokości.

Jednocześnie z budową aerostatów pomysłowość ludzka wysila się w ostatnich czasach w kierunku budowania tak zwanych aeroplanów czyli samolotów. Po wielu niefortunnych i tragicznych próbach, sięgających dość odległych czasów, pierwszą udatną maszynę tego rodzaju zbudowali dwaj Amerykanie, bracia Wright¹⁾, w r. 1908. Samoloty nie posiadają balonów, utrzymują się zaś w powietrzu podczas ruchu dzięki odpowiedniej kombinacji

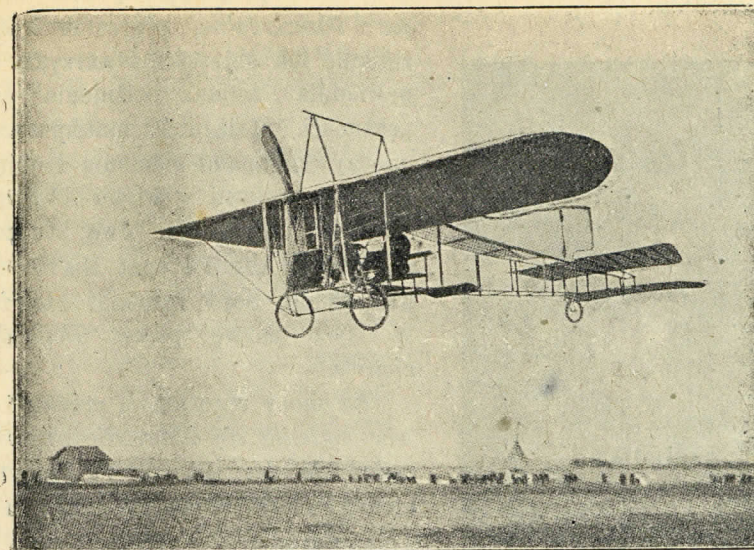


Rys. 177.

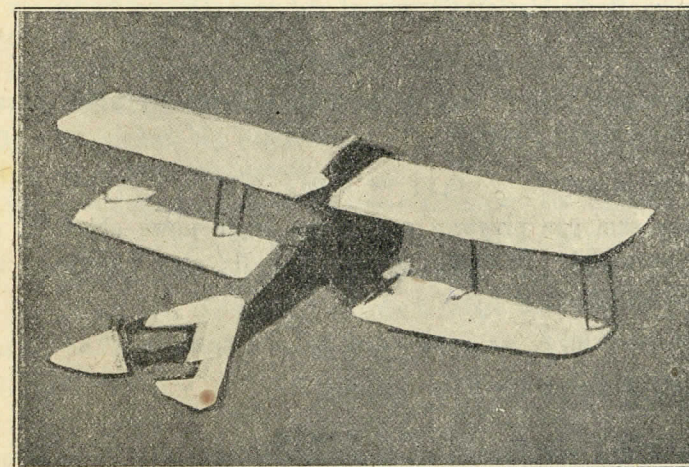


Rys. 178.

¹⁾ Czyt. Rajt.



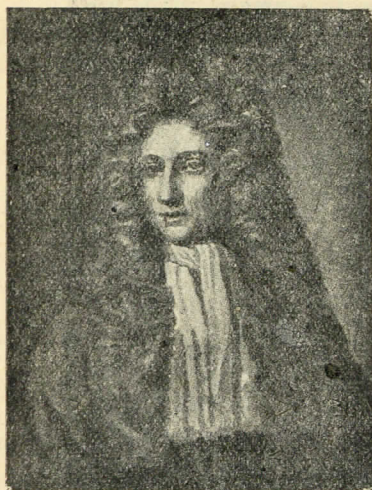
Rys. 179.



Rys. 180.

sztywnych płaszczyzn stabilizacyjnych (równoważących) i sterowych. Rozpowszechniły się przeważnie dwa typy aeroplanów: tak zwane jednoplątowce, czyli monoplany (rys. 179) i dwupłatowce, czyli biplany (rys. 180). Trudno dziś jeszcze orzec, który z tych dwóch typów ma przewagę pod względem użyteczności i sprawności, jakkolwiek najwspanialszych lotów dokonano przeważnie na jednoplątowcach.

226. W przeciwieństwie do cieczy, gazy są *łatwo ściśliwe i rozszerzalne*, przyczem każdej zmianie ich objętości towarzyszy odpowiednia zmiana ciśnienia czyli prężności. Zależność matematyczną między zmianami ciśnienia i objętości gazu wykryli w wieku XVII niezależnie od siebie dwaj uczeni: Boyle w Anglii i opat Mariotte we Francji, stąd zależność ta nosi w fizyce nazwę *prawa Boyle-Mariotte'a*.



Rob. Boyle.

Na mocy tego prawa *prężność gazów zmienia się odwrotnie-proporcjonalnie do objętości*, o ile przytem temperatura pozostaje niezmienną. Jeżeli oznaczmy przez: v_1 i v_2 początkową i końcową objętość gazu, przez p_1 i p_2 — odpowiednie do tych objętości ciśnienie tegoż gazu, wówczas prawo Boyle-Mariotte'a wyrazi się proporcją:

$$v_1 : v_2 = p_2 : p_1.$$

Przyrównywając zaś w tej proporcji iloczyn wyrazów skrajnych i średnich, otrzymamy równość:

$$v_1 p_1 = v_2 p_2.$$

Gdyby ten sam gaz przybrał w dalszym ciągu nowe objętości v_3 , v_4 i t. d. i odpowiednie ciśnienie p_3 , p_4 i t. d., otrzymalibyśmy szereg równych iloczynów:

$$v_1 p_1 = v_2 p_2 = v_3 p_3 = \text{i t. d.},$$

co da się ująć w jedną równość ogólną:

$$vp = \text{const.}$$

Równość ta oznacza, że przy niezmienniej temperaturze gazu *iloczyn z jego objętości przez prężność przy wszelkich zmianach obydwóch swych czynników pozostaje wielkością stałą*.

227. Prawo Boyle Mariotte'a można zilustrować i sprawdzić doświadczalnie zapomocą przyrządu (rys. 181), składającego się z dwóch rurek szklanych A i B , połączonych giętką rurką kauczukową i napełnionych w części rtęcią. Pomiedzy temi rurkami umieszczona jest skala z podziałką linjową. Rurka A posiada kran, pozwalający zamknąć

w niej pewną ilość powietrza lub innego gazu o objętości v w chwili, gdy na poziomach rtęci w obydwóch rurkach A i B panuje jednakowe ciśnienie atmosferyczne p (rys. 181, I). Ciśnienie to powinno być oznaczone z barometru rtęciowego, niezależnie od danego przyrządu.

Gdy po zamknięciu kranu na rurce A , rurka B zostanie uniesiona w górę, a objętość gazu, zamkniętego w rurce A , zostanie zmniejszona, np., o połowę ($\frac{1}{2} v$), poziom rtęci w rurce B (rys. 181, II) ustawi się wówczas względem poziomu dolnego na wysokości h_1 , odpowiadającej ciśnieniu atmosferycznemu w danej chwili. Oznacza to, że dwukrotnemu zmniejszeniu objętości gazu w rurce A odpowiada dwukrotne powiększenie jego prężności.

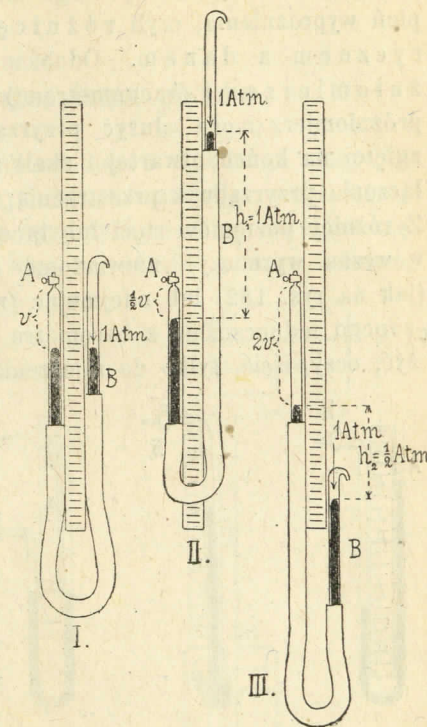
Przeciwnie, obniżając rurkę B o tyle, aby objętość gazu w rurce A zwiększyła się dwukrotnie (rys. 181, III), można się przekonać, że różnica wysokości poziomów rtęci odpowiada połowie ciśnienia barometrycznego, co oznacza, że prężność gazu w rurce A zmniejszyła się do połowy.

228. Ponieważ objętość gazu zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do jego gęstości, stąd wniosek, że prężność gazu zmienia się *wprost-proporcjonalnie* do jego gęstości, co wyrażamy proporcją:

$$p_1 : p_2 = d_1 : d_2,$$

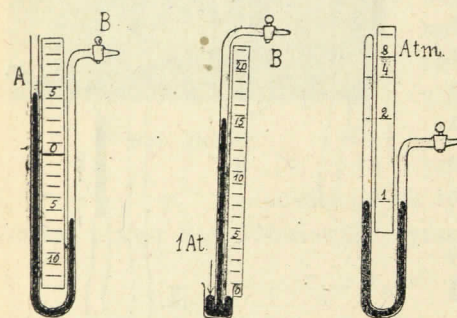
w której p_1 i p_2 oznaczają ciśnienie gazu początkowe i końcowe, d_1 i d_2 odpowiednie do tych ciśnień gęstości.

Badania eksperymentalne (doświadczalne), wykonane z niezwykłą pomysłowością i precyzją przez fizyka francuskiego Régnault'a na początku ubiegłego stulecia, wykazały, że prawo Boyle-Mariotte'a nie jest ściśle. W niskich, zwłaszcza, temperaturach i dużych ciśnieniach gazy, jak okazało się, ulegają innej, bardziej złożonej zależności matematycznej. W zwykłych jednak warunkach temperatury i ciśnienia prawo to można stosować do gazów z dostateczną dla praktyki dokładnością.



Rys. 181.

229. Do mierzenia ciśnień w cieczach i gazach używane są przyrządy, noszące ogólną nazwę *manometrów*. Niekiedy przy ciśnieniach mniejszych od atmosferycznego mierzy się nie samo ciśnienie, lecz stopień wypróżnienia, czyli różnicę między ciśnieniem atmosferycznym a danym. Odnosne przyrządy miernicze zowią się próżniomierzami (*vacuumetrami*) (rys. 183). Jako manometr i zarazem próżniomierz może służyć przyrząd (rys. 182), składający się z rurki zgiętej na końcu otwartej i skali z podziałką linjową. Kran *B* służy do łączenia przyrządu z przestrzenią, w której ma być oznaczone ciśnienie. Z różnicy poziomów rtęci lub innej cieczy w rurce manometru można wówczas wyznaczyć niewiadome ciśnienie, dodając otrzymaną różnicę (jak na rys. 182) lub odejmując (rys. 183) od ciśnienia atmosfery, oznaczonego jednocześnie z barometru. Przyrządy w tej postaci mogą służyć, oczywiście, tylko do mierzenia ciśnień nieznacznych (do 2—3 Atm.),

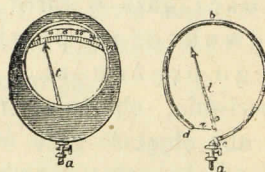


Rys. 182.

Rys. 183.

Rys. 184.

przy dużych bowiem ciśnieniach rurki manometryczne wypadłyby zbyt wysokie i niedogodne w użyciu.



Rys. 185.

Do mierzenia ciśnień dużych używane są manometry gazowe zakryte (rys. 184), oparte na prawie Boyle-Mariotte'a. W zamkniętej części rurki nad rtęcią znajduje się pewna ilość powietrza, którego objętość pierwotna (oznaczona na skali liczbą 1) odpowiada ciśnieniu 1 Atm. Pod ciśnieniem zaś 2, 3, 4 i t. d. atmosfer objętość powietrza w rurce zmienia się w stosunku odwrotnym do ciśnienia; wynosi więc dla 2 Atm. $\frac{1}{2}$ pierwotnej swej wielkości, dla 3 Atm. $\frac{1}{3}$, dla 4 Atm. $\frac{1}{4}$ i t. d., co się zaznacza odpowiednio kreskami na skali przyrządu.

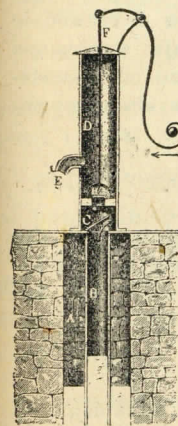
W technice do mierzenia ciśnień wysokich używane są manometry błonowe, nakształt aneroidów (rys. 174) albo sprężynowe. Manometr sprężynowy Bourdon'a (rys. 185) zawiera sprężystą rurkę metalową, wewnątrz pustą, którą zapomocą kranu łączy się z naczyniem (np. z kotłem parowym), gdzie ma być oznaczone ciśnienie. Zależnie od wielkości tego ciśnienia, rurka manometryczna zmienia odpowiednio swoją krzywiznę, ruchy zaś jej wolnego końca mogą być zapomocą odpowie-

dniego mechanizmu i wskazówki notowane na skali. Podziałka tej skali zwykle nacechowana jest w atmosferach lub funtach angielskich na 1 cal kwadratowy.

§ 26. Przyrządy do przesyłania płynów.

230. Pompy. Do przesyłania cieczy lub gazów z jednego zbiornika do drugiego używa się pomp, wprawianych w ruch energią mechaniczną. W technice i przemyśle znane są liczne typy tych machin, różniące się konstrukcją i sposobem działania. Są więc w użyciu pompy tłokowe, odśrodkowe (centryfugalne), rotacyjne, pistonowe i inne. Najpospolitszymi z pośród nich są pompy tłokowe.

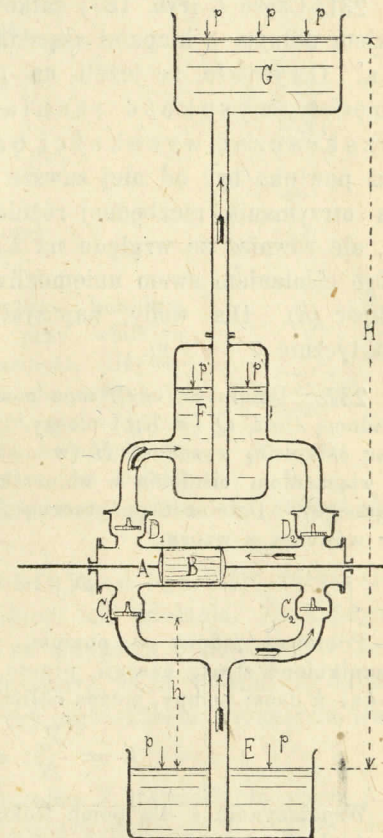
Prostej budowy pompa ręczna (rys. 186) składa się z tłoka, poruszanego zapomocą dźwigni w walcu tam i z powrotem. Podczas podnoszenia tłoka ciśnienie pod nim zmniejsza się, wskutek czego ciecz, pod przeważającym działaniem zewnętrznego ciśnienia atmosfery, wchodzi do rury *B*, otwiera tak zwaną klapę ssącą *C* i dostaje się do walca. Podczas odwrotnego ruchu tłoka klapa ssąca *C* zapada, otwiera się zaś klapa tłocząca *H*, poczem ciecz przez rurę *E* wychodzi z pompy na zewnątrz.



Rys. 186.

Rysunek 187 wyobraża pompę ssąco-tłoczącą o działaniu podwójnem. Obok tłoka *B*, poruszającego się tam i z powrotem w walcu *A*, czynne są

naprzemian 2 pary klap, z których klapki C_1 i C_2 są ssące, klapki zaś D_1 i D_2 —tłoczące. Dzięki takiej konstrukcji ssanie i tłoczenie odbywa się jednocześnie za każdym ruchem tłoka, to z jednej strony, to z drugiej, co zwiększa wydajność pompy i czyni spokojniejszym wypływ



Rys. 187.

cieczy z rury tłoczącej. W celu osiągnięcia jeszcze bardziej równomiernego wypływu, do pompy dodaje się tak zwany powietrznik (F), w którym pewna ilość sprężonego powietrza podtrzymuje niezmiennie ciśnienie na poziomie cieczy. Z powietrznika ciecz dostaje się do górnego zbiornika G , przyczem pompa musi wytwarzać siłę, niezbędną do pokonania ciśnienia słupa cieczy o wysokości H (rys. 187). Prócz ciśnienia hydrostatycznego, odpowiadającego różnicy poziomów (H) pomiędzy zbiornikami górnym (G) a dolnym (E), pompa musi niekiedy pokonywać ciśnienie, panujące w zbiorniku G , gdy jest zamknięty. Przypadek ten zachodzi, np., podczas zasilania wodą kotłów parowych, pras hydraulicznych i t. p.

231. Część h (rys. 187) całkowitej różnicy poziomów pomiędzy zbiornikiem dolnym a klapami ssącymi stanowi tak zwaną wysokość ssania. Oczywiście, że jeżeli na poziomie naczynia E działa ciśnienie atmosfery, wysokość ssania (h) w żadnym razie nie może przekraczać wysokości barometrycznej (np. dla wody 10 m.), lecz powinna być od niej zawsze mniejsza. Jest to konieczne nie tylko dla otrzymania niezbędnej różnicy ciśnień nazewnątrz i wewnątrz pompy, ale również ze względu na obecność w cieczy pary i gazów, które ciśnieniem swym uniemożliwiają wessanie cieczy na zbyt dużą wysokość (h). Dla wody, na przykład, wysokość ta nie może przekraczać praktycznie 7 — 8 m.

232. Dzielność, czyli moc mechaniczną pompy można obliczyć, mając wiadomą ilość Q (w Kg.) cieczy, przesyłanej przez pompę w 1 sekundzie oraz całkowitą wysokość H (w metrach), na którą ciecz zostaje wyniesiona (z włączeniem ciśnienia w zbiorniku G , jeżeli jest ono większe od atmosferycznego). Dzielność pożyteczną N_0 pompy w koniach parowych otrzymamy wówczas z wzoru:

$$N_0 = \frac{QH}{75} \text{ (H.P.)}.$$

Ponieważ jednak w pompie, jak w każdej wogóle machinie, zachodzą nieuniknione straty energii, przeto, mając wiadomy współczynnik wydajności k danej pompy, można obliczyć jej dzielność całkowitą N z równości:

$$k = \frac{N_0}{N}; \text{ stąd: } N = \frac{N_0}{k}.$$

Współczynnik k dla pomp tłokowych wynosi od 0,5 do 0,75, zależnie od konstrukcji, obsługi, stopnia zużycia pompy i t. d.

233. Pompy tłokowe używane są również do przesyłania gazów, zwłaszcza powietrza (tak zwane pompy pneumatyczne). Budową swą przypominają poprzednie, tylko kłapy posiadają lżejsze i lepiej uszczelnione. Wyróżniamy dwa zasadnicze typy pomp pneumatycznych: tłoczące (tak zw. kompresory) i wypróżniające (aspiratory).

Rysunek 188 wyobraża pompę tłoczącą. W połączeniu ze zbiornikiem o objętości V pompa ta za każdym podwójnym ruchem swego tłoka wsysa z zewnątrz, a następnie wtłacza do zbiornika pewną ilość powietrza o objętości v . Objętość ta zawarta jest między klapami ssącą i tłoczącą w chwili największego wysunięcia tłoka w walcu.

Stosując prawo Boyle-Mariotte'a, można obliczyć ciśnienie (p_n), jakie wytworzy się w zbiorniku V po wykonaniu n podwójnych ruchów tłoka, jeżeli pierwotnie w zbiorniku tym i nazewnątrz panowało ciśnienie atmosferyczne p_0 . Przyrównywywając iloczyny z objętości przez ciśnienie powietrza przed wtłoczeniem:

$$(V + nv) \cdot p_0$$

i po wtłoczeniu do zbiornika:

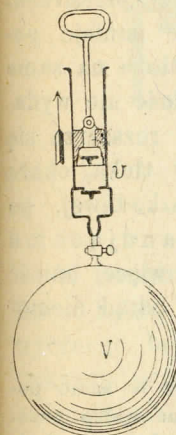
$$V \cdot p_n,$$

otrzymamy równanie:

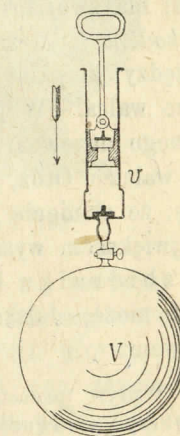
$$(V + nv)p_0 = Vp_n;$$

skąd ciśnienie końcowe:

$$p_n = \frac{p_0(V + nv)}{V}.$$



Rys. 188.



Rys. 189.

Kompresory pneumatyczne znajdują zastosowanie w hutnictwie przy wielkich piecach i stalowniach Bessemera. Używane są nadto w kotłarniach do nitowania blachy kotłowej, do robót podwodnych w dzwonach nurkowych i kesonach, do uszczelniania opon gumowych na kołach welocypedów i samochodów, do skraplania gazów, nasycania wód gazami, do poczt i kolei pneumatycznych i t. p.

234. Pompy pneumatyczne wypróżniające (rys. 189) różnią się od poprzednich położeniem kłap i kierunkiem ich działania. Za każdym podwójnym ruchem tłoka takiej pompy ze zbiornika o objętości V zostaje wessana, a następnie wydaloną nazewnątrz ilość powietrza, odpowiadająca objętości (v) między klapami przy największym wysunięciu tłoka w walcu.

Oznaczając ciśnienie pierwotne w zbiorniku V i atmosferze przez p_0 , ciśnienie zaś w zbiorniku po wykonaniu kolejnych podwójnych ruchów tłoka odpowiednio przez $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$, można, na zasadzie prawa Boyle-Mariotte'a, ułożyć szereg równości:

$$Vp_0 = (V + v)p_1;$$

$$Vp_1 = (V + v)p_2;$$

$$Vp_2 = (V + v)p_3;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$Vp_{n-1} = (V + v)p_n.$$

Mnożąc te równości przez siebie stronami i skracając, otrzymamy:

$$V^n p_0 = (V + v)^n p_n.$$

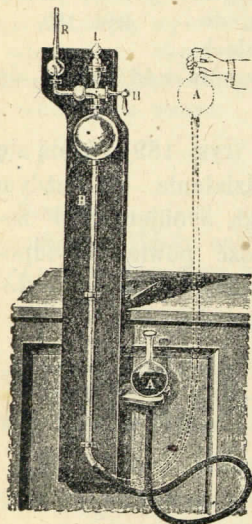
Skąd ciśnienie końcowe (p_n) wypadnie według wzoru:

$$p_n = p_0 \left(\frac{V}{V+v} \right)^n.$$

Ponieważ $V < V + v$, teoretycznie więc przy $n = \infty$, czyli po wykonaniu nieskończonej wielkiej ilości ruchów tłoka, ciśnienie końcowe (p_n) w zbiorniku V spadnie do zera, czyli będzie wówczas osiągnięte zupełne wypróżnienie tego zbiornika.

235. Praktycznie jednak wypróżnianie zapomocą pompy tłokowej ma swój kres, wynikający wskutek istnienia tak zwanej *przestrzeni szkodliwej*. Jest to, mianowicie, przestrzeń, która zawsze istnieje pomiędzy klapami pompy nawet po zupełnym wsunięciu tłoka na samo dno walca. W przestrzeni tej zawsze pozostaje pewna ilość nie wydalonego nazewnątrz powietrza, które przy wysuwaniu tłoka rozszerza się w walcu. Otóż, jeżeli po wykonaniu pewnej ilości ruchów tłoka, okaże się, że ciśnienie powietrza, pochodzącego z przestrzeni szkodliwej, po największym wysunięciu tłoka dorówna ciśnieniu, panującemu w zbiorniku V (rys. 189), kłapa ssąca (dolna) już się więcej unieść nie może, dalsze zaś wypróżnianie zbiornika V staje się odtąd niemożliwym.

Wpływ przestrzeni szkodliwej można zmniejszyć, a przez to samo powiększyć sprawność pompy wtedy, gdy po dojściu tłoka do dna walca przestrzeń szkodliwa, zapomocą odpowiedniego kanałku, zostanie na krótką chwilę połączona z wnętrzem zbiornika V . Najdoskonalsze pompy tłokowe wypróżniające nie pozwalają mimo to osiągnąć rozrzedzenia poniżej 3 mm. słupa rtęci. Lepsze wypróżnienie udaje się osiągnąć tylko zapomocą pomp rtęciowych.

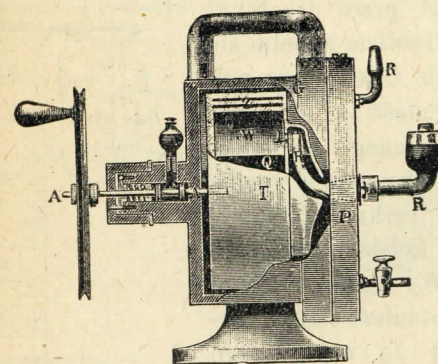


Rys. 190.

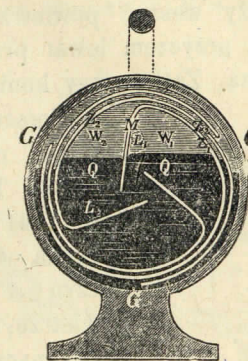
Tym sposobem może być osiągnięte wypróżnienie, dochodzące do $\frac{1}{2}$ mm. słupa

rtęci, jakie stosuje się, np., w tak zwanych, bańkach Geisslera, żarówkach elektrycznych i t. p.

Znacznie większą pomysłowością i dokładnością działania odznacza się pompa rtęciowo-rotacyjna Gaedego (rys. 191 i 192).



Rys. 191.



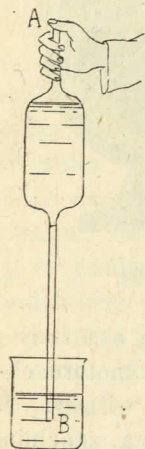
Rys. 192.

W naczyniu okrągłym G z żelaza lanego znajduje się osadzony na osi A bęben porcelanowy T . Zapomocą korby ręcznej lub motoru elektrycznego bęben ten zostaje wprowadzony w szybki ruch wirowy. Jak wskazuje przekrój poprzeczny pompy na rys. 192, jest ona wypełniona wewnątrz do $\frac{2}{3}$ wysokości rtęcią, porcelanowy zaś bęben podzielony jest na 3 komory osobliwego kształtu W_1 , W_2 i W_3 , połączone kanałami krzywymi z wnętrzem naczynia G . Prócz tego każda z komór posiada otwór okrągły L , łączący ją, jak wskazuje rys. 191, z rurką zewnętrzną R , połączoną z naczyniem wypróżnianym. Podczas obracania się bębna w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara (rys. 192) zawartość komory W_1 stopniowo się powiększa, a komora ta wypełnia się powietrzem lub innym gazem, wessanym z rurki R . Z sąsiedniej komory W_2 wessany uprzednio gaz zostaje wydany stopniowo i całkowicie do naczynia G , skąd następnie wydostaje się nazewnątrz przez rurkę R' . Pompa ta pozwala osiągać rozrzedzenie do paru stutysięcznych milimetra słupka rtęci.

Bardziej dokładne wypróżnienie może być osiągnięte wtedy, gdy po wypróżnieniu zapomocą pompy rtęciowej, wnętrze naczynia zostanie połączone z innym, również dobrze odpowietrzonym naczyniem, zawierającym czysty węgiel drzewny. Węgiel energicznie pochłania wówczas pozostałe resztki powietrza, zwłaszcza, jeżeli jest przytem silnie oziębiony (np. przez zanurzenie przyrządu w płynnym powietrzu). W ten sposób wypróżniane są tak zwane bańki Crookes'a, Röntgena i t. p.

237. Lewary. Pod taką nazwą znane są przyrządy, służące do przenoszenia lub przesyłania cieczy z jednego naczynia do drugiego bez pomocy silników mechanicznych.

Lewar prosty (pipetka) (rys. 193) jest to rurka, rozszerzona w jednym miejscu. Zanurzając koniec *B* tej rurki do naczynia z cieczą, należy wessać powietrze ustami przez drugi koniec, przyczem lewar prawie całkowicie napełni się cieczą. Zatknąwszy koniec *A* lub *B* szczelnie palcem, można przenieść i wypuścić wessaną ciecz do innego naczynia.



Rys. 193.

238. Lewar krzywy (syfon) (rys. 194) stanowi rurka zgięta, zanurzona otwartymi końcami do dwóch naczyń *A* i *B*. Wyciągając ustami powietrze, można podnieść ciecz z górnego naczynia *A* do najwyższego punktu *C* rurki, a gdy słup cieczy przekroczy ten punkt i zniży się poza poziom naczynia *A*, rozpoczyna się od tej chwili nieprzerwany przepływ z naczynia *A* do *B*. Można obliczyć ciśnienie, powodujące ten ruch cieczy w najwyższym punkcie *C* rurki syfonowej. Od strony naczynia *A* działa tam wówczas ciśnienie p_1 , równe różnicy między ciśnieniem p atmosfery a ciśnieniem hydrostatycznym słupa cieczy o wysokości h_1 , czyli:

$$p_1 = p - h_1.$$

W ten sam sposób obliczymy ciśnienie p_2 od strony naczynia *B*, mianowicie:

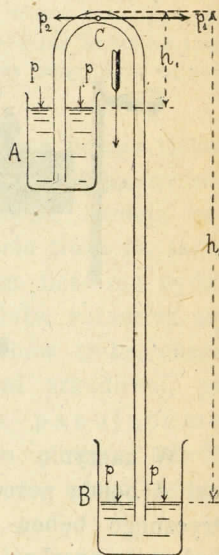
$$p_2 = p - h_2;$$

a w takim razie ciśnienie wypadkowe p_0 , działające w punkcie *C* w kierunku od *A* do *B*, obliczy się, jako różnica:

$$p_0 = p_1 - p_2 = h_2 - h_1.$$

Z wzoru tego widzimy, że ciśnienie (p_0), powodujące ruch cieczy w lewarze, mierzy się różnicą wysokości poziomów w naczyniach *A* i *B*. Z chwilą, gdy ta różnica schodzi do zera, działanie lewaru ustaje.

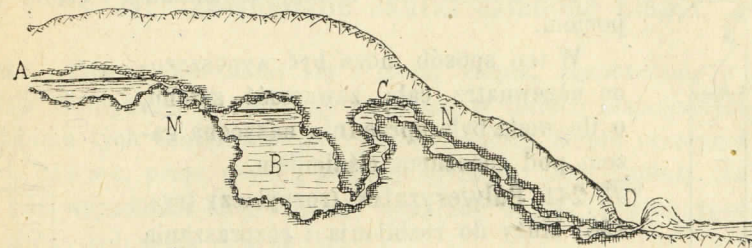
Że w najwyższym punkcie *C* rurki panuje ciśnienie mniejsze od atmosferycznego, o tem można się przekonać, robiąc w tem



Rys. 194.

miejsu rurki otwór. Powietrze atmosferyczne dostaje się wówczas do lewaru, rozrywa słup cieczy i uniemożliwia jej przepływ w rurce.

Działaniem lewaru krzywego można wytłumaczyć zjawisko tak zwanych źródeł perjodycznych, z których woda wytryska z pewnemi regularnemi przerwami. Zjawisko tłumaczymy w ten sposób, że w głębi ziemi (rys. 195) tworzy się wówczas lewar krzywy *BCD*, łączący wodozbiór *B* z wylotem *D* źródła.

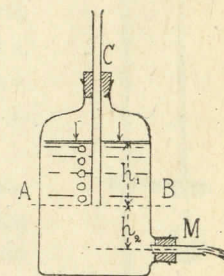


Rys. 195.

Dopóki wodozbiór *B* z wolna napełnia się wodą, przesączającą się z wyżej położonego wodozbioru *A*, dopóty źródło jest nieczynne; staje się zaś na pewien czas czynnem z chwilą, gdy poziom *MN* w wodozbiorze *B* dosięga najwyższego punktu *C* lewaru. Następuje wówczas nieprzerwany odpływ wody ze źródła aż do chwili, gdy zbiornik *B* opróżni się, słup zaś wody w lewarze ulegnie rozerwaniu. Następuje potem znów pewna przerwa, dopóki nie napełni się wodozbiór *B* i t. d.

239. Flaszka Mariotte'a. Jest to przyrząd do utrzymywania stałej prędkości wypływu cieczy. Do zwykłej flaszki (rys. 196), napełnionej cieczą i posiadającej u dołu otwór *M*, wprowadza się u góry przez szczelny korek rurkę *C*, otwartą na obu końcach.

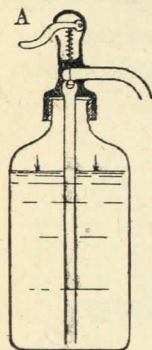
Podczas wypływu z naczynia w dolnym końcu tej rurki oraz na całym poziomie *AB* wewnątrz cieczy ustala się ciśnienie równe atmosferycznemu. Ciśnienie to przedstawia w każdej chwili sumę: ciśnienia hydrostatycznego (h_1) cieczy oraz ciśnienia powietrza w górnej części flaszki, dokąd powietrze to dostaje się stopniowo przez dolny koniec rurki *C* w postaci baniek w miarę, jak się zmniejsza wysokość h_1 . Wypływ z otworu *M* naczynia odbywa się w tych warunkach pod stałym ciśnieniem hydrostatycznym, odpowiadającym wysokości (h_2) poziomu *AB* nad otworem *M*. Wysokość tę, a więc i prędkość wypływu można przytem dowolnie zmieniać, wsuwając więcej lub mniej rurkę *C*. Wypływ można nawet zu-



Rys. 196.

pełnie powstrzymać, zanurzając dolny koniec rurki *C* poniżej otworu *M*.

240. Bania Herona. Przyrząd ten w rozmaitych odmianach używany jest w wodotryskach, pompach i t. p. Zwykły syfon (rys. 197) do wód gazowych jest również odmianą bani Herona, która działa w ten sposób, że po naciśnięciu małej dźwigni *A* i otwarciu klapki, woda wypływa z syfonu pod ciśnieniem gazu, który wydziela się z niej nieustannie i ciśnię na jej poziom.



Rys. 197.

W ten sposób może być wypuszczona nazewnątrz cała zawartość syfonu, o ile woda była uprzednio nasycona gazem pod znacznym ciśnieniem.

241. Pulweryzator (rozpylacz) (rys. 198) służy do rozbijania i rozpraszania strugi płynnej zapomocą silnego prądu powietrza lub pary, wdmuchiwanej przez rurkę *AB*. W pobliżu otworu (*B*) rur-



Rys. 198.

ki (*BC*), zanurzonej w cieczy, tworzy się wówczas rozrzedzenie, wskutek czego ciecz podnosi się w rurce i zostaje porwana prądem powietrza, wychodzącego z *AB*. W podobny sposób funkcjonują tak zwane smoczki wodne (aspiratory), służące do wyciągania powietrza zapomocą silnego strumienia wody lub rtęci.

NAUKA O CIEPLE.

(KALORYKA).

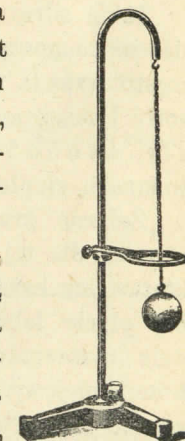
§ 27. Zewnętrzne skutki działania ciepła.

242. Zanim zapoznamy się z istotą ciepła, rozpatrzmy w szeregu zjawisk zewnętrzne skutki jego działania w ciałach materialnych. Przy rozważaniu tych skutków w pewnych wypadkach ciepło oceniamy tylko jakościowo, przez pewien stopień ogrzania, czyli ciepłoty ciał, w innych zaś wypadkach ciepło należy oznaczać ilościowo, używając odpowiednich jednostek mierniczych.

W związku ze zmianą ciepłoty czyli stopnia ogrzania ciał fizycznych, zachodzą zawsze pewne zmiany zarówno w wewnętrznej ich budowie, jak i nazewnątrz. Zwykłym zewnętrznym skutkiem działania ciepła jest zmiana kształtu i objętości, a co zatem idzie, gęstości ciał. Z nielicznymi tylko wyjątkami z ogólnej zasady zachodzi zawsze *rozszerzanie się* ciał przy ogrzaniu, t. j. przy podniesieniu ich ciepłoty, *kurczenie się* zaś przy oziębieniu, czyli zmniejszeniu ciepłoty. Odpowiednio do tych zmian objętości gęstość ciał przy ogrzaniu zwykle się zmniejsza, przy oziębieniu zaś — wzrasta.

Rozszerzalność ciał przy ogrzaniu, czyli tak zwana rozszerzalność termiczna (cieplna), nie jest dla wszystkich ciał jednakowa. W najmniejszym stopniu zdolność tę posiadają ciała stałe, w większym nieco stopniu — ciecze, największą zaś rozszerzalnością cieplną odznaczają się ciała lotne: pary i gazy.

243. Nieznaczną i niedostrzegalną na oko rozszerzalność ciał stałych można łatwo uwidocznić zapomocą przyrządu Gravesand'a (rys. 199), który się składa z pierścienia metalowego i kulki, dokładnie dopasowanej do tego pierścienia. Po rozgrzaniu kulka rozszerza się i nie może być przesunięta przez pierścień dopóty, dopóki przez oziębienie nie będzie doprowadzona do pierwotnej swej ciepłoty i objętości.

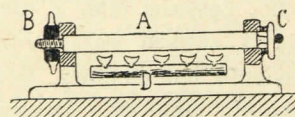


Rys. 199.

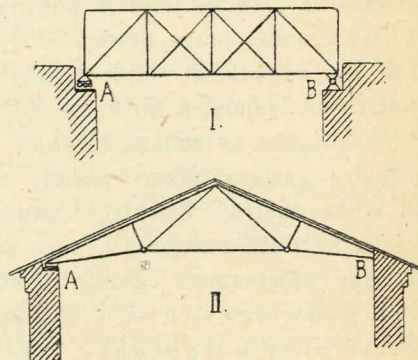
Na zjawisku tem oparty jest między innymi sposób osadzania pierścieni stalowych (bandaży) na kołach wagonów albo na lufach armat wielkiego ka-

libru. Po rozgrzaniu, pierścienie takie wchodzą z łatwością na przedmiot, do którego są dopasowane, po oziębieniu zaś kurczą się i z wielką siłą obciskają ten przedmiot dokoła.

244. Jakkolwiek rozszerzalność cieplna ciał stałych jest nieznaczna, może jednak niekiedy pociągnąć za sobą potężne działanie dynamiczne. Wskutek takiego właśnie działania ciepła, pękają naczynia szklane, piece i t. p., gdy są zbyt gwałtownie, czy też nierównomiernie ogrzane lub oziębione. Zjawisko to można doskonale zilustrować na przyrządzie Tyndala (rys. 200). W przyrządzie tym gruby pręt stalowy *A* jednym swym końcem przyciska do podstawy kołek żelazny *C*, na drugim zaś, po silnem rozgrzaniu zapomocą palnika *D*, zostaje rozciągnięty przez zakręcenie naśrubka *B* na nagwintowanym końcu pręta. Gdy następnie, pręt *A* zostanie szybko oziębiony, np. przez polanie zimną wodą, wówczas kurcząc się, może on łatwo spowodować pęknięcie kołka żelaznego *C*.



Rys. 200.



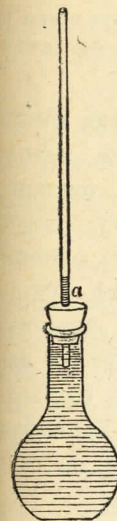
Rys. 201.

Takie silne działanie dynamiczne przy rozgrzewaniu lub oziębianiu ciał może pociągnąć za sobą dotkliwe i niebezpieczne skutki, z którymi często wypada się liczyć w technice i budownictwie. Dlatego to właśnie kotły i maszyny parowe należy obmurowywać w ten sposób, aby mogły swobodnie zmieniać swój kształt i wielkość przy zmianach ciepłoty, nie rozsadzając otaczającego je muru i fundamentów.

Żelazne kratownice mostów (rys. 201, I) i dachów (rys. 201, II) również dla tej przyczyny ustawiane są tak, aby tylko jeden koniec (*B*) kratownicy był nieruchomy, drugi zaś (*A*) ustawia się swobodnie na grubej płycie lub wałkach stalowych, co pozwala całej kratownicy swobodnie rozszerzać się i kurczyć. W taki sam sposób umocowane są na torze kolejowym końce szyn, pomiędzy którymi zawsze powinny pozostawać niewielkie odstępy.

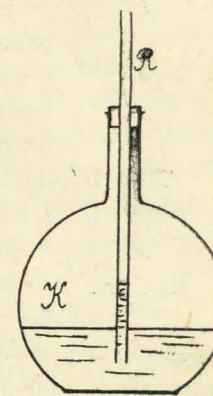
245. Znaczniejszą i bardziej dostrzegalną rozszerzalnością termiczną w porównaniu do ciał stałych odznaczają się ciecze. Można się przekonać o tem, napełniając naczynie szklane (rys. 202) jakąkolwiek cieczą (wodą, naftą, alkoholem) i zatykając szczelnie korkiem, przez który przesunięta jest rurka szklana otwarta na obu

końcach. Zanurzając taki przyrząd szybko w naczyniu z gorącą wodą, zauważymy w pierwszej chwili, że słupek cieczy w rurce gwałtownie opadnie. Jest to narazie tylko skutek rozszerzenia się naczynia szklanego, ciepło bowiem nie zdążyło jeszcze udzielić się zawartej w niem cieczy. Dopiero po krótkiej chwili słupek tej cieczy w rurce przyrządu zaczyna się podnosić.



Rys. 202.

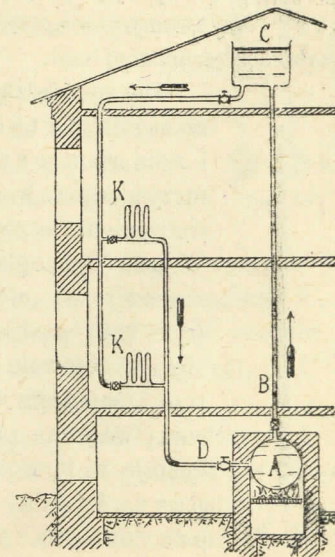
246. Największą i najłatwiej dostrzegalną rozszerzalnością termiczną posiadają ciała gazowe. Można to zilustrować na przyrządzie (rys. 203) w postaci naczynia szklanego, zatknętego szczelnie korkiem, przez który przesunięta jest, jak i w poprzednim przyrządzie rurka szklana otwarta na obu końcach. Dolny koniec rurki zanurzony jest w cieczy (zabarwionej), wypełniającej niewielką część naczynia, reszta zaś tego naczynia wypełniona jest powietrzem albo in-



Rys. 203.

niem ciałem gazowym. Nieznaczne ogrzanie przyrządu, np. przez ujęcie go w ręce wystarczy, aby gaz się rozszerzył i wypchnął na znaczną wysokość słupek cieczy w rurce. Przyrząd ten może więc służyć jako bardzo czuły termoskop do dostrzegania nieznacznych zmian ciepłoty.

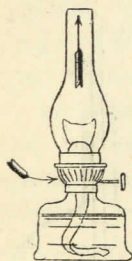
247. Ogrzewanie cieczy i gazów, prócz ogólnego zwiększenia objętości i zmniejszenia gęstości, powoduje zwykle ruchy w całej masie, ogrzane bowiem jej części posiadają mniejszą gęstość, wskutek czego unoszą się do góry, na ich zaś miejsce nieustannie dopływają z góry na dół masy zimniejsze i gęstsze. Tworzą się wówczas tak zwane prądy konwekcyjne, ułatwiające szybkie ogrzanie całej masy przez ogrzewanie jej tylko z dołu. Zjawisko to znajduje ważne zastosowanie praktyczne w ogrzewnictwie i wentylacji.



Rys. 204.

Naprzykład, ogrzewanie centralne wodne (rys. 204) uskutecznia się zapomocą kotła *A*,

ustawionego w najniższym miejscu gmachu. Woda, ogrzana w tym kotle, unosi się do góry rurą *B* i wchodzi do otwartego zbiornika *C* w najwyższym miejscu gmachu, stamtąd zaś dostaje się siecią rur do ogrzewaczy (kaloryferów) *K*, rozmieszczonych w różnych ubikacjach gmachu. Oddając tam pewną część swego ciepła nazwewnątrz, woda staje się gęstszą, opada więc stopniowo coraz niżej i powraca wreszcie znów do kotła *A*, gdzie ulega ponownemu rozgrzaniu i t. d. W podobny sposób urządza się ogrzewanie centralne zapomocą pary, powietrza gorącego i t. p.



Rys. 205.

Naturalna wentylacja (przewietrzanie) mieszkań również polega na stopniowym wprowadzaniu powietrza zimnego i świeżego z dołu, a odprowadzaniu powietrza ogrzanego i zepsutego przez odpowiednie otwory u góry. Zwykle przytem wystarczają tylko otwory górne, gdyż otworami dolnymi są nieszczelności w ścianach, drzwiach, oknach i t. p. naszych mieszkań. Spalanie materiałów opałowych w piecach i lampach (rys. 205) również jest możliwe dzięki powstawaniu prądów konwekcyjnych: gazów ogrzanych do góry, zimnego zaś powietrza — z dołu. Zauważymy wreszcie, że wskutek nierównomiernego ogrzania atmosfery ziemskiej powstają w niej prądy konwekcyjne, zwane wiatrami.

§ 28. Termometria.

248. Ciepłotę, czyli stopień ogrzania ciał określamy pojęciem *temperatury*, przyrządy zaś, służące do mierzenia temperatury, nazywamy *termometrami*. Są one oparte przeważnie na rozszerzalności termicznej ciał.

Do sporządzania termometrów zwykle używane są ciecze, szczególniej rtęć, która odznacza się dość znaczną i równomierną rozszerzalnością i może być łatwo otrzymywana w stanie zupełnie czystym. Prócz rtęci z powodzeniem używa się alkoholu, kwasu siarkowego i t. p. W celu sporządzenia termometru, napełnia się cieczą termometryczną niewielki zbiornik i część połączoną z nim (rys. 206) wąskiej rurki włoskowatej, poczem ciecz ogrzewa się i zagotowuje tak, aby, rozszerzając się, wypchnęła powietrze i zapełniła całkowicie rurkę termometryczną. Koniec tej rurki wówczas zatapia się, wskutek czego po oziębieniu pozostaje w termometrze prócz słupka cieczy tylko pewna ilość pary, która nie stawia jednak żadnego oporu przy rozszerzaniu się i kurczeniu cieczy.



Rys. 206.

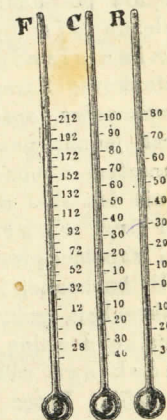
Temperaturę wskazują zmiany długości słupka cieczy w rurce, dla dokonywania zaś pomiarów służy skala z odpowiednio nacechowaną podziałką. Ponieważ podziałka ta może być wogóle dowolna, przeto prawdziwie miarodajne oraz łatwe w wykonaniu i użyciu termometry nauczono się budować dopiero wtedy, gdy zostały odkryte w przyrodzie pewne temperatury stałe, które zawsze mogą być otrzymane i sprawdzone. Najdogodniejszymi z nich okazały się: temperatura topnienia czystego lodu lub śniegu oraz temperatura wrzenia wody pod normalnem ciśnieniem atmosferycznem (760 mm słupa rtęci).

W celu otrzymania pierwszej z tych temperatur zanurzamy koniec rurki termometrycznej w naczyniu, napełnionem drobno potłuczonym lodem albo śniegiem z otworem w dnie, przez który ciągle odpływa woda, powstająca z topnienia. Temperaturę drugą można otrzymać, umieszczając możliwie cały termometr w naczyniu, przez który przepływa strumień pary wodnej podczas wrzenia. W celu zabezpieczenia od wpływu temperatury zewnętrznej, naczynie powinno posiadać ściany podwójne, aby para mogła ogrzewać je z obu stron. Tylko pod tym warunkiem termometr wskaże właściwy stały punkt górny na swej skali.

249. Mając możność otrzymywania na każdej skali termometrycznej dwóch stałych punktów temperatury, można odstęp pomiędzy niemi dzielić wogóle na dowolną liczbę równych części, zwanych *stopniami temperatury*. W użyciu jednak rozpowszechniły się tylko trzy skale termometryczne (rys. 207), mianowicie: skala *Réaumur'a* (*R*), posiadająca 80, skala *Celsjusza* (*C*) — 100, oraz skala *Fahrenheit'a* (*F*), posiadająca 180 stopni termometrycznych pomiędzy punktem topnienia lodu, a punktem wrzenia wody.

Punkt zerowy (0°) na pierwszych dwóch skalach zgadza się z temperaturą topnienia lodu, na skali zaś *Fahrenheit'a* punkt zerowy odsunięty jest od tej temperatury o 32° niżej. Temperatury, notowane powyżej zera, uważamy za *dodatnie* (ze znakiem +), poniżej zaś zera — za *ujemne* (ze znakiem —). Punkt topnienia lodu wypada więc podług skali *Réaumur'a* i *Celsjusza* w temperaturze 0°, podług zaś skali *Fahrenheit'a* — w temperaturze +32°. Punkt wrzenia wody wypada odpowiednio w temperaturze: +80° *R*. (*Réaumur'a*), +100° *C* (*Celsjusza*), oraz 32° + 180° = +212° *F*. (*Fahrenheit'a*).

Do pomiarów naukowych (w fizyce, chemji, medycynie i t. d.) zgodzono się powszechnie używać *skali Celsjusza* ze względu na jej dogodną podziałkę. W użyciu praktycznem, naprzykład, do mierzenia temperatury kąpieli i powietrza w mieszkaniach lub w atmo-



Rys. 207.

sferze i t. p. zwykle stosowana jest skala Réaumur'a, w Anglii zaś i Stanach Zjednoczonych Amerykańskich dotąd jest w powszechnym użyciu skala Fahrenheit'a. W razie potrzeby, można łatwo obliczyć temperaturę podług każdej z tych skal, korzystając z następujących zależności:

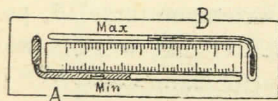
$$\begin{aligned} 1) \quad 80^{\circ} R &= 100^{\circ} C = 180^{\circ} F \\ 2) \quad 1^{\circ} R &= \frac{5}{4}^{\circ} C = \frac{9}{4}^{\circ} F \\ 3) \quad 1^{\circ} C &= \frac{4}{5}^{\circ} R = \frac{9}{5}^{\circ} F \\ 4) \quad 1^{\circ} F &= \frac{4}{9}^{\circ} R = \frac{5}{9}^{\circ} C. \end{aligned}$$

Przykłady: $+40^{\circ} C = 40 \cdot \frac{4}{5} = +32^{\circ} R = 40 \cdot \frac{9}{5} + 32 = +72 + 32 = +104^{\circ} F$; $+36^{\circ} R = 36 \cdot \frac{5}{4} = +45^{\circ} C = 36 \cdot \frac{9}{4} + 32 = +81 + 32 = +113^{\circ} F$; $+14^{\circ} F = -(32 - 14) \cdot \frac{5}{9} = -18 \cdot \frac{5}{9} = -10^{\circ} C = -(32 - 14) \cdot \frac{4}{9} = -18 \cdot \frac{4}{9} = -8^{\circ} R$ i t. p.

250. Pierwsze niedoskonałe termometry znane już były w wieku XVI. Do sporządzania ich posługiwano się początkowo powietrzem, zamkniętym w kuli szklanej z rurką, zanurzoną u dołu w wodzie. Zależnie od zmian ciepłoty woda podnosiła się w rurce na mniejszą lub większą wysokość. Takie termometry budował Galileusz oraz znany w czasach średniowiecza wynalazca niemiecki Otton von Guericke. Niedoskonałość tych przyrządów pochodziła stąd, że prócz braku pewnej miarodajnej skali, były one zależne nie tylko od zmian temperatury, ale również od zmian ciśnienia zawartego w nich powietrza. Później nieco, w w. XVII, członkowie florenckiej Akademii del Cimento nauczyli się budować termometry, oparte na rozszerzalności cieczy na podobieństwo dzisiejszych; brak jednak pewnych stałych punktów na skali zmuszał budować z wielkim kunsztem i móżolem termometry identycznie podobne do siebie, aby wskazania ich skal mogły być zupełnie jednakowe i miarodajne. Dopiero gdański fizyk Fahrenheit, na początku wieku XVIII ¹⁾ przypadkowo zauważył zapomocą swego termometru, iż mieszanina w pewnym stosunku lodu, soli kuchennej i salsmiaku zawsze wskazywała tę samą temperaturę, którą Fahrenheit oznaczył na swej skali punktem zerowym; dalej zaś wykonał podziałkę dowolną, przyczem inna, również zazwyczaj stała temperatura ciała ludzkiego wskazywała 96°.

251. Prócz termometrów zwykłej konstrukcji (rys. 206) używane są również termometry, przeznaczone do różnych celów specjalnych.

Na stacjach meteorologicznych niezbędne są, na przykład, termometry maksymo-minimalne, notujące automatycznie najwyższą i najniższą temperaturę powietrza za pewien przeciąg czasu. Przyrząd tego rodzaju pomysłu Rutherford'a (rys. 208) składa się z dwóch termometrów A i B, umieszczonych obok wspólnej skali, przyczem termometr A wypełniony jest alkoholem, termometr zaś B — rtęcią. W każdym z nich znajduje się mała igielka stalowa, którą słupek cieczy podczas zmian temperatury posuwa naprzód (w ter-

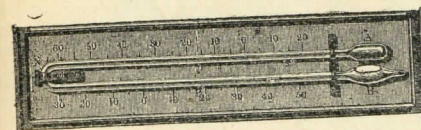


Rys. 208.

¹⁾ Fahrenheit'a należy więc uważać za obywatela Rzeczypospolitej Polskiej.

metrze rtęciowym B), albo też porywa siłą przyczepności za sobą wstecz (w termometrze alkoholowym A). Z położenia tych igielek można w każdej chwili odczytać na skali temperaturę najwyższą (podług termometru B), albo najniższą (podług termometru A). Po odczytaniu tych wskazań igielki odprowadzane są na końce słupków zapomocą magnesu. Analogiczny przyrząd pomysłu Six'a (rys. 209) składa się z termometru, wypełnionego w części rtęcią, w pozostałej zaś części spirytusem. Kulka B termometru zawiera niewielką ilość pary spirytusowej, która ciśnieniem swem utrzymuje w ciągłej łączności słupek rtęci ze spirytusem. Najwyższą i najniższą temperaturę również notuje się z położenia 2 igielek, posuwanych przez słupek rtęci: przy zwiększaniu się temperatury w rurce B, przy zmniejszaniu się zaś — w rurce A termometru.

Budowa termometrów lekarskich (rys. 210) ma na celu utrwalanie wskazań temperatury najwyższej, co się osiąga zapomocą



Rys. 209.

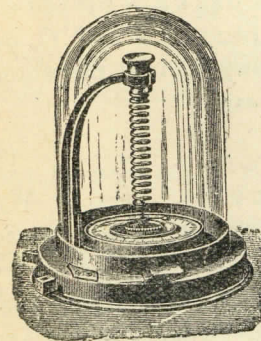


Rys. 210.

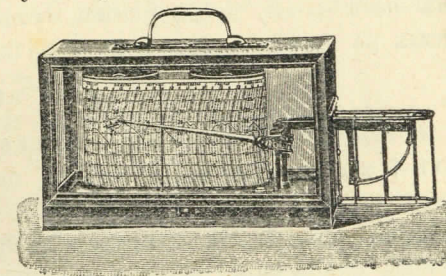
krótkiego słupka powietrza pomiędzy zbiornikiem a ruchomym słupkiem rtęci w rurce termometrycznej. Słupek rtęci wskutek prężności słupka powietrza i tarcia w rurce utrzymuje się w najwyższym swem położeniu i może być sprowadzony na dół dopiero przez wstrząśnienie przyrządu.

252. Do sporządzania termometrów zamiast cieczy używa się niekiedy metali. Na niejednakowej rozszerzalności metali oparta jest, na przykład, konstrukcja termometru sprężynowego Breguet'a (rys. 211), w którym wskazania temperatury notuje się z ruchów sprężyny spiralnej, skutej z dwóch metali o rozmaitej rozszerzalności termicznej.

Do mierzenia temperatur bardzo wysokich używane są tak zwane pirometry, wykonywane z materiałów trudno topliwych, na przykład, platyny, gliny ogniotrwałej i t. p.



Rys. 211.



Rys. 212.

Termometry sprężynowe łączone są niekiedy z przyrządem, automatycznie zapisującym przebieg zmian temperatury za pewien przeciąg czasu, na przykład, za 1 dobę. W tym celu (rys. 212) ruchomy koniec sprężyny termometrycznej zapomocą ołówka lub farbki kreśli zmiany temperatury na papierze, przytwierdzonym do powierzchni ruchomych walców. Mechanizm zegarowy wprawia te walce w ruch jednostajny obrotowy, dostosowany do miary czasu. Papier, na którym zostaje wykreślona krzywa zmian temperatury, zaopatrzony jest w siatkę z podziałką do oznaczania temperatury w jednym kierunku, a czasu w drugim. Przyrząd taki zwiemy *termografem*. Do pomiarów wyjątkowo dokładnych służy tak zw. *termometr normalny*, oparty na rozszerzalności gazów. Z urzędzeniem i teorią tego termometru zapoznamy się później.

§ 29. Oznaczanie rozszerzalności cieplnej ciał.

253. Rozszerzalność cieplną ciał można określać trojako, mianowicie, jako: *linjową*, *powierzchniową* i *objętościową*. Rozszerzalność każdego z tych trzech rodzajów odbywa się zwykle jednostajnie i proporcjonalnie do przyrostu temperatury. Stąd miarą rozszerzalności cieplnej danego ciała może być jego powiększenie się: linjowe, powierzchniowe albo objętościowe, odpowiadające przyrostowi temperatury o $1^{\circ} C$ oraz jednostce pierwotnej: długości, powierzchni albo objętości. Jeżeli miarę tę określimy ściślej, jako *stosunek przyrostu: długości, powierzchni albo objętości do ich wielkości pierwotnych oraz do przyrostu temperatury ciała*, otrzymamy stąd dla każdego danego ciała liczby, noszące nazwę **spółczynników rozszerzalności**: *linjowej*, *powierzchniowej* albo *objętościowej*. Liczby te umówimy się oznaczać odpowiednio literami α , β i γ .

254. Jeżeli α oznacza współczynnik rozszerzalności linjowej pewnego ciała, wówczas po ogrzaniu o $1^{\circ} C$ każda jednostka wymiarów linjowych zamienia się na $1 + \alpha$; po ogrzaniu zaś o $t^{\circ} C$, odpowiednio na $1 + \alpha t$. Jeżeli pewien wymiar linjowy wynosił pierwotnie l_0 , wówczas po ogrzaniu ciała o $t^{\circ} C$ będzie wynosił:

$$l = l_0 (1 + \alpha t) \dots \dots \dots (1)$$

Jest to wzór na obliczanie rozszerzalności *linjowej*. Wyrażenie $(1 + \alpha t)$, zawarte w tym wzorze, nosi nazwę *dwumianu rozszerzalności*.

Rozumując analogicznie i oznaczając pierwotną powierzchnię oraz objętość ciała odpowiednio przez s_0 i v_0 , otrzymamy dwa inne wzory na rozszerzalność *powierzchniową* i *objętościową*, mianowicie:

$$s = s_0 (1 + \beta t) \dots \dots \dots (2)$$

$$v = v_0 (1 + \gamma t) \dots \dots \dots (3)$$

255. Zwykle wyznacza się tylko współczynnik α rozszerzalności linjowej, współczynniki zaś β i γ mogą być obliczone w zależności od współczynnika α w następujący sposób przybliżony:

Jeżeli powierzchnia pierwotna s_0 pewnego ciała wyrażona jest przez dwa jego wymiary linjowe a i b podług wzoru:

$$s_0 = a \cdot b,$$

wówczas po ogrzaniu o t° każdy z tych wymiarów linjowych wydłuży się proporcjonalnie do dwumianu rozszerzalności $(1 + \alpha t)$, powierzchnię zaś (s) można wówczas obliczyć z wyrażenia:

$$s = a (1 + \alpha t) \cdot b (1 + \alpha t) = ab (1 + \alpha t)^2 = ab (1 + 2\alpha t + \alpha^2 t^2).$$

Spółczynnik α jest zazwyczaj liczbą bardzo małą, kwadrat zaś tej liczby jest już tak mały, że wartość jego przy obliczeniach praktycznych nie ma żadnego znaczenia i nie wpływa zupełnie na dokładność rezultatów. Z trójmianu więc, stojącego w nawiasie, można usunąć wyraz ostatni ($\alpha^2 t^2$), poczem wzór przybiera prostszą postać:

$$s = ab (1 + 2\alpha t),$$

albo:

$$s = s_0 (1 + 2\alpha t).$$

Porównyując ten wzór z (2), widzimy, że z dostatecznym dla potrzeb praktyki przybliżeniem można przyjąć:

$$\beta = 2\alpha.$$

Przypuszczając analogicznie, że objętość pierwotna v_0 ciała wyrażona jest przez 3 jego wymiary linjowe podług wzoru:

$$v_0 = a \cdot b \cdot c,$$

otrzymamy nową objętość v tego ciała po ogrzaniu o t° z wzoru:

$$\begin{aligned} v &= a (1 + \alpha t) \cdot b (1 + \alpha t) \cdot c (1 + \alpha t) = abc (1 + \alpha t)^3 = \\ &= v_0 (1 + 3\alpha t + 3\alpha^2 t^2 + \alpha^3 t^3). \end{aligned}$$

Odrzucając w tym wzorze wyrazy, zawierające α^2 i α^3 jako niezmiernie małe, otrzymamy:

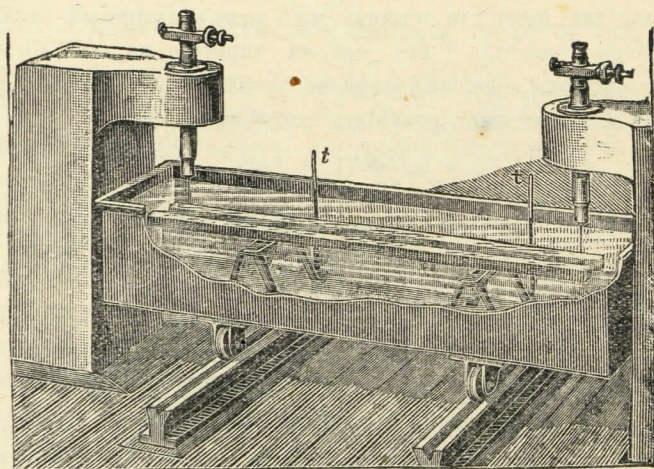
$$v = v_0 (1 + 3\alpha t).$$

Stąd po porównaniu z wzorem (3) widać, że w przybliżeniu:

$$\gamma = 3\alpha.$$

256. Praktyczne wyznaczanie współczynnika rozszerzalności linjowej wymaga użycia przyrządów i instrumentów mierniczych wyjątkowo czułych i dokładnych, otrzymywane bowiem z pomiarów liczby są ułamkami mniejszymi od 0,0001. Najodpowiedniejszym do tego celu, ale bardzo kosztownym przyrządem jest tak zw. *komparator* (rys. 213). Składa się on z wanny, napełnionej cieczą, której temperaturę można mierzyć za-

pomocą 2 dokładnych termometrów t . W cieczy tej zanurzone są pręty z ciał badanych, posiadające w pobliżu swych końców cienkie kreski, podług których mierzą się zmiany ich długości. Pomiary dokonywane są zapomocą dwóch mikroskopów, umocowanych niezależnie od wanny na grubych słupach murowanych, wzniesionych na oddzielnych fundamentach, a to dlatego, żeby nie podlegały żadnym wstrząśnieniom i nie zmieniały swego położenia względem mierzonych w kąpeli prętów. W polu widzenia każdego z mikroskopów znajduje się cieniutka siatka, której nitki mogą być nastawiane na kreski, wykonane na prętach badanych, zapomocą czułych mikrometrów. Każdy obrót śruby mikrometrycznej odpowiada pewnemu wiadomemu i bardzo małemu przesunięciu linjowemu siatki.



Rys. 213.

257. Mniej dokładny, ale wystarczający dla zwykłych potrzeb praktyki przyrząd do mierzenia rozszerzalności linowej składa się z długiej (około 2 m) rurki z materiału badanego ogrzewanej wewnątrz parą. W tym celu rurka połączona jest z kociołkiem, w którym gotuje się woda, aby zaś wewnątrz rurki panowała temperatura, ściśle odpowiadająca punktowi wrzenia wody (100°C) owija się ją starannie materiałem, zabezpieczającym od strat ciepła (wojłokiem, azbestem i t. p.). Jeden koniec rurki jest umocowany nieruchomo, wydłużenie zaś na drugim końcu swobodnym może być zmierzone zapomocą przytwierdzonego do niej ostrza, które kreśli ciekłą ryskę na gładkiej podstawie metalowej przy nieznanym poruszaniu końca rurki w poprzek.

Wymierzwszy w ten sposób długość pierwotną rurki badanej w temperaturze pokojowej (l_0) oraz wydłużenie jej ($l - l_0$) po ogrzaniu do tempe-

ratury 100° , znajdujemy przyrost temperatury (t), poczem z wzoru (1) na rozszerzalność linową może być obliczony współczynnik tej rozszerzalności:

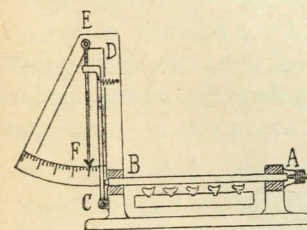
$$\alpha = \frac{l - l_0}{l_0 t}.$$

258. Współczynniki rozszerzalności linowej niektórych ciał wynoszą:

dla rtęci	0,000060
„ cynku i ołowiu	0,000029
„ mosiądzu	0,000019
„ miedzi	0,000017
„ żelaza	0,000012
„ stali twardej	0,000006
„ platyny	0,000009
„ szkła twardego	0,000006
„ „ zwykłego	0,000009

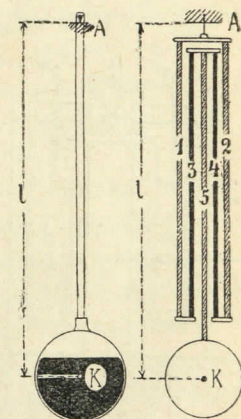
Zauważymy zgodność współczynników dla platyny i szkła ($\alpha = 0,000009$). Tłumaczy ona możliwość wtapiania w szkło drutów, platynowych bez obawy pęknięcia szkła przy zmianach temperatury. Rozszerzalność linowa pręta metalowego AB (rys. 214) może być łatwo dostrzeżona i zmierzona na skali przez zastosowanie dwóch dźwigni CD i EF , sztucznie zwiększających wydłużenie pręta AB w stosunku swych ramion.

259. Na niejednakowej rozszerzalności termicznej metali oparta jest budowa wahadeł i kotwic (ankrów) kompensacyjnych w zegarach dokładnych, czyli tak zw. chronometrach. Aby ruch zegara był regularny, odległość od punktu zawieszenia wahadła do środka jego ciężkości powinna pozostawać niezmienną niezależnie od wszelkich zmian temperatury. Waru-



Rys. 214.

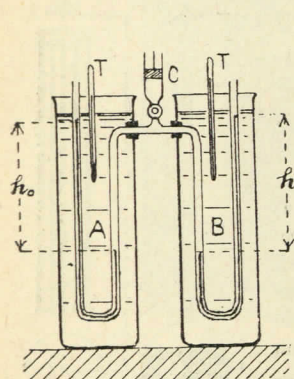
nek ten może być osiągnięty praktycznie w ten sposób, że do kuli (rys. 215, I), umieszczonej na końcu wahadła, nalewa się nieco rtęci z takim wyrachowaniem, aby przy wydłużeniu się pręta i jednoczesnym rozszerzeniu się rtęci w kuli ogólny środek masy K całego wahadła pozostawał w niezmienną odległości l od punktu zawieszenia A . Ten sam cel może być osiągnięty przez zawieszenie soczewki wahadłowej na kilku prętach (rys. 215, II), wykonanych z różnych metali pod warunkiem, aby wydłużenie prętów 1, 2 i 5 zawsze równało się wydłużeniu w przeciwnym kierunku prętów 3 i 4. W chronometrach kotwicznych nie-



Rys. 215.

zmienność ruchu kotwicy (rys. 215, III) osiąga się przez umieszczenie ciężarków C na łukach, skutyk z dwóch metali o niejednakowej rozszerzalności i przytwierdzonych do końców dźwigni wibrującej AB . Jeżeli przy powiększeniu temperatury dźwignia ta nieco się wydłuży, łuki zmieniają jednocześnie swoją krzywiznę w ten sposób, że odległości ciężarków C od osi kotwicy pozostają wciąż niezmiennie.

260. Rozszerzalność objętościową można mierzyć zapomocą przyrządu (rys. 216), w którym ta sama ciecz badana znajduje się w dwóch rurkach manometrycznych, umieszczonych w naczyniach A i B , które służą do ogrzewania lub oziębiania tych rurek. Jednakowe ciśnienie w obydwóch rurkach utrzymuje się zapomocą tłoka C , poczem mogą być zmierzone odpowiadające temu ciśnieniu wysokości h_0 i h słupków cieczy badanej. Wysokości te odpowiadają temperaturom t_0 i t_1 , mierzonym w naczyniach A i B zapomocą zanurzonych w nich dokładnych termometrów T . Zauważymy przytem, że wobec znikomo małej rozszerzalności poprzecznej samych rurek, wysokości zawartych w nich słupków cieczy są zarazem miarą ich objętości.



Rys. 216.

Z wiadomej różnicy temperatur: $t = t_1 - t_0$, w obu naczyniach: oraz z różnicy: $h - h_0$ wysokości słupków cieczy badanej można znaleźć współczynnik γ rozszerzalności objętościowej z wzoru (3) na rozszerzalność objętościową:

$$h - h_0 = h_0 \gamma t; \text{ skąd: } \gamma = \frac{h - h_0}{h_0 t} = 3\alpha.$$

Współczynniki rozszerzalności objętościowej niektórych cieczy wynoszą:

dla rtęci	0,00018
„ wody	0,00050
„ alkoholu	0,00100.

Przy dokładnych pomiarach temperatury zapomocą termometrów rtęciowych, należy uwzględnić nie tylko rozszerzalność samej rtęci, ale

również rozszerzalność linową skali termometrycznej. To samo dotyczy pomiarów barometrycznych.

261. Woda pod względem rozszerzalności cieplnej przedstawia jedyny w swoim rodzaju wyjątek z pośród innych cieczy, rozszerza się bowiem przy ogrzaniu, dopiero poczynając od temperatury $+4^{\circ} C$ wzwyż; w odstępie zaś pomiędzy temperaturą $0^{\circ} C$ (przy której woda powstaje z lodu) a temperaturą $+4^{\circ} C$ woda przy ogrzaniu *kurczy się*, osiągając największą swą gęstość oraz najmniejszą objętość w temperaturze $+4^{\circ} C$. Przebieg tych zmian temperatury i objętości wody uwidocznia wykres na rys. 217.

Te anomalje w rozszerzalności wody mają ważne znaczenie w przyrodzie, zwłaszcza w świecie organicznym, umożliwiając bowiem życie zwierząt i roślin w wodach krajów o klimacie zimnym.

W głębokich i nieruchomych zbiorowiskach wody z nadejściem zimnej pory roku temperatura stopniowo się obniża, oziębione zaś masy wody, gęstniejąc, zwolna opadają z powierzchni w głąb. Ruch ten trwa jednak dopóty, dopóki cała masa wody nie dosięgnie temperatury $+4^{\circ}$, poczem dalszemu oziębieniu podlegają już tylko warstwy zewnętrzne. Dzięki słabemu przewodnictwu cieplnemu wody, obniżenie temperatury nawet po utworzeniu się powłoki lodowej zwykle nie sięga daleko w głąb i taki stan rzeczy trwa przez całą zimę.

Na wiosnę, pod działaniem ciepła słonecznego powłoka lodowa topnieje, a na powierzchni jej powstaje warstwa wody pierwotnie o temperaturze 0° . W miarę jednak dalszego ogrzewania z powierzchni woda gęstnieje, a pogrążając się niżej, umożliwia dalsze topnienie lodu. To obniżanie się ogrzanych mas wody trwa jeszcze przez pewien czas, wtedy, gdy już znikła powłoka lodowa, ustaje jednak z chwilą, gdy cała zawartość wodozbioru dosięgnie temperatury $+4^{\circ}$, poczem dalszemu ogrzaniu podlegają już tylko warstwy zewnętrzne wody. Wobec tego w dostatecznie głębokich zbiorowiskach wody, poczynając od pewnej głębokości, przez cały rok panuje niezmienna temperatura $+4^{\circ} C$.

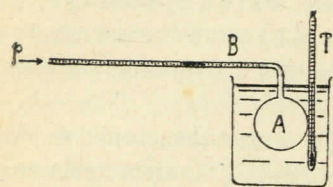
262. Gazy odznaczają się największą rozszerzalnością cieplną. Oznaczając tę rozszerzalność dla rozmaitych, znanych wówczas gazów, Charles, a niezależnie od niego chemik francuski Gay-Lussac (na początku wieku XIX) przekonali się, że wszystkie gazy mają prawie jednakową rozszerzalność cieplną. Stosując w tym przypadku wzór (3), czyli tak zwany wzór Charles'a-Gay-Lussac'a:

$$v = v_0 (1 + \gamma t) \quad \dots \quad (4)$$

można przyjąć w nim jednakowy dla wszystkich gazów współczynnik rozszerzalności objętościowej, mianowicie:

$$\gamma = \frac{1}{273} = 0,00367.$$

Dodać przytem należy, iż wzór Charles'a-Gay-Lussac'a jest słuszny pod warunkiem, że ciśnienie czyli prężność gazu pozostaje niezmienna ¹⁾.



Rys. 218.

Rozszerzalność objętościową gazów można oznaczać zapomocą przyrządu (rys. 218), składającego się z kuli szklanej A o wiadomej objętości i połączonej z tą kulą wąskiej rurki B z podziałką objętościową. Wprowadzając do przyrządu pewną ilość gazu badanego i zamykając go małym słupkiem rtęci w rurce B pod niezmiennym ciśnieniem atmosferycznym p , można następnie zmieniać temperaturę tego gazu i oznaczać jego rozszerzalność z przesunięć słupka rtęci wzdłuż rurki.

§ 30. Zależności między czynnikami stanu fizycznego gazów.

263. Stan każdego gazu określają w zupełności trzy jego czynniki fizyczne, mianowicie: *objętość, ciśnienie i temperatura*. Zależności między temi czynnikami w przypadkach szczególnych zostały już określone prawem Boyle-Mariotte'a (patrz § 25, art. 226), oraz wzorem Charles'a-Gay-Lussac'a (4). Pierwsze z tych praw wyraża zależność między objętością a ciśnieniem gazu w niezmienniej temperaturze, drugie — zależność między objętością a temperaturą przy niezmienniej prężności gazu.

264. Jeżeli zaś gaz zostanie ogrzany lub oziębiony, nie zmieniając swej objętości (np. w szczelnie zamkniętym naczyniu o stałej objętości), wówczas, wobec niezmienności iloczynu: $p v = \text{const.}$ w każdej danej temperaturze, zamiast objętości (v), zmienia się stosownie do temperatury ciśnienie czyli prężność (p) gazu podług wzoru, analogicznego do wzoru Charles'a-Gay-Lussac'a, mianowicie:

$$p = p_0 (1 + \gamma t) \dots \dots \dots (5)$$

¹⁾ Ścisłe badania eksperymentalne, dokonane przez Régnault'a, dowiodły, że gazy w pewnym tylko stopniu ulegają prawu, wyrażonemu wzorem Charles'a-Gay-Lussac'a i tem bliżej, im wyższą jest ich temperatura.

gdzie $\gamma = \frac{1}{273} = 0,00367$ i zowie się w tym wypadku współczynnikiem prężności gazu przy niezmienniej jego objętości.

265. Uwzględniając oba prawa: Boyle-Mariotte'a i Gay-Lussac'a, można wyprowadzić zależność ogólną dla przypadku, kiedy zmieniają się wszystkie trzy czynniki stanu fizycznego gazu.

Przypuśćmy w tym celu, że pewien gaz, posiadający pierwotnie:

objętość v_0 ,
ciśnienie p_0
i temperaturę 0°C ,

przybiera następnie inną objętość v ,
ciśnienie p
i temperaturę t .

Przypuśćmy dalej, że owa zmiana stanu fizycznego gazu odbywa się stopniowo w ten sposób, iż gaz najpierw przybiera inną temperaturę t i pewną objętość v' , nie zmieniając ciśnienia p_0 ; następnie zaś przybiera inne ciśnienie p i objętość v , nie zmieniając nowej swej temperatury t . Oczywiście, że w pierwszym stadium tej przemiany gaz ulega prawu Charles'a-Gay-Lussac'a podług wzoru:

$$v' = v_0 (1 + \gamma t);$$

w drugim zaś stadium — prawu Boyle-Mariotte'a, wyrażonemu znaną równością:

$$vp = v'p_0.$$

Podstawiając w niej znaną poprzednio wartość v' , otrzymamy tak zwany *wzór połączony Boyle-Mariotte'a i Charles'a-Gay-Lussac'a*:

$$vp = v_0 p_0 (1 + \gamma t) \dots \dots \dots (6)$$

Wzór ten wyraża żadaną zależność ogólną między wszystkimi czynnikami stanu fizycznego gazów.

266. Na mocy tego wzoru można, mając zmierzone czynniki stanu fizycznego danego gazu: objętość (v) ciśnienie (p) i temperaturę (t) sprowadzać w razie potrzeby jego objętość do warunków normalnych.

Przykład. Gaz, zamknięty w naczyniu o objętości $v = 532,5 \text{ cm}^3$, posiada temperaturę $t = 14,5^\circ \text{C}$ i ciśnienie 754 mm słupka rtęci. Jaka będzie objętość tego gazu w warunkach normalnych (0°C i 760 mm)? Na mocy wzoru (6), otrzymamy:

$$v_0 = \frac{vp}{p_0 (1 + \gamma t)} = \frac{532,5 \cdot 754}{760 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 14,5)} = 517,6 \text{ cm}^3.$$

§ 31. Kalorymetria.

267. Temperatura danego ciała określa jego stan cieplny tylko *ja-kościowo* przez pewien stopień ogrzania. W związku jednak z tempera-turą pozostaje *ilość ciepła*, zawartego w danym ciele. Ilość ta zależy od pojemności cieplnej ciała i może być wyznaczana zapomocą odpowiednich metod i jednostek mierniczych.

Pojemnością cieplną danego ciała zwiemy stosunek pobrane-go przez nie ciepła do odpowiedniego przyrostu tem-peratury.

Pojemność cieplna jednostki masy danego ciała zo-wie się jego *ciepłem właściwym* albo *gatunkowym*. Jest to więc ilość ciepła, odpowiadająca jednostce masy (1 gr) i przyro-stowi temperatury o 1° C. Oznaczając ilość ciepła, pobranego przez dane ciało przez C , jego masę przez m , przyrost temperatury przez t , oraz ciepło właściwe przez c , otrzymamy zgodnie z powyższem określeniem wzór:

$$c = \frac{C}{mt}, \text{ skąd:}$$

$$C = mtc \dots \dots \dots (1)$$

268. Jednostki ciepła, zwane *kalorjami* albo *ciepłotkami*, zostały wyznaczone w związku z jednostkami masy, a w tym celu użyto ciała, odznaczającego się największą ze wszystkich ciał przyrody (z wyjątkiem wodoru) pojemnością cieplną, mianowicie *wody*.

Mniejsza z dwóch przyjętych powszechnie jednostek ciepła, tak zwa-na **kalorja gramowa** (1 kal) oznacza ilość ciepła, niezbędną do ogrzania 1 grama czystej wody destylowanej o 1° C. Jednostka większa, tak zwa-na **kalorja kilogramowa** (1 Kal) odpowiada w tych samych warunkach 1 kilogramowi wody.

Ścisłej mówiąc, obie te jednostki wyznaczone są w granicach temperatu-ry od 0° do $+1^{\circ}$ C, gdyż, jak to wykazały dokładne pomiary kalorymetryczne (dokonane głównie przez Régnault'a), pojemność cieplna wody zmienia się nieznacznie wraz z temperaturą.

Ciepło właściwe wody jest wobec tego równe jedności ($c = 1$) dla innych zaś ciał fizycznych wyraża się liczbami ułamkowemi, mniejszemi od jedności.

Wynosi ono:

dla ołowiu	0,0314	dla mosiądzu	0,0920	dla szkła	0,1770
„ rtęci	0,0330	„ cynku	0,0955	„ nafty	0,4960
„ miedzi	0,0930	„ żelaza	0,1138	„ alkoholu	0,6020

269. Duża pojemność cieplna wody ma ważne znaczenie w przyro-dzie, zwłaszcza w krajach, obfitujących w liczne zbiorniki wód. Zawie-rając w sobie znaczne zapasy ciepła, woda staje się przez to samo jak-by regulatorem temperatury, zapobiega bowiem zarówno zbyt szyb-kiemu ogrzewaniu się, jak i oziębianiu powietrza atmosferycznego. Stąd zrozumiałą staje się różnica między klimatem morskim, a lądowym (kontynentalnym).

Ze względu na swą dużą pojemność cieplną, woda znajduje częste zastosowanie w życiu praktycznem, służąc z powodzeniem zarówno do celów ogrzewania, jak i oziębiania.

270. Gazy różnią się zasadniczo od cieczy i ciał sta-łych tem, że *ich pojemność cieplna zależy od objętości i ciśnie-nia*. Wobec tego zgodzono się ciepło właściwe gazów oznaczać dwoja-ko: przy niezmiennem ciśnieniu (c_p), oraz przy niezmien-nej objętości (c_v), przyczem okazuje się, że zawsze:

$$c_p > c_v.$$

Ciepło właściwe wynosi:

$$\begin{aligned} \text{dla powietrza } c_p &= 0,2375; \quad c_v = 0,1684; \\ \text{„ dwutlenku węgla (CO}_2\text{)} c_p &= 0,2438 \\ \text{„ wodoru } c_p &= 3,41 \text{ (wyjątkowo).} \end{aligned}$$

271. Przejście ciepła od jednego ciała do drugiego możliwe jest tylko wtedy, gdy istnieje *spadek* czyli *różnica temperatur* między temi ciałami. Ciepło wędruje wówczas od cia-ła o temperaturze wyższej do ciała o temperaturze niższej, poczem ustala się pewna temperatura ostateczna czyli wypadkowa.

Mając wiadome masy, temperatury i ciepło właściwe kilku substan-cyj przed ich zmieszaniem, można obliczyć temperaturę wypadkową mie-szaniny z tak zwanego *bilansu ciepła*. Równanie, wyrażające ten bilans, oznacza, że pewna ilość ciepła, utraconego przez jedne z ciał, rów-na jest ilości ciepła, pobranego przez inne ciała danej mieszaniny.

272. Jeżeli, na przykład, zostają zmieszane z sobą dwie masy *wody* (m_1 i m_2), których temperatury wynoszą odpowiednio t_1 i t_2 (przyczem $t_1 > t_2$), a temperatura wypadkowa mieszaniny jest t , wówczas ilość ciepła, utraconego przez masę m_1 , na mocy wzoru (1) wynosi:

$$m_1 (t_1 - t), \text{ gdyż dla wody: } c = 1;$$

ilość zaś ciepła, pobranego przez masę m_2 , jest:

$$m_2 (t - t_2).$$

Bilans ciepła przedstawi się wobec tego równaniem:

$$m_1(t_1 - t) = m_2(t - t_2),$$

skąd otrzymamy temperaturę wypadkową mieszaniny:

$$t = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2} \quad (2)$$

Jest to tak zwany wzór Riechmann'a.

Jeżeli wogóle zostają zmieszane z sobą dwie substancje, których masy, temperatury i ciepło właściwe wynoszą odpowiednio: m_1 i m_2 , t_1 i t_2 , c_1 i c_2 , wówczas, przyjmując, że $t_1 > t_2$, a temperatura wypadkowa mieszaniny wynosi t , otrzymamy, rozumując analogicznie, następujący bilans ciepła:

$$m_1 c_1 (t_1 - t) = m_2 c_2 (t - t_2);$$

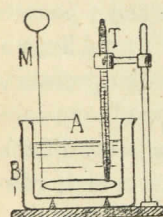
skąd temperatura mieszaniny:

$$t = \frac{m_1 c_1 t_1 + m_2 c_2 t_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2} \quad (3)$$

Jest to tak zwany wzór Black'a.

273. Do pomiarów ilościowych ciepła służą przyrządy, zwane *kalorymetrami*. Wyróżniamy dwa typy tych przyrządów: kalorymetry wodne i lodowe.

Zwykły kalorymetr wodny (rys. 219) składa się z dwóch naczyń metalowych A i B , gładko wypolerowanych i umieszczonych jedno wewnątrz drugiego na podstawkach ze złych przewodników ciepła. Podobne urządzenie ma na celu uniknięcie zbyt dużych strat ciepła nazewnątrz przez promienianie i przewodnictwo. Naczynie wewnętrzne (A) zawiera pewną ilość wody o wiadomej masie m i temperaturze początkowej t_0 . Jeżeli do wody tej zostanie włożone inne ciało o masie m_1 , temperaturze t_1 , (przy czym $t_1 > t_0$) i niewiadomem cieple właściwym x , wówczas po dokładnem zmieszaniu zapomocą mieszadła (M)



Rys. 219.

termometr (T), zanurzony do kalorymetru, wskaże pewną temperaturę wypadkową t , niezbędną do ułożenia bilansu ciepła.

274. Dla otrzymania jednak możliwie dokładnego rezultatu należy uwzględnić pewną ilość ciepła, pochłanianą przez ściany naczynia wewnętrznego A , termometr T i mieszadło M . Mając wiadome masy (m' , m'' i m''') tych przedmiotów, oraz ich ciepło właściwe (c' , c'' i c'''), można łatwo obliczyć niezbędną poprawkę (korektę), zwaną wartością wodną kalorymetru; oznacza ona ogólną ilość ciepła (c) w kaloryjach, jaką wspomniane przedmioty pochłaniają na każdy 1° przy-

rostu temperatury. Wobec tego zaś, że ciepło właściwe wody równe jest jedności, liczba ta:

$$c = m'c' + m''c'' + m'''c'''$$

oznacza zarazem ilość wody w gramach, o którą należy powiększyć masę (m) wody w kalorymetrze, aby skutecznie niezbędną poprawkę rachunkową.

Bilans ciepła wyrazi się wówczas równaniem:

$$(m + c)(t - t_0) = m_1 x (t_1 - t),$$

skąd niewiadome ciepło właściwe x ciała badanego wypadnie z wzoru:

$$x = \frac{(m + c)(t - t_0)}{m_1(t_1 - t)}.$$

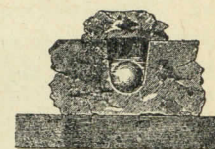
275. W mniej dokładnych od poprzednich kalorymetrach lodowych zamiast wody używa się lodu, topniejącego w stałej temperaturze 0° . Wrzucając w tym celu ciało badane o masie m i temperaturze t do otworu (rys. 220), wydrążonego wprost w kawałku lodu, należy oznaczyć następnie masę (m_0) wody, powstającej wskutek stopienia przez to ciało pewnej ilości lodu. Ponieważ wiadomo nadto, że do stopienia 1 grama lodu w temperaturze 0° i zamienienia go na wodę w tej samej temperaturze niezbędna jest ilość ciepła, wynosząca około 80 kal.¹⁾, stąd, oznaczając ciepło właściwe ciała badanego przez x , otrzymamy równanie:

$$mtx = 80 m_0,$$

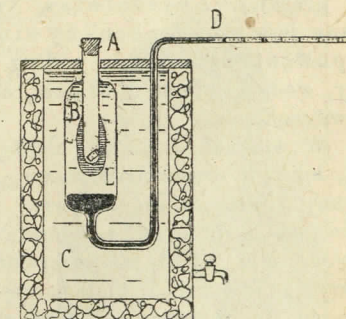
z którego można obliczyć x podług wzoru:

$$x = \frac{80 m_0}{mt}.$$

276. Najdokładniejszym przyrządem do ilościowych pomiarów ciepła jest kalorymetr lodowy Bunsena. Przyrząd ten (rys. 221) składa się z próbowki A , wtopionej w bańkę szklaną B . Bańka ta jest szczelnie wypełniona u góry czystą wodą, u dołu zaś rtęcią, wypełniającą w dalszym ciągu zgiętą rurkę C , oraz wąską prostą rurkę D z podziałką objętościową. Bańka B i rurka C otoczone są wodą o stałej temperaturze 0° , którą podtrzymuje lód, topniejący między podwójnymi ścianami kalorymetru.



Rys. 220.



Rys. 221.

¹⁾ Dokładniej 79,2 cal.

Aby zapomocą tego przyrządu, oznaczyć ciepło właściwe (x) pewnego ciała o wiadomej masie m i temperaturze t , należy wprowadzić do próbowki A najpierw nieco eteru siarczanego lub innej lotnej substancji, która, parując, sprawia znaczne oziębienie. Wskutek tego nazewną próbowki tworzy się powłoka lodowa L , po wrzuceniu zaś do próbowki ciała badanego pewna część tej powłoki zostaje znów zamieniona na wodę, przez co zachodzi zmniejszenie objętości cieczy w naczyniu B . Zmniejszenie to może być bardzo dokładnie oznaczone z przesunięcia końca słupka rtęciowego względem skali na rurce D .

Wiedząc, że każdy 1 gram wody w temperaturze 0^0 , w chwili zamiany na lód o tej samej temperaturze powiększa swą objętość o $0,091 \text{ cm}^3$, można z ogólnego zmniejszenia (v) objętości wody w naczyniu B obliczyć ilość roztopionego lodu w gramach; wynosi ona oczywiście $\frac{v}{0,091} \text{ cm}^3$.

Ponieważ wiadomo nadto, że każdemu gramowi roztopionego lodu odpowiada 80 kal., stąd łatwo ułożyć bilans ciepła, oddanego przez ciało badane i pobranego przez lód:

$$mtx = 80 \cdot \frac{v}{0,091}.$$

Z równania tego można obliczyć ciepło właściwe x podług wzoru:

$$x = \frac{80v}{0,091 mt}.$$

§ 32. Związek między ciepłem a pracą mechaniczną.

277. Poglądy i hipotezy, dotyczące istoty ciepła, ulegały z biegiem czasu zasadniczym zmianom.

W starożytności jeden z najwybitniejszych przedstawicieli klasycznej nauki greckiej, Arystoteles, twierdził naiwnie, że cały wszechświat zbudowany jest z czterech żywiołów (elementów): ziemi, wody, ognia i powietrza. Ziemia podług tej teorii miała być połączeniem zimna i suszy, woda — zimna i wilgoci, ogień — gorąca i suszy, a powietrze — gorąca i wilgoci.

W wiekach średnich ciepło przedstawiano sobie jako niezwykle subtelna, lekka i przenikliwa materję, której dano nazwę ciepłika (termogenium). Większa lub mniejsza zawartość owego ciepłika w różnych ciałach miała stanowić o ich temperaturze. Teoria ta długo i uporczywie trzymała się w wielu wybitnych umysłach nawet wtedy, gdy znane już były liczne fakty, zaprzeczające materialnej istocie ciepła. Między innymi przekonano się, że ciepłik może w znacznych ilościach powstawać z niczego, np. podczas tarcia lub uderzenia; w innych zaś razach ten sam ciepłik mógł zniknąć bezpowrotnie, np., w zjawisku topnienia lodu lub wrzenia wody, wówczas bowiem temperatura wcale się nie zmienia, pomimo nieustannego dopływu ciepłika. Fakty powyższe stały w jawnej sprzeczności ze znanem już podówczas prawem zachowania materji.

Wierząc w istnienie ciepłika jako substancji materialnej, fizycy owocześni nie mogli jednak żadnymi środkami, ani sposobami oznaczyć jego ciężaru, ani masy, ważąc bowiem ciała ogrzane, a więc zawierające dużo rzekomego ciepłika, nie tylko nie mogli nigdy wykazać przyrostu ciężaru, ale, rzecz dziwna, ciężar ten częstokroć wbrew oczekiwaniom ulegał zmniejszeniu (wskutek ulatniania się zawartego w ciałach powietrza, tworzenia się prądów konwekcyjnych nad ogrzaniem ciałem i t. p.). Najbardziej fanatyczni zwolennicy teorii ciepłika twierdzili wówczas, że substancja ta posiada ciężar ujemny.

Wobec podobnych faktów już na początku wieku XVIII uczuwano potrzebę innej, bardziej wiarogodnej hipotezy, wyjaśniającej istotę ciepła.

278. Znany filozof i przyrodnik angielski Bacon w wieku XVII wygłaszał zdanie, że ciepło należy uważać za ruch rozszerzalny cząsteczek materji, dowodem czego miała być rozszerzalność ciał przy ogrzaniu. Myśl ta jednak była wypowiedziana przez Bacona w sposób niejasny i niepewny dlatego też nie znalazła uznania i poparcia u ogółu.

Na początku wieku XVIII inny uczony angielski, lord Rumford, jako bawarski minister wojny, gdy był pewnego razu obecny przy wierceniu kanałów armatnich zapomocą świderów, zauważył, że ogromna ilość wywiązującego się podczas tej czynności ciepła mogła doprowadzać do wrzenia wody, którą oziębiano lufę armatnią, odpadające zaś od świdra wióry stalowe rozgrzewały się przytem do czerwoności.

Pomiary kalorymetryczne upewniły Rumforda, że wióry posiadały to samo ciepło właściwe, co i cała masa armaty, jakkolwiek wydawało się napozór, że wióry miały pojemność cieplną mniejszą, a wskutek tego silniej się rozgrzewały. Pozostawało więc przypuścić, że ciepło było w tym wypadku tylko skutkiem wykonanej i napozór straconej pracy mechanicznej świdra.

Rumford nie był jednak w stanie bliżej wyjaśnić tego ciekawego zjawiska, przekonał się jedynie, że produkowanie ciepła kosztem pracy mechanicznej, na przykład, w celu ogrzewania mieszkań, byłoby rzeczą wysoce kosztowną i nieekonomiczną; że taniejby kosztowało opalenie pieców sianem i owsem, niż zużywanie tych produktów na wyżywienie niezbędnej ilości koni, któreby pracą swą wytwarzały potrzebną ilość ciepła.

279. Dopiero na początku wieku XIX uczony inżynier francuski Sadi-Carnot, badając bliżej zjawiska przetwarzania się pracy mechanicznej na ciepło, oraz ciepła na pracę mechaniczną, jakie zachodziły w wynalezionych i znanych już podówczas maszynach parowych, — przyszedł do wniosku, że oba te zjawiska pozostają w niezaprzeczalnym i matematycznie ścisłym związku z sobą. W rękopisach, pozostałych po śmierci



Sadi-Carnot.

tego wcześniej zgasłego uczonego ¹⁾, są wskazówki, dowodzące, że związek ten został przez Carnot'a istotnie znaleziony, jakkolwiek nigdy nie był opublikowany. Do wiadomości owoczesnych uczonych doszła jedynie ważna zasada Carnot'a, głosząca, że zamiana ciepła na pracę mechaniczną możliwa jest tylko *przy istnieniu pewnej różnicy czyli spadku temperatur* pomiędzy dwoma zbiornikami ciepła. Przepływając od ciała o temperaturze wyższej (np. od kotła parowego) do ciała o temperaturze niższej (np. do atmosfery lub skraplacza), ciepło częściowo może być zamienione na pracę mechaniczną. Analogiczne zjawisko widzimy w działaniu silników wodnych, gdzie praca również powstaje na skutek istnienia spadku czyli różnicy poziomów pomiędzy wodozbiorem górnym a dolnym (patrz rys. 72 str. 66).

280. Zależność matematyczna między ciepłem a pracą mechaniczną została znaleziona jednocześnie prawie i niezależnie od siebie przez dwóch badaczy: lekarza niemieckiego *Roberta Mayera* i fizyka angielskiego *Joule'a*²⁾ w połowie ubiegłego stulecia.



Robert Mayer.

R. Mayer, zastanawiając się nad różnicą między ciepłem właściwym przy niezmiennym ciśnieniu (c_p) a ciepłem właściwym przy niezmiennym objętości (c_v) gazów, wytłumaczył istnienie tej różnicy i obliczył stąd związek między ciepłem a pracą mechaniczną w sposób następujący:

Przypuśćmy, że pewna ilość powietrza w temperaturze $0^\circ C$ i pod normalnym ciśnieniem (760 mm) atmosfery, wynoszącą: $p = 1,0333 \text{ Kg/cm}^2$ (patrz § 24, art. 217), zamknięta jest

w naczyniu sześciennym (rys. 222), które posiada wszystkie trzy wymiary linowe $= 1 \text{ m}$. Górna ściana tego naczynia może się poruszać nakształt tłoka szczelnie, ale bez tarcia, przy ogrzaniu więc powietrza w naczyniu od 0° do $+1^\circ$ tłok ten uniósłby się do góry na odległość: $\gamma = \frac{1}{273} \text{ m}$, czyli równą współczynnikowi rozszerzalności objętościowej gazów, o ile inne wymiary linowe naczynia pozostałyby wówczas niezmiennie. Rozszerzające się powietrze pokonywałoby przytem stałą siłę P parcia atmosfery na tłok, wynoszącą:

$$P = 1,0333 \text{ Kg/cm}^2 \cdot 100 \text{ cm}^2 = 10333 \text{ Kg}.$$

¹⁾ Mikołaj Sadi-Carnot, ur. 1796, umarł w 1832 r. ²⁾ Czyt. Dżaula.

Przesunięcie tłoka, obciążonego taką siłą na odległość $\gamma = \frac{1}{273} \text{ m}$, wymaga wykonania pracy w ilości:

$$L = P \cdot \gamma = 10333 \cdot \frac{1}{273} = 37,8 \text{ Kg} \cdot \text{m}.$$

Masa powietrza w objętości 1 m^3 i temperaturze $0^\circ C$ pod ciśnieniem 760 mm słupa rtęci wynosi: $m = 1,293 \text{ kg}$. Ilość ciepła C_p niezbędna do ogrzania tej masy o 1° przy niezmiennym ciśnieniu jest:

$$C_p = c_p \cdot m = 0,2375 \cdot 1,293 = 0,3071 \text{ Kal};$$

ilość zaś ciepła C_v , niezbędna do ogrzania tej samej masy powietrza w niezmiennym objętości, wynosiłaby:

$$C_v = c_v \cdot m = 0,1684 \cdot 1,293 = 0,2177 \text{ Kal}.$$

Różnica między temi dwiema ilościami ciepła jest:

$$C = C_p - C_v = 0,3071 - 0,2177 = \text{około } 0,09 \text{ Kal}.$$

R. Mayer tłumaczy tę różnicę koniecznością wykonania kosztu takiego właśnie nadmiaru ciepła pracy mechanicznej w ilości: $L = 37,8 \text{ Kg} \cdot \text{m}$ podczas rozszerzania się gazu pod niezmiennym ciśnieniem.

281. Stąd już łatwo można obliczyć tak zwany **mechaniczny równoważnik ciepła** czyli ilość pracy mechanicznej, odpowiadającą 1 Kalorii (kilogramowej) ciepła. Równoważnik ten (W) można otrzymać w postaci stosunku pracy (L) do odpowiadającej jej ilości ciepła (C), mianowicie:

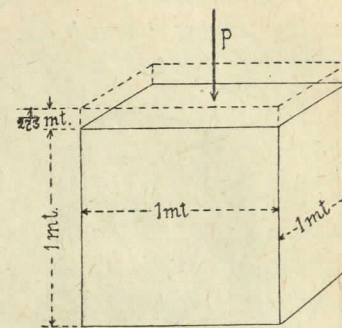
$$W = \frac{L}{C} = \frac{37,8}{0,09}; \text{ albo } W = 420 \text{ Kg} \cdot \text{m/Kal}.$$

Odwrotność tej liczby wyraża ilość ciepła w kalorjach (kilogramowych), odpowiadającą 1 Kilogramometrowi pracy i zowie się **termicznym równoważnikiem pracy mechanicznej**. Wynosi on:

$$K = \frac{1}{W} = 0,0024 \text{ Kal/Kg} \cdot \text{m}.$$

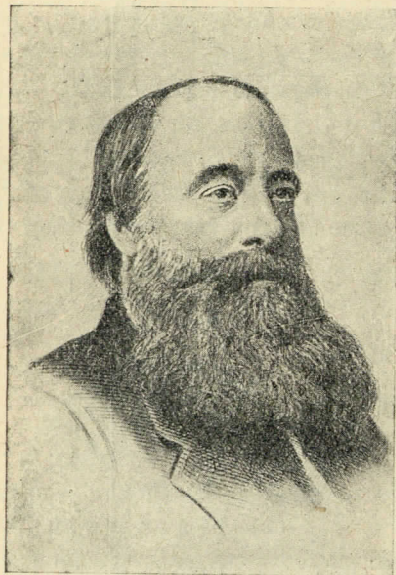
Okoliczność, iż *R. Mayer* ¹⁾ był lekarzem, a nie zawodowym fizykiem i nie umiał przytem wyrażać swych myśli w sposób jasny i przekonujący, stała się przyczyną, że znakomita jego teoria przez długi czas nie znajdowała poparcia, ani posłuchu wśród uczonych.

¹⁾ Robert Mayer, lekarz z Heilbronn, urodził się w r. 1814, umarł w r. 1878.



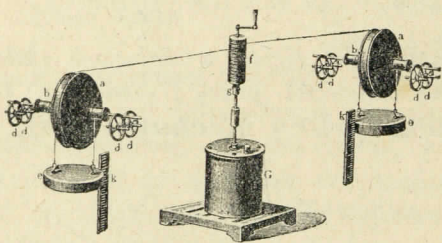
Rys. 222.

Spowodowało to ciężki dramat w życiu Mayera i wpędziło go nawet na pewien czas do domu obłąkanych. Dopiero na krótko przed zgonem zasłużony ten, acz niefortunny badacz naukowy doczekał się należnych mu zaszczytów i uznania u ogółu.



J. Joule.

Pracę mechaniczną, zużytą na pokonanie tarcia, mierzono zapomocą dwóch ciężarków e , które, spadając z pewnej wysokości (h), wskazywanej na skalach k , obracały mieszkadło w kalorymetrze za pośrednictwem bloków a i sznurka, nawiniętego na połączony z osią mieszkadła bęben f (rys. 223). Po opadnię-

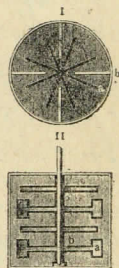


Rys. 223.

ciu ciężarków odczepiano bęben od mieszkadła zapomocą klucza s i znów podnoszono ciężarki na pierwotną wysokość zapomocą korbki ręcznej przy bębnie f . Niezależnie od pracy, jaką wytwarzały ciężarki e , spadające z wysokości h , oznaczano jeszcze pracę, nie-

282. J. Joule niespełna w rok po odkryciu Mayera oznaczył mechaniczny równoważnik ciepła metodą czysto doświadczalną. Użył on do tego celu kalorymetru G (rys. 223 i 224), zaopatrzonego wewnątrz w mieszkadło a (rys. 224) i przegrody b , które służyły do wywołania jak największego tarcia między cieczą a mieszkadłem, oraz ciepła, które się wytwarza na skutek tego tarcia. Dla większego efektu Joule używał zamiast wody rtęci, która posiada mniejszą pojemność cieplną, a więc łatwiej ogrzewa się, niż woda.

Pracę mechaniczną, zużytą na pokonanie tarcia, mierzono zapomocą dwóch ciężarków e , które,



Rys. 224.

zbędną na wprowadzenie w ruch tylko sznurka i bębna f po odczepieniu go od mieszkadła. W tym celu zawieszano na sznurku ciężarki mniejsze (p), niezbędne tylko do pokonania tarcia sznurka, bloków i bębna. Jeżeli ciężarki, niezbędne do poruszania całego przyrządu wraz z mieszkadłem były równe P , wówczas praca, zużyta na poruszanie samego tylko mieszkadła, za każdym spadkiem ciężarków z wysokości h wynosiła oczywiście:

$$L = (P - p) \cdot h.$$

Cała ta ilość pracy zamieniała się na ciepło w kalorymetrze G .

Wykonawszy 20 takich spadków i wymierzwszy jednocześnie przyrost ciepła w kalorymetrze, odpowiadający wykonanej pracy, Joule był w stanie obliczyć mechaniczny równoważnik ciepła; otrzymał przytem liczbę bardziej wiarogodną, niż liczba R. Mayera, mianowicie:

$$W = 424 \text{ Kg} \cdot \text{m/Kal.}$$

Najbardziej dokładną liczbę otrzymał niedawno Amerykanin Rowland, posługując się termometrem gazowym, mianowicie:

$$W = 427 \text{ Kg} \cdot \text{m/Kal.}$$

§ 33. Ciepło jako energja. Teorja kinetyczna materji.

283. Odkrycia Sadi-Carnot'a, R. Mayera i Joule'a zyskały epokowe znaczenie w dziejach rozwoju fizyki, ujawniły bowiem niedostrzeganą przedtem łączność pomiędzy tak odrębnymi i niepodobnymi do siebie zjawiskami, jak ciepło i praca mechaniczna. *Ciepło jest więc tylko pewną odmianą energii*, znanej przedtem tylko pod postacią pracy mechanicznej.

Niebawem też została wykryta łączność między temi dwoma a wielu innymi, również napozór niepodobnymi do siebie zjawiskami fizycznymi, jak: głos, światło, magnetyzm, elektryczność i powinowactwo chemiczne. Są to również rozmaite odmiany tej samej energii.

Pierwotne więc, niejasne pojęcie energii mechanicznej rozszerzyło się tym sposobem, obejmując całą przyrodę. Energia ulega, jak okazało się, najrozmaitszym przeobrażeniom, *zachowując jednak każdorazowo swą ilość*. Wtedy to w świadomości ludzkiej zostało ugruntowane **prawo zachowania energii**, analogiczne do odkrytego niegdyś przez Lavoisier'a prawa zachowania materji.

Nowe to, niezmiernie ważne prawo przyrody uzasadnił teoretycznie, za pomocą ścisłych rozumowań i rachunków uczony niemiecki H. Helmholtz w świetnej swej rozprawie p. t. „O zachowaniu siły” ¹⁾.

284. Trudno orzec, które z pośród znanych dziś form energii są bardziej czynne, cenne lub użyteczne. Najbardziej intensywne skupienia energii przyroda zawiera niechybnie w promieniotwórczych pierwiastkach materji takich, jak słynny w ostatnich czasach rad, aktyn, polon i t. p. Do najmniej cennych i użytecznych form energii należą, być może, rozmaite rodzaje energii promienistej, które po wyjściu ze swych źródeł rozchodzą się zazwyczaj bezpowrotnie w przestworzu w postaci promieni ciepłych, świetlnych, elektromagnetycznych i t. p. Ponieważ energia promieniuje w ten sposób z najrozmaitszych swych źródeł i skupień w przyrodzie, podlega więc nieubłaganemu *prawu rozproszenia i degradacji* (obezwartościowania).

Jednocześnie z rozproszeniem i obezwartościowaniem energii zachodzi stały wzrost tak zwanej entropji wszechświata. Jest to pewna funkcja matematyczna, przedstawiająca całokształt zmian stosunku pochłoniętego przez różne ciała ciepła do ich temperatury. Ostateczny kres degradacji energii i zarazem maksimum entropji oznaczałby faktyczny „koniec świata”, gdyż wraz z ustaniem ruchu i przeobrażeń energii ustaliłyby w przyrodzie wszelkie objawy życia organicznego. Kres ten leży jednak w nieskończonościach czasu, gdyż, jak tego dowodzi teoria i doświadczenie, w miarę zmniejszania się napięcia i zagęszczenia energii w różnych jej zbiorowiskach, procesy degradacji i rozproszenia odbywają się coraz wolniej i spokojniej, rozciągając się tym sposobem w bezmiary czasu.

W szczególności co do naszej bryły ziemskiej, niektórzy uczeni wypowiadają dziś myśl, że gdyby po wielu milionach lat zabrakło energii, spływającej nieustannie na ziemię z olbrzymiego jej źródła — słońca, to jednak nie będą jeszcze wówczas wyczerpane zasoby energii, utajonej we wnętrzu ziemi, a nawet w jej powłoce zewnętrznej, zawierającej, na przykład, pierwiastki promieniotwórcze.

285. W obecnej przyrodzie ziemskiej *wszystkie niemal źródła i skupienia energii pochodzą od słońca*. Energia promieni słonecznych powoduje na ziemi nieustanny ruch powietrza, opadów atmosferycznych, wód i t. d.; ta sama energia na skutek tajemniczych procesów życiowych nagromadza się w organizmach roślin i zwierząt, skąd czerpiemy ją nieustannie w postaci materiałów opałowych, pokarmowych, technicznych i t. p. i otrzymujemy stąd rozmaite inne odmiany energii.

Ciekawy przykład szeregu przeobrażeń energii widzimy w czynności elektrowni. Energia ciepła, otrzymywana tam przez spalanie czyli utlenienie się węgla, przedostaje się do wody i pary w kotłach parowych. Pewna część tej energii w maszynach lub turbinach parowych zostaje przetworzona na pracę mechaniczną, która zamienia się na energję elektromagnetyczną w prądnicach (dynamomaszynach) elektrycznych. Energia prądu, rozsyłana z elektrowni po drutach, służy do rozmaitych celów, a więc: rozżarza węgle i włókna lamp elektrycznych, rozchodząc się stamtąd bezpo-

¹⁾ Über die Erhaltung der Kraft”, ogłoszonej w r. 1847.

wrotnie w postaci promieni świetlnych i ciepłych; porusza wagony tramwaju lub motory fabryczne, zamieniając się ponownie na pracę, która w przeważnej ilości zostaje zużyta na pokonanie tarcia w częściach mechanizmów, a wtedy znów bezpowrotnie rozprasza się w przestworzu. Energję prądu elektrycznego można nadto w razie potrzeby nagromadzać w postaci energii chemicznej w tak zwanych akumulatorach, skąd może ona być ponownie czerpana w razie potrzeby w postaci prądu do różnych celów i t. d. Ostatecznem ogniwem w łańcuchu każdego z takich przeobrażeń energii jest zawsze prawie energja promienista, która rozprasza się wprawdzie, ale nie ginie w przyrodzie.

286. Odkrycie prawa zachowania energii żywiej popchnęło myśl ludzką w kierunku zagadnień, dotyczących budowy i istoty materji. Hipoteza molekularna czyli cząsteczkowa została wkrótce uzupełniona *teorją kinetyczną materji*. Z teorii tej wynika, że cząsteczki materji przebywają w nieustannym ruchu. Rodzaj i prędkość tego ruchu zależne są z jednej strony od temperatury, z drugiej — od stanu skupienia czyli tak zw. *fazy fizycznej* materji.

Podniesienie ciepłoty ciała spotęguje prędkość i energję kinetyczną jego cząsteczek (wyrażoną matematycznie przez żywą siłę: $\frac{1}{2}mv^2$). Ciepło więc, zawarte w ciałach materialnych, utożsamiamy podług tej nowej teorii z *energją kinetyczną* cząsteczek (molekuł).

287. W zastosowaniu do ciał stałych i ciekłych teoria kinetyczna materji nie jest jeszcze należycie poparta dowodami doświadczalnymi. Fizycy przypuszczają jedynie, że cząsteczki materji w stanie stałym i ciekłym wykonywają prawdopodobnie ruchy wirowe lub drgające o niezmiernie małych odchyleniach, nie wykraczających poza sferę działania sił spójności. Dopływ energii z zewnątrz potęguje żywą siłę cząsteczek materji, co zaznacza się przez zwiększenie temperatury oraz rozszerzalność cieplną ciał.

288. Najlichniesze dowody, zarówno teoretyczne, jak i doświadczalne, zyskała w ostatnich czasach teoria kinetyczna w zastosowaniu do gazów. Cząsteczki gazu na mocy tej teorii obdarzone są tak znaczną energją kinetyczną, że nie podlegają prawie zupełnie działaniu sił spójności. Posiadają one *ruchy postępowe* i pędzą z wielką prędkością nakształt gradu niezmiernie małych pocisków lub roju owadów, ulegając przytem nieustannym zderzeniom pomiędzy sobą, oraz odbiciu od ścian naczyń.

Prędkości ruchu cząsteczek gazowych podług obliczeń teoretycznych wynoszą:

dla tlenu 461 m/sek, dla azotu 492 m/sek, dla wodoru 1843 m/sek.

Na skutek wielokrotnych i nieustannych uderzeń cząsteczek o ściany naczynia z sumy poszczególnych popędów (Pt) tych cząsteczek, wynikających z ich pędu (mv), powstaje ciśnienie czyli prężność gazu.

Zmniejszenie objętości gazu, na przykład o połowę, zwiększa dwukrotnie ilość uderzeń o ściany naczynia, a zatem dwukrotnie też powiększa się przytem prężność gazu. Jest to, jak widać, teoretyczne uzasadnienie znanego prawa Boyle-Mariotte'a. Jeżeli gaz rozszerza się pod niezmiennem ciśnieniem, wymaga to wykonania pewnej ilości pracy, a więc dopływu energii z zewnątrz. Dopływowi temu towarzyszy prawidłowy i stopniowy wzrost energii cząsteczek gazu, co się zaznacza przez zwiększenie temperatury proporcjonalnie do przyrostu objętości. Mamy więc uzasadnione prawo Charles'a-Gay-Lussac'a.

§ 34. Zmiany stanu skupienia (fazy) materji.

A. Topnienie i krzepnięcie.

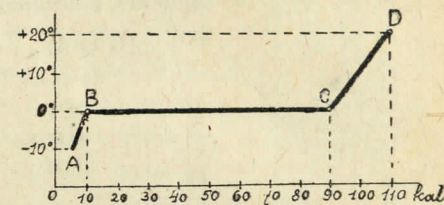
289. Od stanu ciepłoty ciała zależy ten lub inny stan skupienia jego cząsteczek czyli faza fizyczna tego ciała. Należy przytem zauważyć, że w pewnych warunkach materja może istnieć we wszystkich trzech swych fazach *jednocześnie*. Jako przykład może służyć lód (ciało stałe), utrzymujący się w wodzie (ciało ciekłe) o temperaturze 0° i w obecności zawartej jednocześnie w otaczającym powietrzu pary wodnej (stan lotny). Pomiedzy fazą stałą i ciekłą ciała zazwyczaj przechodzą przez pewną fazę przejściową, pośrednią między ciałem stałym i ciekłym (np. wosk, lak i t. p.). Znamy nadto przypadki, gdy ciało z fazy stałej przechodzi wprost do fazy lotnej lub odwrotnie z pominięciem fazy ciekłej. Widzimy to w zjawisku tak zw. *sublimacji*, której ulegają między innymi sublimat rtęciowy, naftalina i t. d. Jeżeli, na przykład, naftalina zostanie ogrzana powyżej 40° C. w długiej rurce, wówczas w górnych częściach tej rurki ta sama naftalina, ulatniająca się z dołu w postaci niewidzialnej pary, osiada ponownie na oziębionych ściankach rurki w postaci proszku krystalicznego.

Przejściu ciała pod wpływem ogrzania ze stanu stałego w ciekły, czyli *topnieniu*, odpowiada ściśle określona temperatura; w tej samej temperaturze zachodzi również zjawisko odwrotne — *krzepnięcie* czyli *zestalenie się* cieczy. Przez cały czas, w ciągu którego odbywa się proces topnienia lub krze-

pnienia ciała, temperatura ta pozostaje niezmienną, mimo iż w pierwszym wypadku odbywa się nieustanny dopływ ciepła do ciała z zewnątrz, w drugim zaś — wydzielanie się ciepła z tego ciała na zewnątrz.

290. Można to uwidocznić na wykresie (rys. 225), który wyobraża przebieg ogrzania 1 gr. lodu od temperatury -10° do $+20^{\circ}$ pod zwykłym ciśnieniem atmosferycznym.

Z początku ogrzanie lodu odbywa się proporcjonalnie do przyrostu temperatury (od -10° do 0°) podług funkcji linowej (odcinek AB). Z chwilą, gdy lód osiąga temperaturę 0° rozpoczyna się proces topnienia, przyczem dalszemu prawidłowemu dopływowi ciepła od 10 do 90 *kal.* towarzyszy niezmienna temperatura (odcinek BC równoległy do osi odciętych) i dopiero po zupełnym stopieniu się lodu dalsze ogrzewanie utworzonej z niego wody znów odbywa się podług funkcji linowej proporcjonalnie do przyrostu temperatury (odcinek CD) z pochłanianiem 1 *kal.* na każdy 1° ogrzania.



Rys. 225.

Oczywiście, że podczas procesu odwrotnego t. j. krzepnięcia albo zestalania się wody na lód przebieg zjawiska jest również odwrotny. To znaczy, że woda, w ilości 1 gr, oziębiona do temperatury 0° , zanim całkowicie nie zamieni się na lód, nie zmienia wcale tej temperatury, oddając 80 *kal.* ciepła bez ujawniania tej straty na termometrze.

291. Niezbędną, ale niedostrzegalną na termometrze ilość energii cieplnej, pochłanianą przy topnieniu lub wydzielaną przy krzepnięciu, zowiemy **cieplem utajonem topnienia, względnie krzepnięcia**. Podług teorii kinetycznej jest to ilość energii, która musi być zużyta przy topnieniu na pokonanie sił spójności materji i wyprowadzenie cząsteczek ze sfery ich działania; przy krzepnięciu zaś taka sama ilość energii musi być odjęta od materji dlatego, aby cząsteczki jej mogły wejść w sferę działania sił spójności. Ponieważ energia ta zostaje zużyta na czysto *wewnętrzny* zmianę budowy samej materji, przeto nie może być ujawniona przez działanie zewnętrzne na termometr.

291. Niezbędną, ale niedostrzegalną na termometrze ilość energii cieplnej, pochłanianą przy topnieniu lub wydzielaną przy krzepnięciu, zowiemy **cieplem utajonem topnienia, względnie krzepnięcia**. Podług teorii kinetycznej jest to ilość energii, która musi być zużyta przy topnieniu na pokonanie sił spójności materji i wyprowadzenie cząsteczek ze sfery ich działania; przy krzepnięciu zaś taka sama ilość energii musi być odjęta od materji dlatego, aby cząsteczki jej mogły wejść w sferę działania sił spójności. Ponieważ energia ta zostaje zużyta na czysto *wewnętrzny* zmianę budowy samej materji, przeto nie może być ujawniona przez działanie zewnętrzne na termometr.

Ze wszystkich ciał fizycznych ciepło utajone topnienia lodu i krzepnięcia **wody** jest największe i wynosi około 80 (dokładniej 79,2) *kal.* na każdy gram masy (albo też 79,2 *Kal.* na 1 *kg* masy).

Jest to pokaźna ilość energii, którą można obliczyć w jednostkach pracy, mnożąc przez mechaniczny równoważnik ciepła, mianowicie:

$$79,2 \cdot 427 = 33818,4 \text{ Kg} \cdot \text{m}.$$

Taką ilość pracy normalny koń parowy (1 H. P.) musiałby wytwarzać w ciągu czasu $= \frac{33818,4}{75 \cdot 60} = \text{około } 7\frac{1}{2} \text{ minut}.$

Ciepło utajone topnienia i krzepnięcia wynosi:

dla wosku	42
„ żelaza łanego	33
„ cyny	14
„ ołowiu	5,6
„ rtęci	2,82

292. Duża ilość ciepła utajonego lodu ma ważne znaczenie w przyrodzie, zapobiega bowiem zarówno zbyt gwałtownemu zamarzaniu, jak i topnieniu wód, oraz zgubnym następstwom, jakieby stąd wynikały dla świata roślinnego i zwierzęcego w naszej przyrodzie.

Podczas krzepnięcia woda ulega raptownemu i dość znacznemu rozszerzeniu, któremu może towarzyszyć w pewnych warunkach potężne działanie dynamiczne (tę samą własność posiada prócz wody jeszcze żelazo łane i bizmut).

Wiadomo, na przykład, że zamarzająca woda rozsada nieraz naczynia, w których jest zawarta. W przyrodzie podobne zjawisko odbywa się na wielką skalę w postaci tak zwanej erozji skał, które woda zwolna kruszy, zamarzając w ich rozpadlinach. Z tej samej własności wody korzystają rolnicy, orząc w jesieni rolę (ziębl), aby mrozy zimowe mogły ją należycie spulchnić i przygotować do uprawy wiosennej.

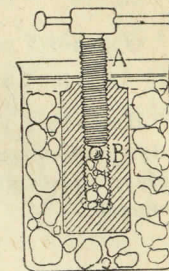
293. Pod *zwiększonym ciśnieniem* zewnętrznym temperatura topnienia i krzepnięcia wogóle *wzrasta*, gdyż cząsteczki materji muszą wtedy podczas topnienia posiadać większą energję, aby rozluźnić się i utworzyć ciecz: podczas krzepnięcia zaś zwiększone ciśnienie pozwala cząsteczkom materji już w wyższej temperaturze wejść w sferę działania sił spójności. Wyjątek z tej ogólnej zasady stanowi woda i wspomniane wyżej inne ciała, ulegające podczas krzepnięcia rozszerzeniu ¹⁾.

Jeżeli woda podczas krzepnięcia w naczyniu zakryta jest u góry ruchomym tłokiem, na który działa prócz ciśnienia atmosfery jeszcze pewna siła P , wówczas w chwili zestalenia się wody tłok będzie uniesiony na pewną wysokość h , co wymaga, jak wiadomo, wykonania pracy mechanicznej w ilości Ph . Niezbędną na to energję woda za-

¹⁾ Wyjątek ten da się prawdopodobnie wytłumaczyć pewną zmianą, jaka zachodzi wówczas w budowie chemicznej cząsteczek tych ciał.

marzająca czerpie z samej siebie, przez co zostaje oziębiona poniżej zera. *Zwiększone ciśnienie obniża więc temperaturę krzepnięcia wody i topnienia lodu.*

294. Własnością tą można wytłumaczyć, np. stapanie się w jedną bryłę drobno potłuczonych kawałków lodu lub śniegu pod silnem ciśnieniem, powolne zsuwanie się lodowców po pochyłościach gór, łatwość jazdy na sankach i łyżwach i t. p. W każdym z tych przykładów lód pod dużem ciśnieniem zamienia się na wodę, która, wchodząc w wolne odstępy pomiędzy kawałkami lodu, znów się tam zestala. Wywierając zapomocą śruby A (rys. 226) bardzo duże ciśnienie na lód, oziębiony poniżej $0^{\circ} \text{C}.$, Mousson przekonał się, że lód pod ciśnieniem śruby całkowicie przechodzi w stan płynny, kulka bowiem B , umieszczona między końcem śruby a lodem, opada wówczas na dno otworu. Bryłę lodu można przeciąć silnie obciążonym drutem, a mimo to rozdzielone jej części spajają się niezwłocznie po przejściu drutu przez lód.



Rys. 226.

295. Niektóre substancje ciekłe, krystalizujące się podczas krzepnięcia, mogą być w pewnych warunkach oziębione poniżej temperatury krzepnięcia pod zwykłym ciśnieniem, przyczem pozostają wciąż w stanie ciekłym. Zjawisko to nosi nazwę *przechłodzenia cieczy*.

Czystą wodę przy zachowaniu zupełnego spokoju i ostrożności można przechłodzić o kilka stopni poniżej $0^{\circ} \text{C}.$ Wystarczy jednak dać wówczas najłżejszy bodziec w postaci wstrząśnienia lub wrzucenia kawałeczka lodu, a natychmiast następuje krzepnięcie, przyczem temperatura przechłodzonej wody raptownie podnosi się do 0° . Krzepnie jednak wówczas nie cała masa wody, lecz tylko ta jej ilość, która odpowiada odjętej przez przechłodzenie ilości ciepła. Jeżeli, na przykład, 10 gr. wody uda się przechłodzić do $8^{\circ} \text{C}.$, wówczas po wstrząśnieniu wytworzy się w niej 1 gr lodu odpowiednio do odjętych $8 \cdot 10 = 80 \text{ kal}$ ciepła.

Jeszcze łatwiej udaje się to doświadczenie z tiosiarczanem sodowym (tak zw. utrwalaczem fotograficznym), który topi się w temperaturze powyżej $50^{\circ} \text{C}.$, następnie, jednak może być przechłodzony w stanie ciekłym do zwykłej temperatury pokojowej. Dopiero po wrzuceniu kryształka tiosiarczanu następuje gwałtownie zestalenie się cieczy z jednoczesnym wzrostem jej temperatury do $48^{\circ} \text{C}.$

296. Ciepło utajone zostaje pochłonięte nie tylko podczas topnienia ciał stałych, ale również podczas *rozpuszczania* ich w cieczach, gdyż i wtedy pewna ilość energii musi być zużyta na rozproszenie cząsteczek rozpuszczonego ciała w całej masie cieczy.

Energja ta czerpie się głównie z samego roztworu, przez co zachodzi jego *oziębienie*.

Dodając, np., soli kuchennej do lodu, można sztucznie obniżyć temperaturę do -21° ; można również otrzymać oziębienie, dodając do lodu salmaku (do -16°) albo chlorku wapnia (do -50°).

Obecność rozpuszczonej soli krystalicznej w cieczy zawsze obniża jej temperaturę krzepnięcia.

Raoult i van't Hoff, opierając się na tem zjawisku, opracowali metodę, pozwalającą oznaczać zawartość rozpuszczonych substancji oraz ich ciężary cząsteczkowe z obniżenia temperatury krzepnięcia ich roztworów wodnych.

B. Parowanie i skraplanie.

297. Cząsteczki cieczy (a przy nieznacznym ciśnieniu zewnętrznym również niektórych ciał stałych), położone niedaleko od powierzchni swobodnej, posiadają niekiedy tak znaczny pęd, że wykraczają wskutek tego ze sfery działania sił spójności i stając się wolnymi, ulatują w otaczającą przestrzeń. W ten sposób odbywa się podług teorii kinetycznej zjawisko *parowania*.

W temperaturach niezbyt wysokich parowanie może zachodzić tylko na powierzchni cieczy (i niektórych ciał stałych). Rozproszeniu się wszystkich naraz cząsteczek ciała stoi na przeszkodzie ich spójność oraz ciśnienie: zewnętrzne i hydrostatyczne.

298. Po odpowiednim jednak dopływie energii cieplnej i podniesieniu temperatury cieczy cząsteczki jej mogą zyskać znaczny pęd i energję kinetyczną, które wystarczają na pokonanie sił spójności i ciśnienia. Parowanie odbywa się wówczas w całej masie cieczy i ma przebieg burzliwy, który zwiemy *wrzeniem*.

Wrzenie cieczy (w zjawisku zaś odwrotnem skraplanie się pary) odbywa się w pewnej ściśle określonej temperaturze, zależnej od ciśnienia. Przez cały czas zjawiska temperatura ta pozostaje *niezmienną*. Dla wody, np., pod normalnym ciśnieniem atmosfery (760 mm) temperatura ta wynosi, jak wiadomo, 100° C.

299. Podczas parowania zostaje pochłonięta duża ilość energii, niezbędna do rozproszenia cząsteczek cieczy; podczas zaś skraplania się pary taka sama ilość energii musi być odjęta od materji, aby cząsteczki jej dostatecznie zbliżyły się ku sobie i utworzyły ciecz. Ponieważ energja ta zużywana jest na *wewnętrzną* zmianę budowy samej materji, stąd nie może być ujawniona zapo-

mocą termometru i nosi nazwę *ciepła utajonego parowania*, względnie *skraplania*. Ciepło to dla wody wyraża się liczbą 539 *kal.* na każdy gram masy (albo 539 *Kal.* na 1 kg. pod ciśnieniem normalnym 760 mm rtęci). Woda przewyższa pod tym względem wszystkie inne ciała przyrody.

Ciepło parowania wody, obliczone w jednostkach pracy, stanowi: $539.427 = 230040$ Kg.m. Koń parowy na wytworzenie takiej ilości pracy potrzebowałby czasu $= \frac{230040}{75 \cdot 60} = 51$ minut, czyli prawie całą godzinę.

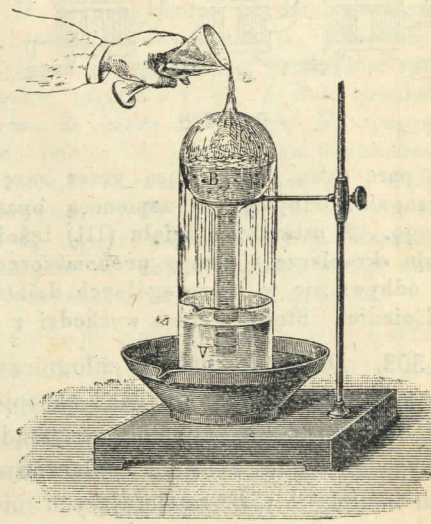
300. Ogromna ta ilość ciepła utajonego wody i pary wodnej ma bardzo ważne znaczenie w przyrodzie i w zastosowaniach praktycznych. Obecność dużych wodozbiorów oraz pary wodnej w atmosferze zapobiega gwałtownym wahaniom temperatury, z jednej bowiem strony podczas ogrzewania się powietrza pochłania dużo ciepła woda parująca, z drugiej zaś strony podczas przepływania zimnych prądów powietrza również dużo ciepła wydziela para, zawarta w atmosferze. Para wodna ze względu na znaczny zapas utajonej w niej energii cieplnej znajduje szerokie zastosowanie w życiu codziennym, technice i przemyśle, służąc jako znakomity środek ogrzewniczy.

Ciepło utajone parowania wynosi:

dla rtęci	62
„ tlenu	51
„ alkoholu	205

301. Pod *zmniejszonym* ciśnieniem wrzenie cieczy i skraplanie pary odbywa się w temperaturze odpowiednio *niższej*.

Łatwo przekonywamy się o tem, łącząc wewnątrz naczynia, w którym gotuje się woda z pompą pneumatyczną albo aspiratorem wodnym. Wrzenie odbywa się wtedy w temperaturze niższej od 100° C. Jeszcze prostsze doświadczenie udaje się z kolbą szklaną (rys. 227), napełnioną do połowy wodą. Po zagotowaniu i wypędzeniu



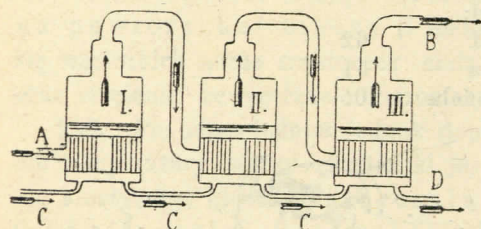
Rys. 227.

powietrza usuwamy źródło ciepła, zatykamy kolbę szczelnie i przewracamy do góry dnem. Nad wodą znajduje się wówczas w kolbie tylko para, której ciśnienie skutkiem oziębienia szybko się zmniejsza, zwłaszcza, jeżeli kolba zostanie polana nazewnątrz zimną wodą. Im silniejsze jest jednak oziębienie, tem burzliwiej odbywa się wrzenie stygnącej wciąż wody wewnątrz kolby, wywiązują się z niej, bowiem, wtedy wciąż nowe ilości pary, która skrapla się na ściankach kolby i spływa z powrotem na dół.

Im wyżej nad poziomem morza leży jaka miejscowość, tem posiada niższą temperaturę wrzenia wody. (W Zakopanem, np., na wysokości 827 m temperatura ta wynosi tylko $97^{\circ},3$ C).

Pod zmniejszonym ciśnieniem ciecz wrząca wydziela ogromne ilości energii cieplnej z samej siebie, wobec czego znacznie się oziębia, pozostała zaś jej resztką, wrząc nieustannie, może się nawet zestalić. Uczucie zimna, jakiego doznajemy po zwilżeniu ciała cieczą, zwłaszcza łatwo parującą, np. spirytusem, eterem siarczanym i t. p. również tłumaczy się odjęciem od ciała znacznej ilości ciepła, niezbędnego na odparowanie tej cieczy.

302. W technice zjawisko to znajduje zastosowanie na szeroką skalę w tak zwanych tężniach oraz maszynach chłodniczych.



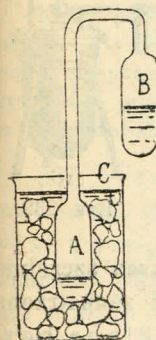
Rys. 228.

Tężnie używane, np., w cukrowniach, warzelniach soli i t. p. służą do szybkiego odparowywania wody z rozczywnów przez gotowanie ich pod zmniejszonym ciśnieniem. W tym celu rozczywny, podlegający stężeniu, przepuszczany jest kolejno rurami C (rys. 228) przez poszczególne działy tężni I, II, III i t. d. W dziale I rozczywny ogrzewany jest parą ostrą, wpływającą przez rurę A, w każdym zaś następnym dziale ogrzewanie odbywa się zapomocą oparów, wychodzących z działu poprzedniego. Z ostatniego działu (III) tężni para i gazy odprowadzane są rurą B do skraplacza i pompy pneumatycznej. Tym sposobem parowanie i wrzenie odbywa się w poszczególnych działach w coraz to niższej temperaturze i ciśnieniu. Stężona ciecz wychodzi z ostatniego działu tężni rurą D.

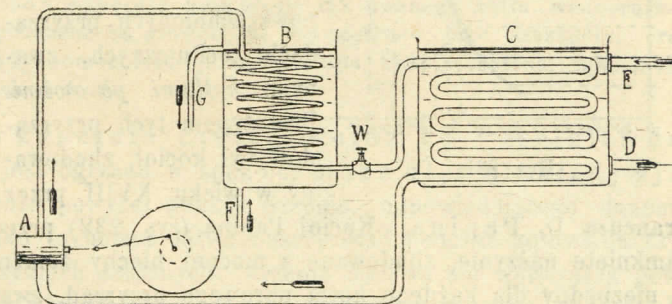
303. Działanie maszyn chłodniczych polega na sztucznem zwiększeniu parowania cieczy lub gazu skroplonego. Zasadę tę można zilustrować doświadczalnie zapomocą przyrządu, zwanego krioforem (rys. 229), który się składa z dwóch połączonych z sobą i starannie odpowietrzonych baniek A i B, zawierających nieco wody lub innej cieczy. Jeżeli bańkę A poddać silnemu oziębieniu, np. przez zanurzenie do mieszaniny lodu z solą kuchenną, wówczas, wskutek silnego parowania, temperatu-

ra w bańce B szybko się obniża, znajdującą się zaś w niej ciecz może skrzepnąć.

304. Na podobnej zasadzie oparty był pierwotny typ przyrządów chłodniczych Carré'ego. W budowie ulepszonej instalacja chłodnicza składa się (rys. 230) z pompy A, włączającej łatwo skraplany gaz, np., dwutlenek siarki (SO_2) lub amonjak (NH_3) do węzowato zwiniętej rury w naczyniu B. Pod wpływem wysokiego ciśnienia i jednoczesnego oziębienia zapomocą zimnej wody (wpływającej przez rurę F, a wypływającej przez G), gaz się skrapla, poczem po otwarciu zaworu redukcyjnego W zostaje przeprowadzony do obszernej, również węzowato zwiniętej rury w naczyniu C. Parując i szybko rozprężając się w tej rurze, gaz ulega znacznemu oziębieniu i odbiera przytem znaczną ilość ciepła od otaczającej go cieczy.



Rys. 229.



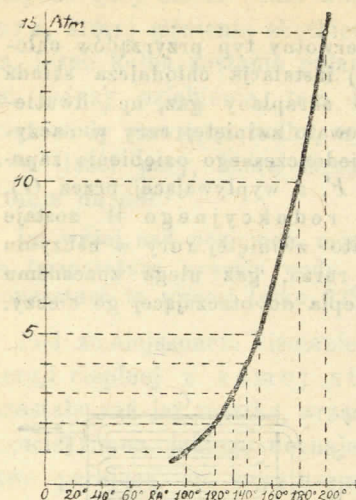
Rys. 230.

Jeżeli cieczą tą jest stężony roztwór soli kuchennej, temperaturę jego można wtedy doprowadzić do kilku stopni poniżej zera. Oziębiony w ten sposób roztwór może być przez otwór D rozprowadzony po całej sieci rur i użyty do oziębiania powietrza w śpiżniach, piwnicach i t. p., gdzie umożliwia konserwowanie przez długi czas łatwo psujących się produktów spożywczych, np.: mięsa, mleka, jaj, owoców, jarzyn i t. p. Z sieci chłodniczej ogrzany nieco roztwór solny powraca do naczynia C rurą E, rozprężony zaś gaz dostaje się z powrotem do pompy A, gdzie ulega ponownemu sprężeniu i w ten sposób czynność instalacji odbywa się bez przerwy. Oziębiony roztwór solny może służyć do fabrykacji lodu sztucznego, który z łatwością można otrzymywać, zanurzając do tego roztworu naczynia blaszane, napełnione czystą wodą. Technika chłodnictwa wobec ważnego swego znaczenia w handlu i przemyśle szybko się obecnie rozwija i udoskonala.

305. Pod zwiększonym ciśnieniem podwyższa się odpowiednio temperatura wrzenia i skraplania, ciśnienie jednak wzrasta przytem znacznie prędzej, niż temperatura, co widać, np., z następującej tabelki dla wody:

Ciśnienie w atmosferach	1	2	3	4	5	10	15
Temperatura wrzenia	100°	120°	133°	143°	151°	180°	197°

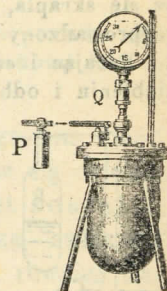
Na mocy tej tabelki można sporządzić wykres (rys. 231) ilustrujący szybkość zmian ciśnienia przy nieznacznych zmianach temperatury wrzenia. Ostatni punkt otrzymanej linii krzywej wskazuje, że piętnastokrotnemu powiększeniu ciśnienia (15 Atm) odpowiada niespełna dwukrotne (197°) powiększenie się temperatury, w której odbywa się wtedy wrzenie i parowanie wody.



Rys. 231.

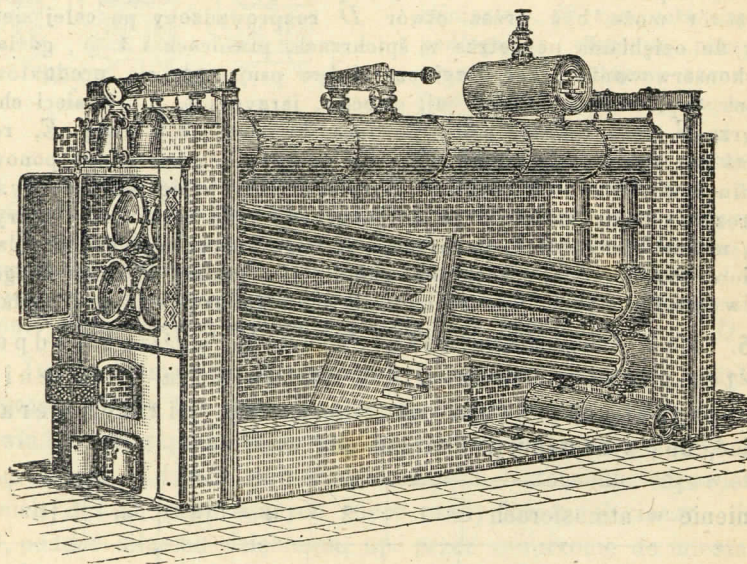
306. Sztuczne podwyższenie temperatury wrzącej wody i pary przez zwiększenie ciśnienia zachodzi w bardzo dziś rozpowszechnionych przyrządach technicznych, zwanych *kotłami parowymi*.

Prototypem tych przyrządów był kocioł, zbudowany w wieku XVIII przez



Rys. 232.

Francuza D. Papina. Kocioł Papina (rys. 232) przedstawia szczerze zamknięte naczynie, zbudowane z mocnej blachy żelaznej i zaopatrzone w niezbędny dla każdego kotła parowego przyrząd, zwany *kłapą bezpieczeństwa*. W kotłach tego rodzaju odbywa się rozgotowywanie kości w celu otrzymania z nich kleju, gotowanie mydła, masy papierniczej i t. p.



Rys. 233

Kłapa bezpieczeństwa jest dźwignią 2-go rodzaju, obciążoną na końcu dłuższego ramienia siłą P , krótszym zaś ramieniem równoważąca siłę (Q) ciśnienia pary na kłapę. Mając wiadomy stosunek ramion dźwigni dłuższego do krótszego ($m : n$), obciążenie P w Kg na końcu tej dźwigni, oraz powierzchnię a otworu kłapy (w cm^2), można obliczyć największą siłę (Q), wywieraną przez parę na kłapę, oraz największe możliwe ciśnienie (p) w Kg/cm^2 pary w całym kotle z wzorów:

$$Q = p \cdot a = P \cdot \frac{m}{n};$$

skąd:

$$p = \frac{P}{a} \cdot \frac{m}{n}.$$

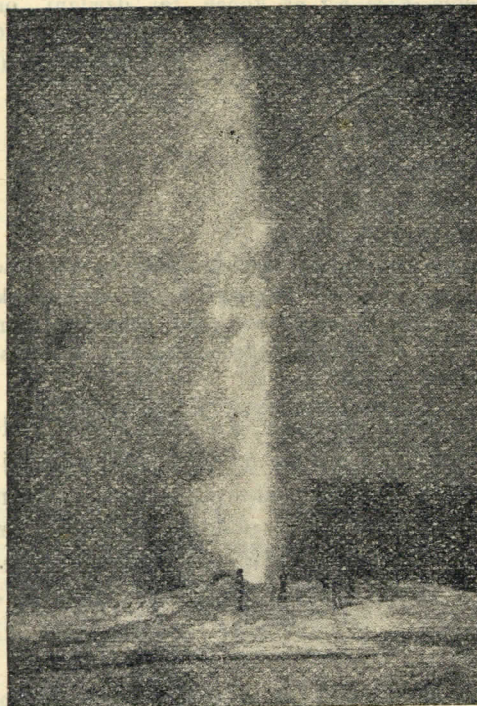
Kotły parowe, używane w technice, posiadają najrozmaitszą budowę i wymiary. Rysunek 233 wyobraża urządzenie tak zwanego kotła wodnorurkowego, przyczem pokazane są główne części wewnętrzne jego szczegóły, oraz niezbędne przyrządy pomocnicze, jako to: kłapa bezpieczeństwa, manometr, szklka wodowskazowa i t. d.

307. Ciecz zupełnie czysta, wolna od wszelkich domieszek, gdy jest ogrzana w spokoju, może ulec niekiedy zjawisku *przegrzania* powyżej punktu wrzenia, odpowiadającego danemu ciśnieniu. Zjawisko to można łatwo obserwować podczas gotowania czystej wody w naczyniach szklanych: wrzenie odbywa się wówczas z pewnymi przerwami wybuchowo. Można uniknąć tego przez dodanie do wody powietrza, piasku, pumeksu i t. p., obecność bowiem tych ciał uniemożliwia zjawisko przegrzania.

Ze względu na to, że materja w stanie pary zajmuje bez porównania większą objętość, niż w stanie ciekłym, zjawisko przegrzania cieczy może stać się bardzo niebezpiecznym. W szczególnym stopniu dotyczy to kotłów parowych, gdyż objętość pary wodnej w temperaturze 100° C jest blisko 1700 razy większa od objętości wody w tej samej temperaturze. Nieznaczne więc nawet przegrzanie wody w kotle może stać się przyczyną wybuchu i katastrofy.

W przyrodzie na olbrzymią skalę odbywa się to zjawisko w źródłach gorących perjodycznych, zwanych *gejzerami* (rys. 234) i działających w pobliżu wulkanów (na Islandji, Nowej Zelandji, w słynnym „Parku Narodowym” w Ameryce Północnej i t. p.). Jak to wyjaśnił słynny uczony niemiecki Bunsen, perjodyczne wybuchy gejzerów pochodzą wskutek ogrzania, a następnie znacznego przegrzania (do 25—27° C.) ciepłym podziemnym dużych mas wody, zebranych na dnie gejzerów w stożkowatych zagłębieniach z wąskim wylotem do góry. Po upływie pewnego, ściśle określonego czasu w przegrzanej masie wody zaczynają się wybuchy pary narazie nieznaczne. Gdy jednak wskutek odpowiedniego zmniejszenia się ciśnienia cała prawie zawarta w gejzerze ilość wody może raptownie zamienić się na parę, następuje potężny wybuch

ogólny, wyrzucający całą zawartość gejzeru na dziesiątki metrów w górę. Oziębiona po tym wybuchu woda spływa ponownie do gejzeru i ogrzewa się, a następnie przegrzewa aż do chwili następnego wybuchu. Zjawisko powtarza się więc okresowo z nadzwyczajną prawidłowością.



Rys. 234.

308. Zjawisko odwrotne do przegrzania wody nosi nazwę *przechłodzenia pary* i polega na tem, że para po dojściu do temperatury skraplania, odpowiadającej danemu ciśnieniu, nie skrapla się, lecz zostaje przechłodzona poniżej tej temperatury, pozostając wciąż parą. Zjawisko takie może zachodzić wtedy, gdy para jest kompletnie czysta, wolna od wszelkich zawiesin, pyłków kurzu, oraz od tak zwanych jonów elektrycznych, czyli swobodnych elementar-

nych ładunków elektryczności, unoszących się w powietrzu. Przekonano się, że zjawisko skraplania pary wogóle możliwe jest tylko dzięki obecności w niej owych zawiesin albo jonów, które są wówczas jądrami skupiających się dookoła nich kropelek mgły, a następnie cieczy. Bez tych domieszek powietrza nie byłyby wcale możliwe opady atmosferyczne: deszcz, śnieg i grad.

309. Obecność substancyj, rozpuszczonych w cieczy, utrudnia jej wrzenie i podnosi temperaturę wrzenia roztworu. Można to stwierdzić, dodając do czystej wody jakiegokolwiek soli rozpuszczalnej i mierząc temperaturę wrzenia roztworu.

Z podwyższenia tej temperatury może być obliczona, zapomocą wspomnianej wyżej metody Raoult'a i van't Hoff'a, ilość oraz ciężar cząsteczkowy rozpuszczonych substancyj.

310. W związku z parowaniem cieczy pozostaje osobliwe zjawisko tak zw. stanu sferoidalnego, wytłumaczonego po raz pierwszy przez fizyka francuskiego Bontigny. Zjawisko polega na tem, że woda, wpuszczona w niewielkiej ilości na mocno rozżarzoną powierzchnię metalową, paruje na niej nie raptownie, lecz powoli, przybierając kształt sferoidy (kuli spłaszczonej). Szybkie parowanie, połączone z wrzeniem, zachodzi dopiero wtedy, gdy powierzchnia metalu dostatecznie się oziębi. Zjawisko tłumaczy się tem, że wskutek wysokiej temperatury rozżarzonego metalu pomiędzy jego powierzchnią a wodą tworzy się warstewka pary, posiadającej bardzo słabe przewodnictwo cieplne. Woda wskutek tego ogrzewa się i paruje bardzo wolno, nie dochodząc do wrzenia. Na tem samem zjawisku oparte są niektóre efektowne popisy magiczne, jak dotykanie obnażonemi rękami lub nogami przedmiotów rozżarzonych, przecinanie ręką płynnej strugi żelaza, lykanie ognia i t. p.

§ 35. Własności par. Higrometrja.

311. Cząsteczki materji, ulatujące z cieczy podczas parowania lub wrzenia, tworzą parę czyli lotny stan materji, własnościami swemi do pewnego tylko stopnia przypominający gazy ¹⁾.

Para, gdy jest zamknięta w naczyniu, sprawia tam ciśnienie, podług znanego już z mechaniki gazów prawa Daltona (patrz § 25, art. 223). Na mocy tego prawa ciśnienia cząstkowych w naczyniu zamkniętem, zawierającym mieszaninę różnych gazów i par, panuje ciśnienie, równe sumie ciśnień, jakie każda z tych substancyj lotnych posiadałaby, gdyby sama tylko wypełniała daną przestrzeń w tej samej temperaturze.

312. W danej temperaturze i w danej objętości prężność pary, zgodnie z teorią kinetyczną materji, jest proporcjonalna do ilości pary, niezależnie od obecności w tej samej przestrzeni innych par lub gazów. Tylko ta jedynie zachodzi różnica, że w próżni ciśnienie ustala się momentalnie, wówczas, gdy w przestrzeni, zawierającej już inne substancje lotne, cząsteczki pary muszą wpierw utorować sobie drogę między niemi, wobec czego ciśnienie pary ustala się wtedy dopiero po pewnym czasie. Parowanie odbywa się jednak prędzej i energiczniej, jeżeli gaz, w którym rozchodzi się para, jest w ruchu. Dlatego to podczas wiatru przedmioty wilgotne wysychają prędzej, niż w powietrzu spokojnem.

¹⁾ Białawe kłęby, wydobywające się z naczynia, w którym gotuje się woda, lub z komina lokomotywy, nie są już parą, lecz mgłą, złożoną z drobnych kropelek cieczy. Parą zaś staną się dopiero wtedy, gdy rozplyną się i rozpuszczą w powietrzu.

313. Ponieważ cząsteczki pary posiadają mniejszą energję kinetyczną, niż cząsteczki gazu, stąd przy zbyt wielkiem nagromadzeniu się pary w danej objętości następuje wreszcie taki kres, kiedy cząsteczki pary wskutek dostatecznego zbliżenia się ku sobie wchodzić w sferę działania sił spójności, a para ulega wskutek tego częściowemu skropleniu. Dalszy wzrost jej ciśnienia staje się już w tych warunkach niemożliwym, przy dopływie zaś nowych ilości następuje tylko dalsze skraplanie, *ciśnienie zaś pary pozostaje wtedy bez zmiany.*

Prawo to może być potwierdzone zapomocą przyrządu (rys. 235), składającego się z dużego naczynia *A*, z którego przez otwór *B* usuwa się możliwie dokładnie powietrze zapomocą pompy pneumatycznej. Stopień tego wypróżnienia wskazuje połączony z naczyniem manometr lub próżniomierz *M*. W górnej części naczynia *A* znajduje się połączony z nim lejek *C*, ze szczelnym kurkiem, pozwalającym wpuszczać do naczynia *A* małe ilości łatwo parującej cieczy, np. alkoholu lub eteru. Wchodząc do przestrzeni odpowietrzonej, substancja ta momentalnie zamienia się na parę, której ciśnienie można zmierzyć z obniżenia się słupka rtęci w próżniomierzu *M*. Po kilkakrotnem wpuszczeniu cieczy z lejka *C*, można wreszcie zauważyć, że ciśnienie pary w naczyniu *A* prze-

Rys. 235.

staje się powiększać, wpuszczona zaś ciecz zbiera się kroplami na dnie naczynia i dalej nie paruje.

314. Po dojściu do tego kresu para staje się *nasyconą* i zmienia wówczas zasadniczo niektóre swoje własności fizyczne. Im dalej od tego kresu leży para *nienasycona*, tem bardziej jej własności fizyczne przypominają własności gazów. Para nienasycona ulega, np., w pewnym stopniu prawom Boyle-Mariotte'a i Charles'a-Gay-Lussac'a, po dojściu, natomiast, do stanu nasycenia para *prawu Boyle-Mariotte'a nie ulega już wcale*. Zmniejszenie jej objętości powoduje wówczas tylko częściowe *skroplenie*, zwiększenie zaś objętości, w zetknięciu z cieczą powoduje natychmiast *wydzielenie się nowej ilości pary*, wobec czego ciśnienie jej pozostaje wciąż niezmiennie.

Prężność pary nasyconej zależy tylko od jej temperatury; ze wzrostem temperatury w obecności cieczy zwiększa się w danej przestrzeni ilość pary oraz jej ciśnienie, zmniej-

szczenie zaś temperatury powoduje zmniejszenie ciśnienia i częściowe skroplenie pary.

315. Jeżeli jednak para nasycona zostanie ogrzana *w nieobecności cieczy*, z której powstała, wówczas z nasyconej staje się ona *nienasyconą*. Dlatego to parę nienasyconą zowiemy niekiedy *przegrzaną*.

Z pary nasyconej można ją więc otrzymać dwoma sposobami:

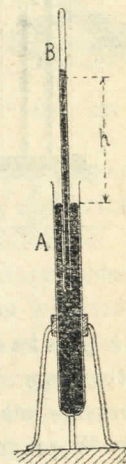
- 1-o) przez zwiększenie objętości, lub
- 2-o) przez zwiększenie temperatury, ale *w nieobecności cieczy*, z której para powstaje.

Przeciwnie, przez zmniejszenie objętości czyli zgęszczenie, albo też przez zmniejszenie energii, czyli oziębienie, para nienasycona może być doprowadzona do stanu nasycenia i skroplona.

Dalton wykazał nadto, że prężność i temperatura pary nasyconej odpowiadają zawsze ciśnieniu i temperaturze, w których odbywa się *wrzenie* cieczy, wydzielającej tę parę.

316. Wszystkie wymienione wyżej własności fizyczne par mogą być sprawdzone w następujących doświadczeniach:

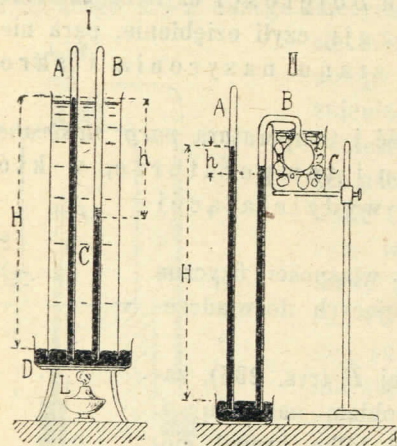
1. Do zwykłej rurki barometrycznej *B* (rys. 236), zawierającej rtęć i zanurzonej w głębokim naczyniu *A*, wpuszcza się od dołu zapomocą pipetki kilka kropeł cieczy badanej. Ciecz ta szybko wznosi się w rurce do góry i momentalnie wyparowuje w próżni Torricelli'ego, przyczem wysokość (*h*) słupka barometrycznego ulega stopniowemu zmniejszeniu i ustala się wreszcie z chwilą, gdy para w górnej części rurki jest już nasycona, ciecz zaś, wpuszczona do rurki w nadmiarze, przestaje już w niej parować. Zanurzając wówczas mniej lub więcej rurkę *B* w naczyniu *A* z rtęcią, można się przekonać, że wysokość (*h*) słupka barometrycznego, a zatem i ciśnienie pary nie ulegają żadnym zmianom, dopóki para jest w stanie nasycenia, a w górnej części barometru pozostaje niewielka ilość cieczy. Wystarczy jednak ogrzać odpowiednio rurkę z zewnątrz, albo też wysunąć ją z naczynia *A* tak wysoko, aby ciecz zupełnie w niej wyparowała, a otrzymamy już wtedy parę *przegrzaną*, względnie nienasyconą, której ciśnienie jest inne, niż pary nasyconej w tych samych warunkach. Zwiększa się ono po *przegrzaniu*, względnie zmniejsza się po zwiększeniu objętości.



Rys. 236.

Prężność pary rozmaitych substancji nie jest jednakowa. Prężnością większą od pary wodnej odznacza się, np. para alkoholu; jeszcze większą prężność posiada para eteru siarczanego, natomiast prężność pary rtęciowej jest znikomo mała. Można to stwierdzić, wpuszczając do kilku rurek barometrycznych różnych cieczy i mierząc ciśnienie ich par.

317. Ciśnienie pary nasyconej w różnych temperaturach można wyznaczać zapomocą przyrządów Daltona, z których jeden (rys. 237, I) służy do temperatur wysokich, drugi zaś (rys. 237, II)—do niskich. Każdy z tych przyrządów składa się z dwóch rurek barometrycznych, z których jedna (A) wskazuje panujące w danej chwili ciśnienie atmosferyczne (H), druga



Rys. 237.

zaś (B) zawiera parę nasyconą substancji badanej i pozwala oznaczyć jej ciśnienie z różnicy (h) wysokości poziomów rtęci w rurkach A i B. Powiększanie temperatury w pierwszym z tych przyrządów skutecznia się za pośrednictwem naczynia C z wodą, ogrzewaną u dołu zapomocą palnika L. Jeżeli rurka B zawiera parę wodną, można się wówczas przekonać, że w temperaturze 100°C i pod normalnem ciśnieniem atmosfery różnica (h) poziomów rtęci staje się równa $H = 760\text{ mm}$, co oznacza, że para posiada wówczas ciśnienie równe zewnętrznemu ciśnieniu atmosfery; wiadomo zaś, że w tych warunkach odbywa się wrzenie wody.

W przyrządzie drugim górna część rurki barometrycznej B, zakończona kulką, oziębianą jest mieszaniną lodu z solą w naczyniu C, poczem może być oznaczona prężność pary nasyconej dla różnych niskich temperatur. Prężność ta jest wówczas wogóle niewielka.

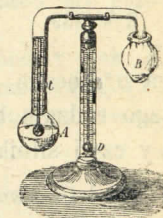
318. Zawartość pary wodnej w pewnym gazie zowie się jego wilgotnością i może być oznaczana dwojako: jako bezwzględna (absolutna) i względna. Przyrządy, służące do oznaczania wilgotności, noszą nazwę higrometrów.

Higrometr do oznaczania wilgotności bezwzględnej składa się zazwyczaj z kilku naczyń, zawierających substancje parochłonne (higroskopijne), np. stężony kwas siarkowy, chlorek wapnia i t. p. Przez naczynia te zostaje przeprowadzona zapomocą aspiratora pewna ilość gazu o wiadomej objętości, poczem przez dokładne ważenie przyrządu

może być oznaczona ilość pochłoniętej z gazu pary wodnej. Stosunek tej ilości do objętości gazu jest wówczas miarą jego wilgotności bezwzględnej.

319. Do użytku praktycznego, np., w meteorologii wystarcza zazwyczaj oznaczenie wilgotności względnej; jest to, mianowicie, stosunek ilości pary wodnej, zawartej w danym gazie, np. w powietrzu atmosferycznem do tej ilości, jaką gaz zawierałby w tej samej temperaturze, gdyby znajdująca się w nim para doszła do stanu nasycenia.

Higrometr Daniela do oznaczania wilgotności względnej (rys. 238) składa się z szerokiej rurki szklanej, zakończonej kulkami A i B. Kulka A zawiera wewnątrz nieco eteru siarczanego i termometr t , część zaś powierzchni tej kulki jest wyłoczona i błyszcząca. Kulka B owinięta jest gazą, po skropleniu zaś tej gazy nazewnątrz eterem ulega oziębieniu, co powoduje energiczne parowanie eteru, oraz oziębienie wewnątrz kulki A. W pewnej temperaturze, wskazywanej na termometrze t , następuje taki moment, kiedy zwierciadlana powierzchnia kulki A naraz matowieje wskutek osiadającej na niej z powietrza rosy. Temperatura, w której zachodzi to zjawisko, czyli tak zwany punkt rosienia, odpowiada, oczywiście, przejściu w stan nasycenia pary, zawartej w powietrzu, stykającym się z oziębioną powierzchnią kulki A.



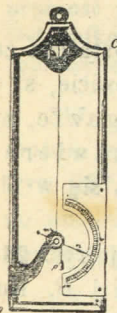
Rys. 238.

Prócz punktu rosienia, oznaczonego z termometru t , należy oznaczyć jeszcze temperaturę (t'), panującą nazewnątrz w powietrzu z termometru, umieszczonego na podstawie (D) higrometru, a wówczas zapomocą specjalnych tablic (tablice takie zostały w swoim czasie sporządzone przez Régnault'a, Zeuner'a, Fliegner'a i innych) można odnaleźć odpowiednie do tych temperatur ciśnienia (p i p') nasyconej pary wodnej. Ponieważ zaś, jak to już wiemy, prężność pary jest miarą jej ilości w danej przestrzeni, przeto stosunek ciśnień $\left(\frac{p}{p'}\right)$ jest miarą wilgotności względnej. Mnożąc ten stosunek przez 100, można go wyrazić w procentach.

Podług przepisów higieny normalna wilgotność, niezbędna dla organizmu ludzkiego, powinna wynosić około 65% . Zbytne zmniejszenie wilgotności poza tę normę (np. w lokalach z ogrzewaniem centralnem) pociąga za sobą niekiedy konieczność sztucznego nawilżania powietrza w mieszkaniach zapomocą odpowiednich przyrządów.

Do niezbyt dokładnych, ale szybkich pomiarów wilgotności względnej może służyć higroskop Saussure'a (rys. 239). W przyrządzie tym

cienki, starannie oczyszczony i odtłuszczony włos umocowuje się jednym końcem w punkcie A , następnie nawija się na oś m i obciąża na drugim końcu ciężarkiem p . Z ruchomą osią m połączona jest wskazówka n , przesuwająca się obok skali, nacechowanej podług higrometru dokładnego. Odpowiednio do zmian wilgotności w powietrzu rozciągnięty włos ulega wydłużeniu lub kurczeniu się, co powoduje ruch wskazówki względem skali.



Rys. 239.

§ 36. Silniki ciepłne (termiczne).

320. Silnikami ciepłnemi zwiemy przyrządy i maszyny, pozwalające przetwarzać energię cieplną par i gazów na użyteczną dla człowieka pracę mechaniczną. Pierwszemi silnikami tego rodzaju były wynalezione na początku ubiegłego stulecia maszyny czyli silniki parowe.

Podstawowe zasady termodynamiczne, którym ulegają zjawiska przetwarzania się ciepła na pracę lub pracy na ciepło, opracował Sadi-Carnot i ogłosił je w słynnym swem dziele p. t. „Sur la puissance motrice du feu” („O potęgę poruszającej ognia”), wydanem w roku 1824.

Obserwując rozmaite procesy termodynamiczne, zachodzące w przyrodzie, Carnot przekonał się, że procesy te nigdy nie są w zupełności *odwracalne*; to znaczy nigdy nie mogą odbywać się w jednym, a następnie w przeciwnym kierunku bez nieuniknionych strat ciepła lub pracy. Do procesów, które przebiegiem swym najbardziej zbliżają się do *odwracalnych*, można zaliczyć np.: ogrzanie — oziębienie, zgęszczenie — rozrzedzenie, topnienie — krzepnięcie, parowanie — skroplenie, reakcje chemiczne rozkładu — reakcje łączenia się i t. p. Do procesów zaś wybitnie *nieodwracalnych* należy zaliczyć: tarcie, rozprężenie gazu podczas wypływu z naczynia i t. p.

Badając warunki teoretyczne wydajności silników ciepłnych, Carnot przyszedł do wniosku, że najwyższa wydajność tych silników możliwa jest tylko w warunkach *idealnych* i przy zastosowaniu *tylko pewnych odwracalnych* procesów termodynamicznych.

321. Przebieg tych procesów, mających nader doniosłe znaczenie w teorii silników ciepłnych, nosi nazwę *cyklu Carnota*. Na cykl ten składają się dwa procesy izotermiczne, oraz dwa tak zwane procesy adjabatyczne, zachodzące naprzemian po sobie w masie pewnej pary lub gazu, użytego do pędzenia silnika.

Proces izotermiczny oparty jest na prawie Boyle-Mariotte'a i polega, jak wiadomo, na stopniowej zmianie ciśnienia (p) i objętości (v) danego gazu lub pary przy zachowaniu pewnej niezmienniej temperatury bezwzględnej (T). Dla gazów doskonałych proces ten wyraża się równaniem (§ 25, art. 226):

$$vp = \text{Const.},$$

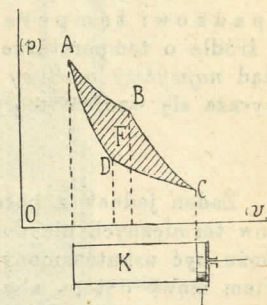
geometrycznie zaś i graficznie przedstawia się w postaci hiperboli równobocznej.

Proces izotermiczny oznacza więc taki przebieg zmian ciśnienia i objętości, przy którym wszelki nadmiar ciepła (przy sprężeniu) zostaje niezwłocznie wydany na zewnątrz, wszelka zaś strata (przy rozszerzeniu) zostaje popelniona z zewnątrz. Warunek ten możliwy jest, jak widać, tylko w teorii, wymaga bowiem, aby ściany naczyń, zawierającego dany gaz lub parę, były absolutnie przenikliwe dla ciepła.

W przeciwieństwie do poprzedniego proces adjabatyczny odbywa się w ten sposób, że ściany naczyń są absolutnie nieprzenikliwe dla ciepła. Wobec tego sprężenie adjabatyczne gazu wywołuje, jako skutek wykonanej przy tem pracy z zewnątrz, odpowiednie podwyższenie jego temperatury, rozprężeniu zaś gazu towarzyszy odpowiednie jego oziębienie, jako skutek pracy, wykonanej przez sam rozszerzający się gaz.

322. Cykl Carnota z zastosowaniem wspomnianych procesów ma przebieg następujący:

1-o. Wnętrze walca K (rys. 240), zaopatrzonego w ruchomy tłok T , łączy się ze zbiornikiem pewnego gazu lub pary o temperaturze *wyższej* (T_1 odpowiadającej punktowi A), poczem następuje rozszerzenie, połączone z ruchem tłoka (na prawo), spadkiem ciśnienia i wykonaniem, pewnej ilości pracy. Ponieważ przez cały czas trwania tego procesu wewnątrz walca K połączone jest ze zbiornikiem gazu lub pary, a temperatura pozostaje niezmienną, wynika stąd proces izotermiczny, który można zobrazować w postaci łuku AB hiperboli. Krzywa ta wyraża stopniowy spadek ciśnienia w związku ze zwiększeniem objętości i ruchem tłoka w walcu, pole zaś, zawarte między łukiem AB , skrajnemi rzędnymi punktów A i B , oraz osią objętości (v), powstaje jako suma iloczynów z ciśnień (p) przez przyrosty objętości (v). Ponieważ zaś przyrostom objętości odpowiadają przesunięcia linjowe tłoka pod ciśnieniem (p), stąd wielkość pola odpowiada *ilości pracy mechanicznej*, wykonanej podczas tego procesu.



Rys. 240.

2-o. Wnętrze walca, którego ściany wyobrażamy jako zupełnie nieprzenikliwe dla ciepła, zostaje następnie odłączone od zbiornika. Zamknięta w walcu para lub gaz rozszerza się wówczas dalej pod własnym ciśnieniem, wytwarzając proces adjabatyczny podług krzywej BC , przyczem znów zostaje wykonana pewna ilość pracy, w postaci pola figury pomiędzy rzędnymi punktów B i C .

3-o. Po dojściu tłoka do końca walca (pod punktem C) następuje połączenie ze zbiornikiem o temperaturze *niższej* (T_2). Jednocześnie tłok zmienia kierunek swego ruchu na przeciwny i wypycha do tego zbiornika zawartość cylindra, co połączone jest ze sprężeniem izotermicznym podług hiperboli CD , przyczem zostaje wykonana odpowiednia ilość *ujemnej* pracy mechanicznej (pole między rzędnymi punktów C i D).

4-o. Pewna pozostała reszta zawartości walca podlega (poczynając od punktu D) w dalszym ciągu sprężeniu zapomocą tłoka, ale już adjab-

tycznie czyli pod warunkiem zupełnej nieprzenikliwości ścian cylindra dla ciepła. Sprężenie odbywa się podług krzywej DA , która zamyka cykl w chwili, gdy ciśnienie wewnątrz walca zrówna się z ciśnieniem zbiornika o temperaturze wyższej w punkcie A .

Uwzględniając wielkość wykonanej pracy dodatniej (pola, ograniczone krzywymi AB i BC) i odejmując od niej wykonaną następnie ilość pracy ujemnej (pola, ograniczone krzywymi CD i DA), otrzymamy pracę wypadkową w postaci pola figury $ABCD$. Taka więc ilość pracy zostaje otrzymana wzamian za obniżenie ciepłoty gazu lub pary w maszynie od temperatury wyższej (T_1) do niższej (T_2) bez żadnych strat i zysków energii.

Taką samą ilość pracy trzeba byłoby zużyć, gdyby cykl Carnota został wykonany w kierunku odwrotnym, to znaczy od temperatury niższej (T_2) do wyższej (T_1), przez sprężenie: izotermiczne (CD) i adjabatyczne (DA), następnie zaś przez rozprężenie: izotermiczne (AB) i adjabatyczne (BC). Na tem polega odwracalność cyklu Carnota.

323. Dowiedziono matematycznie, że cykl ten daje największą ze wszystkich innych cykli termodynamicznych ilość wykonanej pracy mechanicznej, posiada więc z nich wszystkich *najwyższą wydajność energii*.

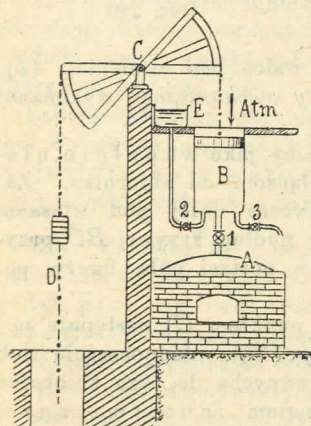
Ponieważ wydajność ta odpowiada całkowitej różnicy, czyli spadkowi temperatur ($T_1 - T_2$), źródła o temperaturze wyższej (T_1) i źródła o temperaturze niższej (T_2), pomiędzy którymi przepływa ciepło, stąd *najwyższy możliwy współczynnik wydajności (k)* silnika cieplnego wyraża się wzorem teoretycznym:

$$k = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Żaden jednak z pośród najdoskonalszych i najlepiej obsługiwanych silników termicznych nie dosięga tego kresu. Cykl Carnota w tych silnikach może być uskuteczniiony tylko w pewnym przybliżeniu, nie może być bowiem mowy o tem, aby ściany cylindrów tych maszyn były absolutnie nieprzenikliwe dla ciepła. Ponadto w silnikach cieplnych zachodzi cały szereg innych strat, obniżających ogólną ich wydajność dynamiczną.

324. Pierwsza, bardzo jeszcze niedoskonała maszyna parowa została wynaleziona i zbudowana w roku 1805 przez pomyslowego rzemieślnika angielskiego Newcomen'a¹⁾. Maszyna ta składała się z kotła parowego A (rys. 241), walca B i poruszającego się w nim tłoka, który za pośrednictwem dźwigni (balansjera) C i łańcucha D wprowadzał w ruch pompę, umieszczoną na dnie szybu kopalni.

Czynność maszyny rozpoczynała się od wpuszczania do walca B pary z kotła przez zawór (1), przyczem siłą tej pary tłok był wypychany do góry. Po zamknięciu zaworu (1) łączono walec ze zbiornikiem E zimnej wody,

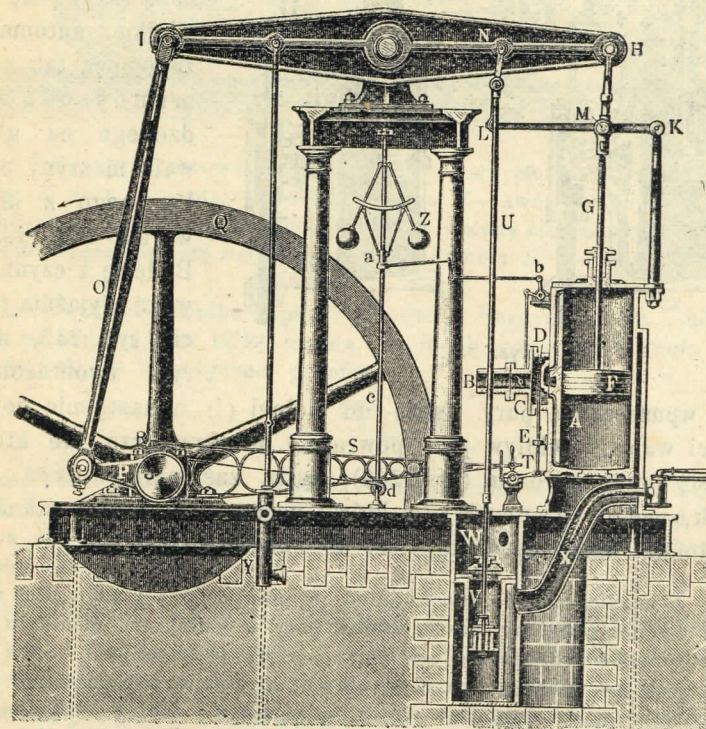


Rys. 241.

¹⁾ Czytaj: Njukomena.

która, wpływając przez zawór (2), powodowała szybkie skroplenie pary i zmniejszenie ciśnienia w walcu. Siłą zewnętrznego ciśnienia atmosfery tłok był wówczas wpychany napowrót do walca (stąd maszynę Newcomen'a zwano atmosferyczną). Nagromadzoną w walcu wodę wypuszczano przez zawór (3), poczem czynność maszyny rozpoczynała się w tym samym porządku na nowo.

325. Maszyna Newcomen'a została w krótkim czasie zastąpiona przez znacznie od niej doskonalszy silnik parowy mechanika szkockiego J. Watta¹⁾. Silnik tego wynalazcy rozpowszechnił się bardzo prędko i z nieznacznymi zmianami i uzupełnieniami w konstrukcji przetrwał do dni dzisiejszych.



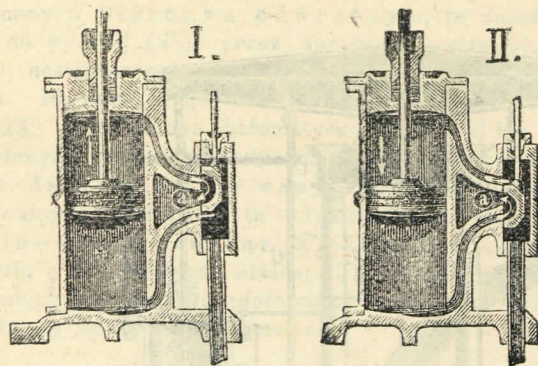
Rys. 242.

Maszyna Watta (rys. 242) urządzona jest tak, że para, dopływająca z kotła przez rurę B , pracuje naprzemian z obu stron tłoka F w walcu A . Gdy z jednej strony tłoka walec zawiera parę ostrą, jednocześnie z drugiej strony para powrotna odpływa z walca do skraplacza X lub wprost do atmosfery. Odprowadzanie ciepłej wody ze skraplacza

¹⁾ Czytaj: Uata.

dokonywane jest zapomocą pompy *V*, połączonej wprost z mechanizmem silnika.

W celu zabezpieczenia spokojnego i jednostajnego biegu maszyny, Watt zastosował ciężkie i masywne koło rozpędowe *Q*, które bezwładnością swą zapobiega zbyt gwałtownym zmianom prędkości w ruchu silnika. Niezależnie od koła rozpędowego został jeszcze dodany właściwy regulator odśrodkowy *Z* (patrz Mechanika § 9, art. 89), zmieniający stosownie do prędkości dopływ pary za pośrednictwem mechanizmu dźwigniowego *ab* i kłapy *C* w rurze parowej.



Rys. 243.

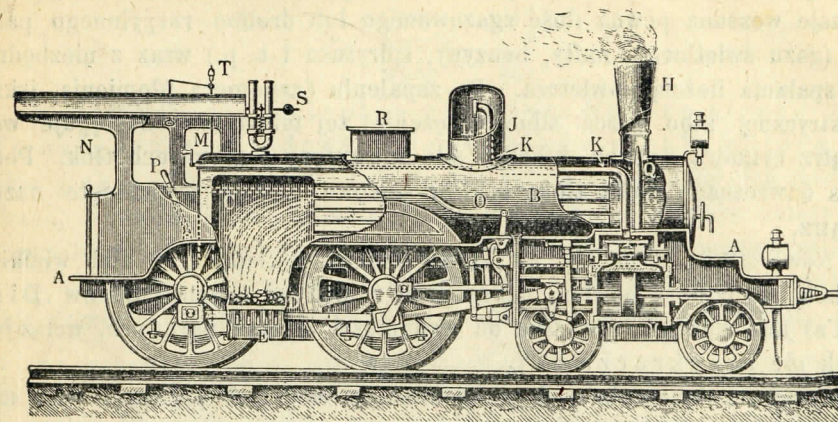
moment wpuszczania pary ostrej do dolnej (I), a następnie do górnej (II) części walca. Odpływ pary powrotnej do skraplacza lub atmosfery odbywa się przez otwór *a* (rys. 243), ostra zaś para wpływa do tak zwanej komory parowej, w której porusza się suwak, stamtąd zaś odpowiednimi kanałami dostaje się do walca.

326. Z nowoczesnych udoskonaleń w konstrukcji i czynności silników parowych wymienić należy: zastosowanie pary o wysokim ciśnieniu (do 15 Atm.) i stopniowe rozprężanie tej pary w kilku połączonych z sobą walcach parowych (tak zw. maszyny compound); użycie pary przegrzanej o wysokiej temperaturze, co zmniejsza straty, powstające wskutek skraplania; znaczne zwiększenie prędkości ruchu maszyn; użycie kranów i wentyli (zaworów), zamiast suwaków rozrządowych i t. d.

Silniki parowe wkrótce po ich wynalezieniu znalazły cały szereg niezmierznie ważnych i pożytecznych zastosowań w technice i przemyśle, stając się przez to jedną z najpotężniejszych dźwigni współczesnej cywilizacji i kultury. Szczególnie ważne jest zastosowanie tych silników do wszelkiego rodzaju lokomocyj.

Pierwszą lokomotywę parową zbudował Anglik J. Stephenson w roku 1825; pierwszym zaś, aczkolwiek bardzo jeszcze niedoskonałym statkiem

parowym posługiwał się Amerykanin Foulton w roku 1803. Urządzenie nowoczesnej lokomotywy pośpiesznej wyobraża rys. 244.



Rys. 244. *B* — kocioł parowy; *C* — palenisko; *F* — rury płomienne w kotle; *J* — zbiornik pary; *K* — rura, prowadząca parę do maszyn; *L* — zawór, regulujący dopływ pary; *M* — regulator do zaworu *L*; *OP* — mechanizm do zmiany kierunku ruchu maszyn; *Q* — rura, odprowadzająca parę zużyłą z maszyn do komina *H*; *S* — kłapa bezpieczeństwa.

327. Czynność silników parowych drogą licznych zmian i udoskonaleń starano się zbliżyć, jak tylko można, do idealnego cyklu Carnota i podnieść ich wydajność do teoretycznej granicy:

$$k = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Właściwym pierwotnym źródłem energii tych silników (o temperaturze wyższej T_1) jest nie para z kotła parowego, lecz gorące gazy, wydobyte z paliwa w paleniskach kotłów. Źródłem zaś o temperaturze niższej T_2 jest skraplacz albo atmosfera.

Jeżeli uwzględnić przytem wszystkie straty energii, zachodzące w kotle parowym (ciepło, uchodzące z dymem, promieniowanie cieplne i t. d.), w przewodach parowych i wreszcie w samym silniku, okaże się wówczas, że najlepsze silniki parowe wydają zaledwie 17% energii w postaci użytecznej pracy mechanicznej. Resztę, t. j. 83%, stanowią bezpowrotne straty.

Wobec tak nikłych rezultatów praktycznych był czas, kiedy myślano powszechnie, że silniki parowe skazane są na zagładę i że powinny być wycofane z użycia, służą bowiem tylko do karygodnego trwonienia nagromadzonych w przyrodzie zapasów energii.

328. Wówczas to uchwycono się pomysłowi użytkowania energii materiałów palnych bezpośrednio w walcach silników. Tą dro-

gą powstały i szybko rozpowszechniły się w użyciu tak zwane *silniki spalinowe (wybuchowe)* różnych typów i konstrukcyj.

Ogólna zasada działania tych silników polega na tem, że do cylindra zostaje wessana pewna ilość zgazowanego lub drobno rozpylonego paliwa (gazu świetlnego, nafty, benzyny, spirytusu i t. p.) wraz z niezbędną do spalania ilością powietrza. Po zapaleniu (zapomocą płomienia, iskry elektrycznej albo przez silne sprężenie) tej mieszaniny następuje wewnętrzny cylindra wybuch, którego siłą, wprawiany jest w ruch tłok. Podczas odwrotnego ruchu tłoka spaliny gazowe zostają wypchnięte na zewnątrz.

Nowe silniki termiczne nie ziściły jednak pokładanej w nich wielkiej nadziei, wydajność bowiem najlepszych z nich (słynnych silników Diesela) jest wprawdzie wyższa od wydajności maszyn parowych, wciąż jednak nie przekracza 27%.

Sprawa zwiększenia wydajności silników cieplnych pozostaje więc nadal palącą sprawą doby obecnej, zwłaszcza wobec ograniczonych zapasów paliwa mineralnego (węgla kamiennego i nafty), jakimi rozporządza nasza przyroda.

§ 37. Rozchodzenie się ciepła.

329. Ciepło może rozchodzić się i udzielać ciałom fizycznym trzema sposobami:

- przez przenoszenie się (konwekcję),
- „ przewodnictwo i
- „ promieniowanie (radjacje).

I. *Przenoszenie się* czyli konwekcja cieplna odbywa się za pośrednictwem ruchomych cząsteczek materji i powoduje znane już zjawisko prądów konwekcyjnych w masie ogrzanych cieczy albo gazów (§ 27, art. 247).

330. II. *Przewodnictwo* cieplne również odbywa się za pośrednictwem materji, z tą jednak różnicą, że przenosi się wówczas nie materja, lecz energja. Ciepło w postaci energii kinetycznej cząsteczek jednych ciał udziela się stopniowo cząsteczkom ciał innych, bez pośrednio z niemi zetkniętych.

W przyrodzie niema zarówno ciał, doskonale przewodzących, jak i ciał, absolutnie nieprzewodzących ciepła. Zdolność przewodnictwa cieplnego posiadają wszystkie ciała w rozmaitym stopniu. Dzielimy je pod tym względem na *dobre i złe przewodniki ciepła*. Do rzędu przewodników dobrych zaliczają się, na przykład, prawie wszystkie metale.

Najwyższe przewodnictwo cieplne posiada srebro. Oznaczając jego przewodnictwo liczbą 100, otrzymamy odpowiednie liczby:

dla miedzi	74
„ żelaza	12
„ ołowiu	8
„ wody	0,1

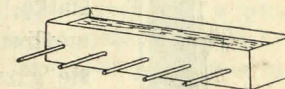
Przewodnictwo cieplne wody jest bardzo nieznaczne, do najgorszych jednak przewodników ciepła należą suche gazy. Złe przewodnictwo cieplne takich materiałów, jak drzewo, słoma, bawełna, wełna, jedwab i t. p., w znacznym stopniu zależy od obecności w nich powietrza. Szkło również jest złym przewodnikiem, a w połączeniu z warstwą powietrza pomiędzy podwójnymi szybami okiennymi doskonale zabezpiecza nasze mieszkania od wyziębienia.

Przewodnictwo cieplne ciał zależy niekiedy od kierunku rozchodzenia się w nich ciepła. Drzewo, na przykład, wzdłuż włókien posiada przewodnictwo trzy razy większe, niż w poprzek; niejednakowem przewodnictwem w różnych kierunkach odznaczają się również kryształy niektórych minerałów, na przykład, gipsu. Są to tak zw. ciała anizotropowe.

331. Pierwotne metody oznaczania przewodnictwa cieplnego różnych ciał prowadziły zazwyczaj do bałamutnych lub wręcz fałszywych wyników, nie domyślano się bowiem, że podczas przechodzenia ciepła przez ciała gra rolę nie tylko ich przewodnictwo, ale i pojemność cieplna.

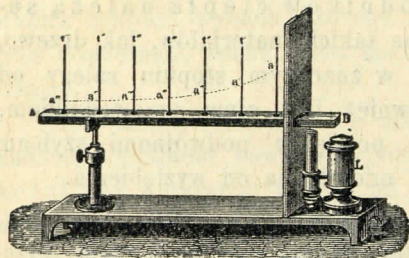
Naprzykład, uczony rosyjski Riechman, obserwując ostyganie dwóch kul o jednakowej masie z miedzi i ołowiu, ogrzanych do jednakowej temperatury, wywnioskował, iż ołów posiada znacznie większe przewodnictwo od miedzi dlatego, że prędzej od niej wystygł. Jest to jednak wniosek fałszywy, który powstał wskutek tego, że ołów posiada znacznie mniejszą pojemność cieplną, prędzej więc utracą ciepło, niż miedź.

W mniejszym wprawdzie stopniu, ale ten sam błąd popełniał przy oznaczaniu przewodnictwa różnych ciał fizyk holenderski Ingenhous. Przyrząd, używany w tym celu przez niego, przedstawiał pudło (rys. 245), zawierające ciecz gorącą, której ciepłem ogrzewały się końce powtykanych do pudła cienkich prętów, wykonanych z różnych materiałów. Powierzchnia prętów była pokryta nazewnątrz warstewką wosku, z prędkości zaś topnienia wosku na różnych prętach można było wnosić o większem lub mniejszem ich przewodnictwie cieplnem.



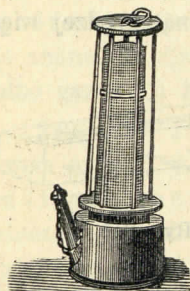
Rys. 245.

Metodę, zupełnie racjonalną i wolną od wpływu pojemności cieplnej, obmyślił fizyk francuski Biot. Jego przyrząd składa się z długiej sztabki AB (rys. 246), wykonanej z materiału badanego i posrebrzonej nazewnątrz w celu zmniejszenia odpływu ciepła przez promieniowanie, oraz w celu wytworzenia jednakowej powierzchni dla wszystkich materiałów badanych. (Patrz dalej art. 334).



Rys. 246.

Koniec B sztabki ogrzewa się lampą L , przyczem wychodzące z niej ciepło promieniste zatrzymuje ekran, ustawiony tuż za lampą. W miarę ogrzewania termometry $t, t', t'' \dots$, umieszczone w równych odstępach wzdłuż sztabki, wykazują stopniowy wzrost temperatury, aż do chwili, gdy wskazania ich przestają się zmieniać, a końce słupków termometrycznych ustawiają się na pewnej stałej krzywej $aa' a'' \dots$, właściwej substancji badanej. Ponieważ dalsze zmiany w zjawisku pomimo nieustannego ogrzewania sztabki już nie zachodzą, oznacza to, oczywiście, stan równowagi termicznej. Cała ilość ciepła, wpływająca przez koniec B sztabki, rozchodzi się wówczas i wypromieniowuje równomiernie na całej jej długości. Stopniowy zaś spadek temperatur po linii $a a' a'' \dots$ jest miarą oporu, który stawia substancja badana przy rozchodzeniu się w niej ciepła. To znaczy, że im większy jest spadek czyli różnica temperatur na końcach tej linii, tem mniejsze jest przewodnictwo cieplne danej substancji.



Rys. 247.

332. Wysokie przewodnictwo metali jest przyczyną ciekawego zjawiska, że płomień gazu świetlnego po przykryciu go siatką metalową nie przedostaje się poza tę siatkę, pochłania ona bowiem tak dużo ciepła, że uniemożliwia otrzymanie temperatury, niezbędnej do palenia się gazu za siatką. Ze zjawiska tego skorzystał chemik angielski Davy ¹⁾ i zbudował lampę ochronną dla górników. Siatka metalowa otaczająca płomień w tej lampie (rys. 247), zapobiega zapaleniu się nazewnątrz lampy gazów wybuchowych, które nagromadzają się w kopalniach węgla i bywają przyczyną katastrof.

333. III. Najzwyczajszą formą rozchodzenia się ciepła w przestrzeni jest promieniowanie. Z rozmaitych swych źródeł energia

¹⁾ Czytaj: Dewi.

cieplna wypływa nieustannie w przestrzeń z olbrzymią prędkością i we wszelkich kierunkach, w postaci nie-widzialnych dla oczu promieni cieplnych.

Materia nie bierze w promieniowaniu cieplnem żadnego udziału, gdyż zjawisko to może się odbywać nawet w absolutnej próżni czyli w tak zw. eterze kosmicznym.

Względem promieni cieplnych różne ciała materialne mogą zachowywać się dwojako: mogą z siebie wypromieniowywać ciepło nazewnątrz, co nazywamy *emisją*, lub też mogą je pochłaniać, co nazywamy *absorbacją cieplną*. Oba te zjawiska dla każdego ciała zachodzą zawsze równocześnie, nie w jednakowym jednak stopniu, co zależy od różnicy temperatur danego ciała i jego otoczenia. Wyróżniamy tu 3 przypadki, mianowicie:

1) Jeżeli ciało posiada temperaturę wyższą od swego otoczenia, natenczas jego *emisja cieplna większa jest od absorbcji*.

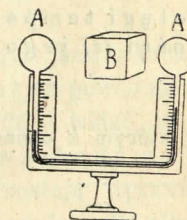
2) Przeciwnie, jeżeli temperatura otoczenia jest wyższa, wówczas *absorbacja ciała większa jest od jego emisji*.

3) Przy zupełnej zaś równości temperatur danego ciała i jego otoczenia, *emisja cieplna równa jest absorbcji*, czyli ciało wówczas tyleż ciepła wysyła, ile go pobiera od swego otoczenia.

334. Zdolność różnych ciał zarówno emisyjna, jak i absorbcyjna zależy, prócz różnicy temperatur i własności wewnętrznych, jeszcze od stanu powierzchni zewnętrznej ciał. Dostrzeżono, mianowicie, że *ciała o barwie ciemnej i powierzchni matowej lub chropawej posiadają w większym stopniu zdolność zarówno emisyjną, jak i absorbcyjną, niż ciała o barwie jasnej, a powierzchni gładkiej*. Wybitnym przedstawicielem ciał pierwszego rodzaju jest sadza, drugiego zaś — srebro polerowane.

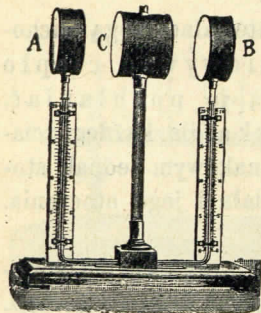
W celu zapobiegania zbyt dużej absorbcji cieplnej naszych ciał w porze letniej na wolnem powietrzu używamy odzieży z materiałów gładkich i jasnych. Przeciwnie, w zimie, ze względu na łatwiejsze pobieranie ciepła z powietrza pokojowego, lepiej jest używać ubrań ciemnych i szorstkich. Piece z białych i gładkich kafli mają na celu zmniejszenie niezdrowego ze stanowiska higieny promieniowania ciepła.

335. Pierwszych badań nad promieniami cieplnymi dokonywali Anglicy: Rumford, następnie Leslie. W doświadczeniach swych Leslie posługiwał się przyrządem (rys. 248) w postaci termoskopu o dwóch kulkach szklanych A , wypełnionych powietrzem i połączonych rurką z ruchomym słupkiem cieczy we-



Rys. 248.

wewnątrz. Pomiedzy kulkami (A) termoskopu Leslie umieszczał naczynie szkiełne B, wypełnione ciepłą wodą. Ściany tego naczynia były wykonane z różnych materiałów badanych. Z przesunięcia słupka cieczy w termoskopie w tę lub ową stronę można było wnosić o wielkości promieniowania z każdej ściany naczynia B.



Rys. 249.

Równość emisji i absorpcji tych samych ciał w jednakowych warunkach temperatury wykazał po raz pierwszy fizyk angielski Ritchie¹⁾. Używał on w tym celu termoskopu (rys. 249), w którym, zamiast kulek, były umieszczane puszki A i B. Płaskie ściany tych puszek były z jednej strony posrebrzone, z drugiej zaś pokryte sadzą. Pomiedzy puszkami A i B ustawiano trzecią taką samą puszkę C, wypełnioną ciepłą wodą.

Jeżeli puszki A i C zwrócone są ku sobie powierzchniami srebrnymi, puszki zaś C i B — poczernionymi, wówczas prawa część termoskopu wykazuje znaczne obniżenie, lewa zaś znaczne podniesienie słupka cieczy, co odpowiada dużej emisji i zarazem dużej absorpcji zwróconych ku sobie powierzchni czarnych, a nieznacznej wymianie ciepła pomiędzy powierzchniami białymi i błyszczącymi. Jeżeli jednak naczynie C zostanie przekręcone tak, aby powierzchnia srebrna była zwrócona ku czarnej z obydwóch stron termoskopu, poziomy cieczy ustawiają się wówczas w rurce na jednakowej wysokości. Większej emisji sadzy odpowiada wtedy stosownie mniejsza absorpcja srebra i przeciwnie.

336. Odkrycie różnych innych własności promieni ciepłych nauka zawdzięcza uczonemu włoskiemu Melloni'emu, o własnościach tych będzie jednak mowa dopiero w dalszych specjalnych rozdziałach o promieniowaniu.

O wielkości emisji cieplnej różnych ciał można wnosić z szybkości ich ostygania. Badania w tym kierunku były dokonywane przez Dulong'a i Petit'a. Na zasadzie tych badań Stefan znalazł prostą zależność między temperaturą ciała a ilością ciepła, które to ciało wydaje w jednostce czasu przez promieniowanie. Ilość wypromieniowanego ciepła (Q) jest, jak okazało się, w przybliżeniu proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury bezwzględnej ciała (T), oraz do wielkości (s) jego powierzchni, co można przedstawić wzorem:

$$Q = k \cdot T^4 \cdot s,$$

w którym k oznacza pewien czynnik proporcjonalności.

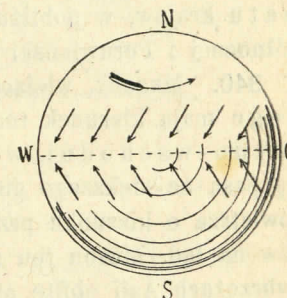
¹⁾ Czytaj: Ritzci.

§ 38. Wiadomości ogólne z meteorologii.

337. Przedmiot meteorologii stanowi badanie czynników fizycznych, od których zależne są różne zjawiska, zachodzące w atmosferze i powodujące zmiany pogody oraz pór roku w różnych miejscowościach na ziemi. Na zasadzie szeregu obserwacji, dokonanych nad pewnymi zjawiskami przez czas dłuższy, oraz zapomocą odpowiednich rachunków, meteorologowie mogą nie tylko trafnie tłumaczyć wiele zjawisk, ale nadto układać mniej lub więcej wiarogodne przepowiednie (horoskopy), dotyczące tych zjawisk na bliższą lub dalszą przyszłość.

338. Najważniejszym czynnikiem fizycznym w zjawiskach meteorologicznych jest niewątpliwie — ciepłota atmosfery. Wynikiem nierównomiernego ogrzania powietrza atmosferycznego są przedewszystkiem ruchy konwekcyjne, odbywające się w postaci wiatrów i burz.

Kierunek i siła wiatrów na ziemi wogóle są zmienne. Prawdopodobnością i stałością kierunku odznaczają się tylko wiatry podzwrotnikowe, zwane pasatami, a na wybrzeżach Azji i Australji — musonami. W najsilniej ogrzanych przez słońce miejscowościach, położonych na równiku (rys. 250), prądy gorącego powietrza unoszą się do góry, na ich zaś miejsce napływają ze stref umiarkowanych północnej i południowej prądy zimniejsze. Gdyby ziemia była nie-



Rys. 250.

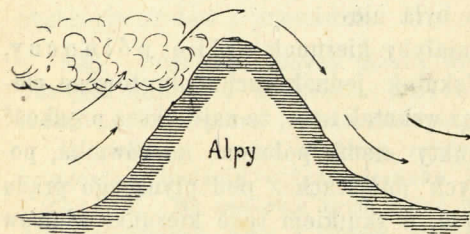
ruchomą, wynikające stąd pasaty miałyby kierunek tylko północny, względnie południowy. Wskutek jednak ruchu obrotowego ziemi z zachodu na wschód, oraz wskutek tego, że największą prędkość linjową w tym ruchu posiadają punkty ziemi, położone na równiku, powierzchnia ziemi usuwa się w tych miejscach z pod płynącego prądu powietrza w kierunku wschodnim, a skutkiem tego kierunki wiatrów podzwrotnikowych ulegają zboczeniu; wynika stąd w półkuli północnej pasat północno-wschodni (NO), w półkuli zaś południowej — pasat południowo-wschodni (SO).

339. Ustawiczne działanie pasatów w niezmiennych kierunkach na powierzchnię wody w oceanach w pasie międzyzwrotnikowym powoduje zjawisko prądów morskich. Z kierunku pasatów (rys. 250) widać, iż wypadkowa ich działania ma w tym pasie kierunek ze wschodu na zachód i w tym właśnie kierunku wody w oceanach zostają wprowadzone w powolny ruch, tworząc w ogólnej swej masie prądy nakształt olbrzymich

mich rzek. Jedna z tych rzek tworzy się w pobliżu zachodnich brzegów Afryki, druga bierze swój początek w pobliżu również zachodnich brzegów Ameryki. Natrafiając na swej drodze lądy Ameryki Południowej, względnie archipelagu Malajskiego, każdy z tych prądów zmuszony jest rozwidlać się na dwa inne prądy, płynące na północ i południe. Zjawisko to zachodzi z jednej strony na północno-wschodnim brzegu Ameryki Południowej, z drugiej zaś strony na południowo-wschodnich brzegach Azji. Utworzone w ten sposób nowe prądy zanoszą ciepłą wodę morską daleko w kierunku biegunów, łagodząc swym działaniem klimat tych okolic (Prąd Brazylijski w Ameryce Południowej, prąd Zatokowy czyli Golfstrom w Europie, prąd Kuro-Sziwo koło Japonji).

Skutkiem nagromadzenia się w ten sposób znacznej ilości wód ciepłych w okolicach podbiegunowych, tworzą się w tych okolicach odwrotnie skierowane prądy zimne. Działanie ich klimatyczne jest również przeciwne. Powodują one oziębienie i surowość klimatu krajów, w pobliżu których przepływają (Prąd Baffina w Ameryce Północnej i Peruwiański w Ameryce Południowej).

340. Musony, wiejące na wybrzeżach Azji, podczas półroczia zimowego mają kierunek ten sam, co i pasaty półkuli północnej, czyli północno-wschodni, w półroczu zaś letnim, wskutek przesunięcia się pasa największego gorąca na wyżynę Azji Środkowej, tworzy się ruch powietrza o kierunku przeciwnym. Wynika stąd muson, wiejący z oceanów na ląd. Muson ten sprawia wówczas na południowych i wschodnich wybrzeżach Azji obfite opady atmosferyczne letnie.



Rys. 251.

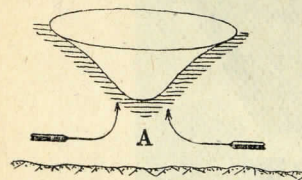
obfite opady we Włoszech, głównie w północnej Lombardji u podnóża Alp. Nadmierna ilość opadów w tych miejscach pochodzi stąd, iż południowy prąd powietrza (rys. 251), dotarłszy do potężnej przegrody, jaką stanowią Alpy, zmuszony jest unosić się do góry i wykonywać pracę kosztem swojej ciepłoty. Powoduje to oziębienie powietrza i obfite opady w postaci t. zw. deszczów elewacyjnych (wzniesieniowych).

Również prawidłowe i pouczające zjawisko przedstawia tak zwany föhn, wiatr zimowy i wiosenny, panujący w Europie środkowej na północ i na południe od Alp. Wiatr ten pochodzi ze skwarnych obszarów Sahary, przelatując jednak nad morzem Śródziemnem, nasycza się wilgocią i powoduje

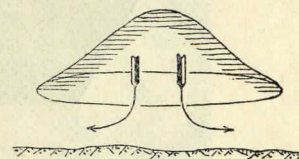
Po przejściu przez grzbiet alpejski na północ prąd powietrza opada na dół, sprężając dolne warstwy atmosfery i powodując przez to ich ogrzanie. Utraciwszy prawie całą swą wilgoć na południowych zboczach Alp, föhn zamienia się wówczas na wiatr ciepły i suchy.

341. Zwykle dorywcze wiatry i burze są wynikiem tak zwanych cyklonów i antycyklonów.

Nadejście *cyklonu* zwiastuje zawsze szybkie opadanie ciśnienia w atmosferze i wreszcie tak zwana zniżka (minimum) barometryczna. Do miejscowości A (rys. 252), gdzie zapanuje taka zniżka, napływają ze wszystkich stron prądy o ciśnieniu wyższem, unoszą się przeto do góry i ulegają oziębieniu, co powoduje zwykle znaczne opady, połączone niekiedy z burzami i nawałnicami.



Rys. 252.



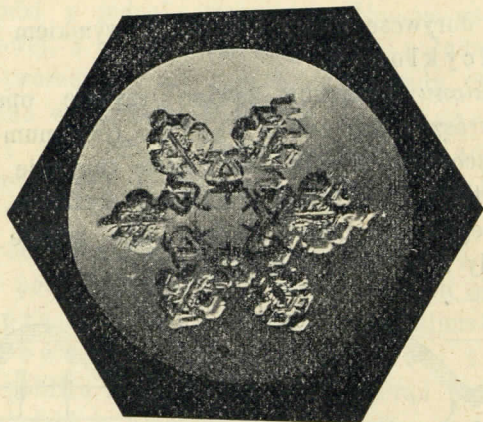
Rys. 253.

Przeciwnie, jeżeli w pewnej miejscowości na ziemi zapanuje wyżka (maximum) barometryczna, wynika stąd *antycyklon* (rys. 253). Podane wysokiemu ciśnieniu masy powietrza spływają wówczas na dół i rozchodzą się z tej miejscowości we wszelkich kierunkach nazewnątrz. Ponieważ takiemu opadaniu powietrza towarzyszy rozgrzanie i zmniejszenie się wilgotności, stąd antycyklon zwiastuje zwykle dłuższy stan pogody i suszy.

342. Prócz pomiarów ciśnienia atmosfery zapomocą dokładnych barometrów stacje meteorologiczne notują również wszelkie zmiany temperatury powietrza, kierunku i siły wiatru (zapomocą tak zw. anemometrów), ilości opadów atmosferycznych (zapomocą tak zw. pluwiometrów czyli deszczomierzy), wilgotności zapomocą higrometrów i t. d. Na racjonalnie urządzonych stacjach notowania te uskuteczniane są za-

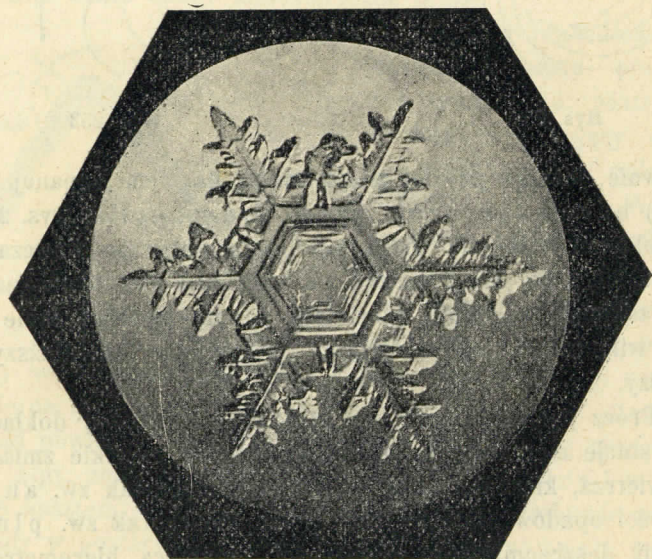
zwyczaj zapomocą przyrządów, zapisujących automatycznie (barografów, termografów i t. p.).

Za pośrednictwem całej sieci stacyj meteorologicznych, nadsyłających nieustannie i szybko (np. zapomocą telegrafu iskrowego) rezultaty swych



Rys. 254.

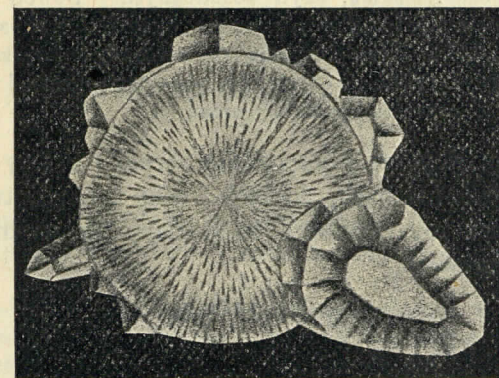
spostrzeżeń do stacyj centralnych, mogą być układane codziennie tak zw. synoptyczne mapy meteorologiczne, dające obraz ogólny stanu atmosfery na całym lądzie Europy w pewnej chwili dnia. Na mapach tych miejscowości o jednakowym ciśnieniu atmosferycznym po-



Rys. 255.

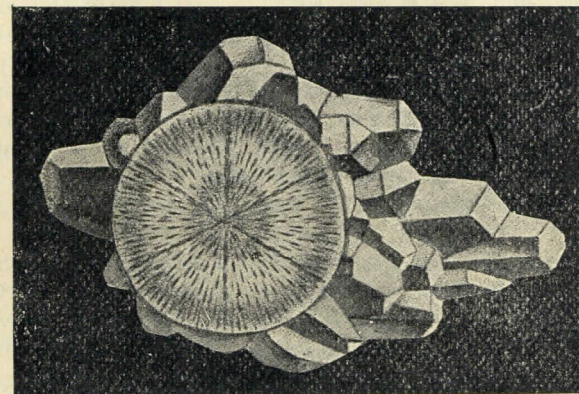
łączone są liniami krzywymi (tak zw. izobarami), które dokładnie określają położenie niżów i wyżów barometrycznych oraz kierunek ich ruchu. Z rozkładu tych linii można czynić bardzo ściśle przepowiednie mających nastąpić cyklonów i antycyklonów, a w związku z nimi stanu pogody.

343. Różnego rodzaju *opady atmosferyczne* są skutkiem wydzielania się w atmosferze nadmiaru pary wodnej pod wpływem oziębienia.



Rys. 256.

Jeżeli prąd zimnego powietrza przepływa w pobliżu powierzchni ziemi, powstaje wówczas skutek przesycenia pary *mgła*. Ta sama *mgła*, powstając w górnych warstwach atmosfery, tworzy *obłoki* i *chmury*.



Rys. 257.

Dalsze oziębienie mgły w chmurach powoduje powstawanie większych kropeł wody, które podczas spadania powiększają się jeszcze bardziej wskutek przystających do nich cząsteczek mgły i tworzą wówczas zja-

wisko *deszczu*; przy jeszcze silniejszym oziębieniu w górnych warstwach atmosfery małe kropelki mgły, zamarzając powoli, łączą się z sobą i tworzą charakterystyczne foremne kryształki (rys. 254 i 255) *śniegu*. Gwałtowne, natomiast, oziębienie chmur, wyniesionych podczas silnych burz na znaczną wysokość, powoduje tworzenie się mniejszych lub większych bryłek lodu, spadających na ziemię w postaci *gradu*.

Są pewne dane, pozwalające mniemać, że bryłki gradu pochodzą niekiedy z przestrzeni pozaziemskich, czyli kosmicznych. Dowód tego przypuszczenia meteorologowie upatrują w niezwykle dużych i wykształconych kryształach (rys. 256 i 257), które znajdują się niekiedy w bryłkach gradu i które mogły się utworzyć tylko po dłuższym przeciągu czasu i prawdopodobnie podczas wędrówki w przestrzeniach kosmicznych.

Mgła, osiadając w porze rannej i wieczornej na szybko stygnących przedmiotach (dachach, liściach roślin i t. p.), tworzy zjawisko *rosy*; podczas mrozu rosa krzepnie, zamieniając się na białą masę krystaliczną, zwaną *szronem*.

KONIEC CZĘŚCI PIERWSZEJ.

DODATEK.

ZADANIA I ĆWICZENIA.

Do § 1.

1. Mając skalę z podziałką w centymetrach, jak zbudować dla niej noniusz, któryby pozwalał mierzyć z dokładnością: a) do $\frac{1}{2}$ mm; b) do $\frac{1}{3}$ mm; c) do $\frac{1}{10}$ mm?
2. Wykonać możliwie starannie miarkę z papieru lub brystolu, podzieloną na centymetry i sprawdzić ją z metrem dokładnym przez kolejne przykładanie. Określić błąd pomiaru.
3. Zapomocą sporządzonej własnoręcznie miarki centymetrowej i noniusza z dokładnością do 0,1 cm zmierzyć krawędzie równoległe starannie wykonanego prostopadłościanu i obliczyć ich średnią wielkość.
4. Sporządzić miary klinowate (kalibry) podług rys. 10 i zmierzyć z ich pomocą grubość paru kawałków drutu, oraz wewnętrzne i zewnętrzne średnice kilku rurek na obu końcach. Czy kształt otworu rurki lub końca drutu nie wpływa na dokładność pomiaru?
5. Śruba mikrometru (rys. 11) ma skok 2 mm. Na ile stopni katowych trzeba obrócić jego bębenek, aby śruba przesunęła się wzdłuż osi na odległość: a) 1 mm; b) $\frac{1}{10}$ mm; c) $\frac{1}{100}$ mm?
6. Wykonać na papierze milimetrycznym rysunek: a) kwadratu; b) prostokąta; c) równoległoboku; d) trapezu; e) trójkąta dowolnego; f) wielokąta dowolnego; g) koła; h) dowolnej figury krzywoliniowej i zmierzyć powierzchnię każdej z tych figur z dokładnością do $\frac{1}{2}$ mm² (to znaczy odrzucając części krątek mniejsze od $\frac{1}{2}$ mm², a przyjmując za całe kratki części ich większe od $\frac{1}{2}$ mm²).
7. Sprawdzić otrzymane w ćwiczeniu poprzednim wyniki pomiarów zapomocą wzorów geometrycznych na obliczanie powierzchni figur.
8. Zmierzyć i obliczyć objętość starannie wykonanego prostopadłościanu, walca albo kuli i sprawdzić ją przez pomiar bezpośredni zapomocą mensury czyli cylindra mierniczego (rys. 14), albo naczynia ze zlewem (rys. 15).
9. Zważyć możliwie dokładnie przedmioty, wymienione w ćwiczeniu poprzednim i obliczyć ich gęstość albo ciężar właściwy.
10. Ciężar szyny żelaznej wynosi 350 kg. Przyjmując gęstość żelaza = 7,8 obliczyć objętość tej szyny.
11. Nagrobek w kształcie płyty, wykonanej z granitu (gęstość = 2,8) ma długość 3,2 m, szerokość 1,3 m i grubość 0,6 m. Ile waży ta płyta?

12. Jaką ilość nafty zawiera wagon-cysterna, mający pojemność 200 hektolitrow, jeżeli gęstość nafty jest 0,8?
13. Belka dębowa (gęstość drzewa dębowego = 0,82) waży 480 kg i ma wymiary poprzeczne 20 cm i 36 cm. Jaka jest długość tej belki?
14. Sześcian miedziany o krawędzi = 8 cm. waży 4,5 kg. Obliczyć stąd gęstość miedzi.
15. Zawiesić ciężarek na nitce długości = 1 m i zmierzyć dokładnie zapomocą licznika sekundowego średni czas trwania wahań tego ciężarka. Uregulować długość nitki tak, aby wahadło mierzyło dokładnie sekundy. (Odliczać po 100 wahań).
16. Zmierzyć i określić, jak zmienia się czas trwania wahań: a) po skróceniu nitki wahadłowej do $\frac{1}{4}$ pierwotnej jej długości; b) po czterokrotnem wydłużeniu tej nitki. Wyprowadzić stąd wniosek co do zależności czasu trwania wahań od długości wahadła.
17. W zegarach wahadłowych podczas gorąca wahadło nieznacznie się wydłuża, od zimna zaś skraca się. Jak wpływają te zmiany długości wahadła na wskazania zegara?
18. Do tej samej nitki wahadłowej uczepić kolejno kulkę metalową i drewnianą tej samej średnicy i zmierzyć w obu wypadkach czas trwania wahań. Jaki wpływ wywiera masa kulki na ruch wahadła?
19. Ile cm/sek wynosi prędkość 20 km/godz.?
Odp. 833,3 cm/sek.
20. W jakim czasie kula armatnia przebyłaby odległość między ziemią a księżycem, wynoszącą 382400 km z prędkością stałą 800 m/sek?
Odp. 5 dni 12 godz. 46 min. 40 sek.
21. Ile czasu zużywa światło na przejście odległości między słońcem a ziemią $s = 150840000$ km, pędząc z prędkością $v = 300000$ km/sek?
Odp. 8 min. 22,8 sek.
22. Pociąg wyrusza ze stacji ruchem jednostajnie przyspieszonym; po upływie 1 min. ruch staje się jednostajnym o prędkości 12 m/sek. Jak wielkie było przyspieszenie? Zbudować wykres zmian prędkości.
Odp. 0,2 m/sek².
23. Jak daleko oddalił się ten pociąg od stacji w chwili, gdy ruch jego stał się jednostajnym? Zbudować wykres funkcji drogi przebytej.
Odp. 360 m.
24. Pociąg wyrusza ze stacji z przyspieszeniem: $a = \frac{1}{3}$ m/sek². W jakiej odległości od stacji pociąg zyska prędkość: $v = 72$ km/godz? Sprawdzić graficznie.
Odp. 1,8 km.
25. Ten sam pociąg po nabyciu prędkości: $v = 72$ km/godz. zostaje zatrzymany działaniem hamulca, przyczem zyskuje opóźnienie ruchu: $a = 0,4$ m/sek? Obliczyć, na ile sekund przed zatrzymaniem pociągu i w jakiej odległości od stacji należy rozpocząć hamowanie. Sprawdzić graficznie otrzymane rezultaty.
Odp. 50 sek; 500 m.
26. Kula karabinowa opuszcza lufę o długości $s = 1,2$ m z prędkością $v = 720$ m/sek. Obliczyć przyspieszenie kuli w lufie.
Odp. 216000 m/sek².

27. Pewne ciało, będące w ruchu jednostajnie przyspieszonym, przebiega w pierwszej sekundzie drogę 20 cm. Jaką drogę przebiega to ciało w dziesiątej sekundzie; po jakim czasie zyskuje prędkość 4 m/sek i jaką drogę przebywa za pierwsze 3 min. ruchu?
Odp. 3,8 m; 1 min; 6480 m.
28. Pociąg pośpieszny, posiadający prędkość 18 m/sek, zostaje zatrzymany działaniem hamulca w ciągu 15 sek. Obliczyć wielkość opóźnienia oraz drogę, przebytą przez ten pociąg do chwili zatrzymania. Wykonać wykresy.
Odp. 1,2 m/sek²; 135 m.
29. Odległość dwóch ciał, poruszających się po jednej linii prostej, w tym samym kierunku ruchem jednostajnie-przyspieszonym, wynosi w pewnej chwili 35 cm; ciało przednie ma w tej chwili prędkość 60 cm/sek i przyspieszenie 17 cm/sek²; tylne zaś prędkość 40 cm/sek i przyspieszenie 27 cm/sek². Po jakim czasie ciało drugie dogoni pierwsze? Sprawdzić rezultat graficznie.
Odp. 5,32 sek.
30. Dwa ciała wyruszają z tego samego miejsca, w tym samym kierunku, z tem samem przyspieszeniem a ; drugie wyrusza jednak o czas t_1 później od pierwszego. Znaleźć odległość s między temi ciałami w czasie t_2 , liczoną od początku ruchu drugiego.
Odp. $s = at_1 t_2 + \frac{at_1^2}{2}$.
31. Statek płynie w kierunku prądu rzeki z prędkością $v_1 = 6,2$ m/sek; w kierunku zaś przeciwnym z prędkością $v_2 = 3,8$ m/sek. Obliczyć stąd prędkość prądu i statku.
Odp. 1,2 m/sek; 5 m/sek.
32. Pociąg, którego prędkość = 12 m/sek, mija drugi pociąg, idący w tym samym kierunku na sąsiednim torze, z prędkością 10 m/sek. Jakimi wydają się te prędkości podróżnym tych pociągów?
Odp. Pierwszego—2 m/sek; drugiego +2 m/sek.
33. Jakimi wydają się te prędkości, gdy drugi pociąg idzie w kierunku przeciwnym?
Odp. 22 m/sek.
34. Z jaką prędkością deszcz, spadający pionowo z prędkością 20 m/sek, trafia ukośnie w twarz człowieka, biegnącego z prędkością 3 m/sek? Sprawdzić graficznie.
Odp. 20,22 m/sek.
35. Czółno porusza się z prędkością $v_1 = 1,8$ m/sek, sterując prostopadle do brzegu rzeki o szerokości $b = 54$ m i ląduje o $c = 15$ m dalej od zamierzonego punktu. Obliczyć prędkość prądu rzeki. Rysunek!
Odp. 0,5 m/sek.

Do §§ 6, 7 i 8.

36. Jaki jest stosunek sił P_1 i P_2 , jeżeli siła P_1 w ciągu 15 min. przesuwa masę 4200 kg na odległość 0,6 m, siła zaś P_2 masę o połowę mniejszą przesuwa w ciągu 9 min. na odległość 0,8 m?

Odp. $P_1 : P_2 = 9 : 10$.

37. Pocisk, ważący 5 kg, wylatuje z działa z prędkością 800 m/sec. Obliczyć siłę gazów prochowych, oraz prędkość, z jaką zostaje odrzucone wstecz działo, jeżeli masa tego działa wynosi 2000 kg, a pocisk przebywa kanał działowy w ciągu 0,01 sek.

Odp. 40775 Kg; 2 m/sec.

38. Siła stała, działająca w ciągu czasu 10 sek, nadaje po kolei masom m_1 , m_2 , m_3 i 50 gr prędkości 10, 15, 25 i 30 cm/sec. Obliczyć te masy.

Odp. $m_1 = 150$ gr; $m_2 = 100$ gr; $m_3 = 60$ gr.

39. Ta sama co poprzednio siła nadaje masie m_4 w przeciągu 5 sek prędkość 12 cm/sec; w przeciągu 3 sek masie m_5 prędkość 40 cm/sec, a w przeciągu 35 sek masie m_6 prędkość 20 cm/sec; znaleźć wartości tych mas.

Odp. $m_4 = 62,5$ gr; $m_5 = 11,25$ gr; $m_6 = 262,5$ gr.

40. Obliczyć natężenie tej siły.

Odp. 150 dyn.

41. Jak długo powinna działać siła 10000 dyn na masę 50 kg, aby wytworzyła prędkość 100 cm/sec?

Odp. 8 min. 20 sek.

42. Na wagon kolejowy, ważący 20 tonn, działa siła 400 milionów dyn; jak daleko zajedzie ten wagon na torze poziomym w ciągu 1 min?

Odp. 360 m.

43. Kula działowa, ważąca 4,1 kg, dopada z prędkością 420 m/sec do wału ziemnego i przenika w głąb tego wału na odległość 1,5 m; jaka jest siła oporu wału?

Odp. 24575 Kg.

Do §§ 10, 11, 12 i 13.

44. Pewne ciało spada swobodnie. W punkcie A swojej drogi posiada ono prędkość $v_1 = 29,43$ m/sec, w punkcie B prędkość $v_2 = 49,05$ m/sec. Obliczyć odległość AB oraz czas, w ciągu którego ciało przebywa tę odległość. Wykonać wykres!

Odp. 78,48 m; 2 sek.

45. Krople wody wypadają z rurki pionowej co 0,1 sek jedna po drugiej, z przyspieszeniem: $g = 9,81$ m/sec². Obliczyć odległość między pierwszą a drugą z kolei kroplą po upływie 10 sek. od chwili wypadnięcia z rurki pierwszej kropli.

Odp. 9,76 m.

46. Punkt ważki zaczyna spadać swobodnie bez prędkości początkowej. Drugi punkt, położony niżej od pierwszego w odległości: $a = 200$ m, rzu-

cony jest jednocześnie pionowo do góry z prędkością początkową: $v_0 = 50$ m/sec. Po upływie jakiego czasu (t) i w jakiej odległości (x) od położenia początkowego, które miał punkt górny, nastąpi spotkanie obu punktów na tej samej linii pionowej? Sprawdzić rezultaty graficznie.

Odp. 4 sek; 78,48 m.

47. Wysokość wieży wynosi $h = 161$ m. Jak długo ciało spada z tej wieży i z jaką prędkością dosięga ziemi? Wykres!

Odp. 5,73 sek; 56,2 m/sec.

48. Z pewnego wysoko położonego punktu spadają pokolei co $\frac{1}{4}$ sekundy 6 kul. W jakich odstępach między sobą znajdują się te kule po upływie $1\frac{1}{4}$ sek od początku ruchu? Wykres!

Odp. $\frac{9}{32}$ g; $\frac{7}{32}$ g; $\frac{5}{32}$ g; $\frac{3}{32}$ g; $\frac{1}{32}$ g.

49. W szybie pionowym punkt A położony jest o 58,86 m wyżej od punktu B . Z punktów tych spadają 2 kule, przyczem z punktu B o 1,5 sek później, niż z punktu A . Obie kule dosięgają dna szybu jednocześnie. Obliczyć wysokość i czas spadku kuli, rzuconej z punktu B .

Odp. 51,81 m; 3,25 sek.

50. Punkt ważki rzucony jest w próżni z prędkością początkową v_0 pionowo do góry. Po upływie t sek z tego samego miejsca i z tą samą prędkością v_0 rzucono do góry drugi punkt. Po upływie jakiego czasu od chwili wyrzucenia drugiego punktu nastąpi spotkanie obydwóch punktów rzuconych?

Odp. $\frac{v_0}{g} - \frac{t}{2}$.

51. W celu oznaczenia głębokości x pewnej studni wrzucono do niej kamień i usłyszano uderzenie jego o dno studni po upływie 6 sek. od chwili wrzucenia. Obliczyć głębokość x studni, wiedząc, że stała prędkość rozchodzenia się głosu w powietrzu wynosi 335,5 m/sec.

Odp. 151 m.

52. Pewne ciało zostało rzucone do góry pionowo z prędkością $v_0 = 4$ g. Jednocześnie z wysokości, której dosięga to ciało i po tej samej linii pionowej rzucono drugie ciało na dół z prędkością $v_1 = 4$ g. Gdzie, kiedy i z jakimi prędkościami ciała te spotkają się? Sprawdzić graficznie

Odp. Po upływie 1 sek, w odległości $4\frac{1}{2}$ g od najwyższego punktu; prędkość ciała spadającego 5 g, wznoszącego się 3 g.

53. Na wysokości $h = 100$ m nad ziemią została wystrzelona kula z prędkością $v_0 = 240$ m/sec w kierunku poziomym. Gdzie znajduje się ta kula po upływie 4 sek? Wykres!

Odp. W odległości 960 m w kierunku poziomym i 78,5 m w kierunku pionowym.

54. Kula została wystrzelona poziomo na wysokości $h = 180$ m i z prędkością $v_0 = 540$ m/sec. Kiedy i w jakiej odległości kula ta spadnie na ziemię?

Odp. 6,06 sek; 3272,4 m.

55. Do ciągnięcia wozu na pewnej poziomej drodze potrzeba siły poziomej, wynoszącej $\frac{1}{30}$ ciężaru wozu. Obliczyć pracę, którą wykonają konie, ciągnąc wóz, ważący 400 Kg na odległość 1,5 km.

Odp. 12000 Kg . m.

56. Jaką liczbą wyraża się ta sama praca w bezwzględnym układzie miar?

Odp. $11772 \cdot 10^8$ erg.

57. Siła 60 dyn, przyłożona do swobodnej nieruchomej masy 30 gr, działa na nią w ciągu 7 sek; obliczyć prędkość nabytą v , drogę s , pracę T i energię kinetyczną E .

Odp. $v = 14$ cm/sek; $s = 49$ cm; $T = E = 2940$ erg.

58. Obliczyć z równości żywej siły i pracy średnią wartość siły, wyrzucającej pocisk o masie 20 gr z lufy karabinowej o długości 80 cm z prędkością 300 m/sek.

Odp. 114 Kg.

59. Młot, ważący 1,5 kg, porusza się z prędkością 10 m/sek. Obliczyć w $Kg \cdot m$ jego energię kinetyczną.

Odp. 7,65 $Kg \cdot m$.

60. Młot powyższy, uderzywszy w główkę gwoźdźcia, wciska go w drzewo na głębokość 1 cm. Jaki ciężar należałoby położyć na gwoździu, aby wcisnąć go do tej samej głębokości. (Prócz żywej siły młotka uwzględnić jeszcze pracę wykonaną pod działaniem jego ciężaru).

Odp. 776,5 Kg.

61. Pociąg kolejowy o masie 150 tonn porusza się po torze poziomym bez pary, z prędkością 12 m/sek. W jakiej odległości pociąg ten zatrzyma się, jeżeli opory ruchu wynoszą $\frac{1}{200}$ ciężaru pociągu?

Odp. 1467 m.

62. Ile wynosi energia potencjalna ciała, ważącego 50 gr i podniesionego na wysokość 4 m?

Odp. 19620000 erg.

63. Obliczyć osobno energię kinetyczną $E_{kin.}$ i potencjalną $E_{pot.}$ tegoż ciała podczas spadania na wysokościach 4, 3, 2, 1, 0 m nad ziemią.

Odp. $E_{kin.} = 0; 4905 \cdot 10^3; 981 \cdot 10^4; 14715 \cdot 10^3; 1962 \cdot 10^4$ erg. $E_{pot.} = 1962 \cdot 10^4; 14715 \cdot 10^3; 981 \cdot 10^4; 4905 \cdot 10^3; 0$ erg.

64. Wóz, ważący 200 kg, został wciągnięty na wzgórek o wysokości 10 m wzdłuż drogi o długości 60 m; przyczem na pokonanie samego tarcia zużyto 4 Kg. Ile pracy wykonano w całości, jaką energię posiada wóz po wciągnięciu i ile energii zużyto na tarcie?

Odp. 2240; 2000; 240 $Kg \cdot m$.

65. Wodospad dostarcza na minutę 90000 kg wody, spadającej z wysokości 5 m. Jaka jest dzielność tego wodospadu?

Odp. 100 H.P.

66. Jaką dzielność posiada lokomotywa, poruszająca pociąg o masie 200 tonn z prędkością 12 m/sek, jeżeli opory ruchu wynoszą $\frac{1}{200}$ ciężaru pociągu?

Odp. 160 H.P.

Do § 15.

67. Jakie jest odkształcenie linjowe ciała we wszystkich kierunkach, jeżeli pierwotna objętość tego ciała wynosiła 85 cm³, końcowa zaś 91 cm³?

Odp. 0,0706.

68. Sprężyna spiralna z drutu stalowego wydłuża się o 17 mm pod działaniem siły 1 Gr. Jakiej siły potrzeba do wydłużenia tej sprężyny o 4 cm i ile energii potencjalnej zawiera wówczas sprężyna?

Odp. 2,35 Gr; 4,8 Gr. cm.

69. Objętość 1 litra wody zmniejsza się o 47 mm³ pod działaniem ciśnienia $p = 1$ Atm = 1033,3 Gr/cm². Jakie jest odkształcenie względne objętościowe i odpowiedni moduł Younga dla wody?

Odp. $\omega = \frac{0,047}{1000}$, $\sigma = \frac{p}{\omega} = \frac{1033,3 \cdot 1000}{0,047} = 22 \cdot 10^6$ Gr/cm².

70. O ile przedłuża się pręt stalowy długości 3 m o przekroju prostokątnym 2×3 mm, gdy na końcu jego działają siły po 200 Kg każda? (Spółczynnik sprężystości stali $\epsilon = 2100$ tonn/cm²).

Odp. $l = \frac{2 \times 10^5 \times 300}{2100 \times 10^6 \times 0,06} = 0,48$ cm.

71. Drut stalowy o długości $L = 1275$ mm i przekroju $q = 0,36$ mm² uzyskuje wydłużenie $l = 1,6$ mm pod działaniem siły rozciągającej $P = 9$ Kg. Obliczyć stąd współczynnik sprężystości (ϵ) tego drutu.

Odp. $\epsilon = \frac{PL}{q \cdot l} = 19922$ Kg/cm².

72. Jaki ciężar P jest w stanie wydłużyć o $l = 1,2$ mm drut mosiężny o przekroju $q = 0,5$ mm² i długości pierwotnej $L = 960$ mm, jeżeli współczynnik sprężystości wynosi $\epsilon = 9000$ Kg/mm²?

Odp. $P = \frac{l \cdot \epsilon q}{L} = 5,625$ Kg.

73. Drut żelazny o przekroju $q = 2,4$ cm² i długości $L = 45$ m obciążony jest siłą rozciągającą $P = 42$ tonn. Jakie jest wydłużenie l , jeżeli współczynnik sprężystości tego pręta wynosi $\epsilon = 20,8$ Tonn/mm²?

Odp. $l = 378,6$ mm.

74. Obliczyć największy ciężar, jaki zdoła unieść pręt żelazny o przekroju 10 mm², nie wydłużając się poza granice swojej sprężystości (odkształcenie względne 0,0015).

Odp. $1900 \times 10^6 \times 0,1 \times 0,0015$ Gr = 285 Kg.

75. Jakiej siły potrzeba do przerywania drutu stalowego o średnicy 1 mm?

Odp. $\frac{P}{\pi \cdot (0,05)^2} = 8 \times 10^6$; stąd: $P = 63$ Kg.

76. Pas skórzany szerokości 42 mm powinien wytrzymywać bezpiecznie siłę rozciągającą $P = 36$ Kg. Jaka powinna być grubość x tego pasa, jeżeli współczynnik wytrzymałości skóry jest $F = 0,25$ Kg/mm²?

Odp. $x = \frac{36}{42 \cdot 0,25} = 3,43$ mm.

77. Cegła położona jest napłask poziomo. Jej długość jest $l = 25$ cm, szerokość $b = 12$ cm, a współczynnik wytrzymałości $F = 120$ Kg/cm², współczynnik zaś bezpieczeństwa $S = \frac{1}{10} F$. Jaka siła może skruszyć tę cegłę oraz jaką bezpieczną siłę może ta cegła wytrzymać?

Odp. $P = Flb = 36000$ Kg; $P' = 1800$ Kg.

78. Współczynnik wytrzymałości muru ceglanego wynosi $F = 80$ Kg/cm², a ciężar właściwy $s = 1,6$. Jakiej wysokości x wieżę pionową można wybudować z takiego muru, uwzględniając współczynnik bezpieczeństwa $S = \frac{1}{10} F$?

Odp. $x \cdot s = 100 F$; stąd: $x = 50$ m.

Do §§ 16 — 19.

79. Lampa łukowa o ciężarze 8 Kg wisi na dwóch drutach, których kierunki tworzą kąt po 30° względem poziomu. Obliczyć napięcie tych drutów.

Odp. 8 Kg.

80. Cztery siły równoległe $P_1 = 7$ Kg, $P_2 = 8$ Kg, $P_3 = 9$ Kg i $P_4 = 10$ Kg przyłożone są w punktach A_1, A_2, A_3 i A_4 sztywnej prostej A_1A_4 . Odległości tych punktów wynoszą $A_1A_2 = 12$ cm; $A_2A_3 = 17$ cm; $A_3A_4 = 15$ cm. Siła P_2 skierowana jest odwrotnie do pozostałych. Obliczyć siłę wypadkową i położenie jej punktu przyłożenia.

Odp. 18 Kg; odległość od $A_1 = 33\frac{1}{8}$ cm.

81. Na dwóch końcach A i B sztywnej prostej $AB = 84$ cm w tej samej płaszczyźnie działają z jednej strony prostej siły $P_1 = 8$ Kg; $P_2 = 10$ Kg, które tworzą z nią odpowiednio kąt 90° i 135°. Obliczyć wypadkową i punkt jej przyłożenia na prostej AB .

Odp. 16,648 Kg; odległość od $A = 39,41$ cm.

82. Cztery siły $P_1 = 7$ Kg, $P_2 = 8$ Kg, $P_3 = 11$ Kg i R przechodzą przez punkt A i znajdują się w równowadze. Pierwsze trzy są prostopadłe do siebie. Obliczyć siłę R .

Odp. 15,297 Kg.

83. Ziemia i księżyc posiadają masy w stosunku 81 : 1. Odległość między ich środkami wynosi 382420 km. Gdzie leży wspólny środek ich masy?

Odp. 4664 km od środka ziemi.

84. W jakich odległościach od boków leży środek ciężkości trójkąta prostokątnego, w którym przyprostokątne mierzą 5 cm i 12 cm?

Odp. 1,67; 4; 1,54 cm.

85. W wierzchołkach nieważkiego trójkąta równoramiennego ABC o podstawie a i ramionach b umieszczono ciężary: 60, 30 i 30 Kg. Gdzie należy podeprzeć ten trójkąt, aby osiągnąć równowagę?

Odp. W środku wysokości w odległości $\frac{1}{4}\sqrt{4b^2 - a^2}$ od podstawy.

86. Na płaszczyźnie, nachylonej pod kątem 30° do poziomu, stoi walec o promieniu $r = 5$ cm. Jaką największą wysokość h może posiadać ten walec, aby się nie przewrócił?

Odp. Nie większą nad $10\sqrt{3}$ cm.

87. Ciało zostało rzucone z dołu wzdłuż równi pochyłej o kącie nachylenia $\alpha = 30^\circ$ z prędkością początkową $v_0 = 54$ m/sec bez tarcia. Jaką drogę przejdzie to ciało po równi do chwili zatrzymania się i kiedy ta chwila nastąpi?

Odp. 297,2 m; po upływie 11 sek.

88. Ciało stacza się z równi pochyłej o długości $l = 66$ m w ciągu 10 sek. Współczynnik tarcia wynosi $f = 0,25$. Obliczyć wysokość równi.

Odp. 103,62 m.

89. Ciało zostało pchnięte z dołu wzdłuż równi pochyłej pod kątem $\alpha = 30^\circ$ z prędkością początkową $v_0 = 20$ m/sec. Jak długo i jak daleko potoczy się to ciało do chwili zatrzymania, jeżeli współczynnik tarcia wynosi $f = 0,025$?

Odp. 3,91 sek; 39,1 m.

90. Równia pochyła posiada kąt nachylenia $\alpha = 60^\circ$. Jakiej siły Q potrzeba, aby utrzymać na niej w równowadze ciężar $P = 450$ Kg, jeżeli Q jest: a) równoległa do długości; b) równoległa do podstawy?

Odp. 389,7 Kg; 779,4 Kg.

91. Jaką siłę Q , równoległą do długości, należy zastosować, aby ciężar pozostał w równowadze podług warunków poprzedniego zadania, jeżeli uwzględnić nadto współczynnik tarcia $f = 0,01$?

Odp. 387,45 Kg.

92. Klin, którego boki mają długość 20 cm, grubość i szerokość po 6 cm, wsunięty został całkowicie siłą 20 Kg. Obliczyć ciśnienie na boki.

Odp. 66,67 Kg/cm².

93. Na boki klina równoramiennego działają 2 siły po 84 Kg. Długość klina 30 cm, grubość 5 cm. Jaka siła równoważy ten klin (bez tarcia)?

Odp. 14 Kg.

94. Na dźwigni prostej, osadzonej w środku na osi, zawieszono są na lewym ramieniu ciężary 4, 9 i 2 Kg w odległościach 5, 12 i 20 cm od osi. Jaki ciężar potrzeba zawiesić na ramieniu prawym, w odległości 25 cm od osi celem zrównoważenia tamtych ciężarów?

Odp. 6,72 Kg.

95. Jaką siłą dźwignia ta ciśnie na oś?

Odp. 21,72 Kg + ciężar dźwigni.

96. Mając podnieść ciężar 200 Kg zapomocą drąga 2 metrowego, możemy użyć siły, wynoszącej tylko 40 Kg. Gdzie należy podeprzeć drąg?

Odp. 33,3 cm od końca.

97. Dźwignia obciążona jest na lewym ramieniu siłami:

50 gr	w odległości	25 cm
25 "	"	30 "
60 "	"	40 "

na prawym ramieniu siłami:

15 gr	w odległości	50 cm
30 "	"	60 " od osi.

Jaką siłę trzeba przyłożyć na prawem ramieniu w odległości 16 cm od osi, aby nastąpiła równowaga i jakie ciśnienie wytrzymała wówczas podpora dźwigni?

Odp. 100 gr; 280 gr,

98. Pewna waga fałszywa wskazuje ciężar ciała na szalce prawej 534 gr, na lewej zaś 596 gr. Jaki jest rzeczywisty ciężar ciała?

Odp. 564,2 gr.

99. Lina obejmuje od dołu $\frac{1}{8}$ część obwodu bloka przesuwne, obciążonego siłą 96 Kg. Jaką siłą napięta jest lina.

Odp. 96 Kg.

100. Promienie kół wciągu różnicowego (rys. 141) wynoszą $R = 18$ cm, $r = 17$ cm. Obliczyć przekładnię tego wciągu.

Odp. $\frac{1}{35}$.

101. Promienie kół w pędni trybowej (patrz rys. 137) wynoszą: $r_1 = 50$ cm; $r_2 = 8$ cm; $r_3 = 30$ cm; $r_4 = 10$ cm. Obliczyć siłę czynną Q , niezbędną do zrównoważenia siły oporu $P = 2$ Tonny.

Odp. 106,7 Kg.

Do §§ 20 — 23.

102. Przekroje tłoków w prasie hydraulicznej (rys. 146) wynoszą: $F = 4200$ cm²; $f = 10,5$ cm². Ramiona dźwigni: $n = 10$ cm; $m = 60$ cm. Obliczyć siłę P prasy, jeżeli na końcu dźwigni działa siła czynna $Q = 12$ Kg.

Odp. 28800 Kg.

103. W pobliżu wysp Kurylskich głębokość oceanu wynosi 8513 m. Obliczyć ciśnienie hydrostatyczne w tej głębokości, przyjmując gęstość wody morskiej $= 1,026$.

Odp. 873,44 Kg/cm².

104. W naczyniu z dnem poziomem znajduje się warstwa wody o grubości 15 cm, nad nią zaś warstwa oliwy 20 cm. Przyjmując gęstość oliwy $= 0,915$, obliczyć ciśnienie hidrost. na dno.

Odp. 33,3 gr/cm².

105. Do jednego z 2 naczyń połączonych, zawierających rtęć, nalano spirytusu, wobec czego poziom rtęci w drugim naczyniu podniósł się o 1,5 cm. Obliczyć wysokość nalanego słupka spirytusu, wiedząc, że gęstość rtęci i spirytusu wynosi odpowiednio: 13,6 i 0,79.

Odp. 51,64 cm.

106. Szluzę posiada stawidło o ciężarze 40 Kg i szerokości 80 cm. Woda zapełnia ją do wysokości 60 cm. Stawidło można podnosić zapomocą kołowrotu, w którym promienie kół wynoszą 15 i 120 cm. Obliczyć siłę czynną, niezbędną do uniesienia stawidła, jeżeli współczynnik tarcia w wodzidłach wynosi: $f = 0,5$.

Odp. 14 Kg.

107. Obliczyć parcie, jakie rtęć wywiera do góry na zanurzoną w niej całkowicie kulę o objętości 100 cm³.

Odp. 1360 Gr.

108. Jaka część objętości góry lodowej (c. wł. $= 0,9167$), pływającej po morzu, wystaje na zewnątrz?

Odp. 0,0833.

109. Ile cm³ korka (gęst. 0,24) należy przyczepić pod wodą do kuli ołowianej (gęst. 11,37), ważącej 30 gr, aby kula ta mogła podnieść się do góry?

Odp. co najmniej 36 cm³.

110. Ciecz o gęstości $= 2,0$ pokryta jest warstwą wody o grubości 8 cm. Walec o długości 16 cm i gęstości $= 0,75$ pływa w położeniu pionowym. Znaleźć długość tej części walca, która znajduje się nad wodą.

Odp. 6 cm.

111. Kawalek szkła o gęstości $= 2,5$, którego masa wynosi 150 gr, zawieszony na drucie, zanurza się całkowicie w kwasie siarkowym o gęstości $= 1,8$. Obliczyć napięcie drutu.

Odp. 41200 dyn.

112. Pewne ciało traci na ciężarze po zanurzeniu w wodzie 65 Gr. Ile straci to samo ciało po zanurzeniu w spirytusie (c. wł. $= 0,8$) i rtęci (c. wł. $= 13,6$)?

Odp. 52,0 Gr; 884 Gr.

113. Kawalek soli kamiennej, ważący w powietrzu 9,675 gr, w nafcie waży 6,007 gr. Kawalek szkła, ważący w powietrzu 15,18 gr, waży w wodzie i nafcie odpowiednio 9,18 i 10,29 gr. Obliczyć stąd ciężary właściwe soli i nafty.

Odp. 2,15; 0,815.

114. Dziesięć metrów drutu miedzianego waży 1,5763 gr; tenże sam drut w wodzie waży 1,3995 gr. Obliczyć pole przekroju drutu.

Odp. 0,0177 mm².

115. W jakim stosunku należy wziąć ciężary stali i korka, aby oba te ciała, połączone z sobą, zachowywały się po całkowitem zanurzeniu do wody w równowadze obojętnej, jeżeli ich ciężary właściwe wynoszą odpowiednio 7,5 i 0,24?

Odp. 1 : 3,654.

116. Kula korkowa o ciężarze właściwym 0,24 zanurzona jest na 10 m pod poziomem wody i puszczona wolno. W jakim czasie wydostanie się ona na powierzchnię wody?

Odp. 0,8024 sek.

117. Kawalek drzewa waży w powietrzu 17,52 gr. Drzewo to zostało owinięte drutem ołowianym, ważącym 43,32 gr, a po zanurzeniu w wodzie wykazało stratę ciężaru, wynoszącą 27,8 gr. Obliczyć ciężar właściwy drzewa, jeżeli ciężar właściwy ołowiu wynosi 11,4.

Odp. 0,73.

118. Areometr Nicholsona (rys. 166) waży w powietrzu 175 gr. W celu zanurzenia do wskazanej kreski w wodzie i eterze siarczanym należy jeszcze dołożyć na szalkę odpowiednio 75 gr i 9 gr. Oznaczyć stąd ciężar właściwy eteru.

Odp. 0,736.

119. Piknometr pusty waży 12,5 gr, po napełnieniu zaś wodą, a następnie kwasem siarkowym waży odpowiednio 62,5 gr i 105 gr. Oznaczyć stąd ciężar właściwy kwasu siarkowego.

Odp. 1,85.

Do §§ 24, 25 i 26.

120. Obliczyć wysokość barometryczną słupa wody, gliceryny i eteru siarczanego, gdy wysokość słupa rtęci wynosi 76 cm. (Gęstość cieczy: 1,0; 1,26; 0,724; 13,596).

Odp. 10,33 m; 8,2 m; 14,3 m.

121. Obliczyć ciśnienie atmosferyczne odpowiednio do wskazań: 72,75 i 75 cm barometru rtęciowego.

Odp. 978,86; 1019,65; 1060,43 Gr/cm².

122. Ile wynosi całkowite ciśnienie powietrza na ciało człowieka o powierzchni zewnętrznej 1,35 m² przy ciśnieniu barometrycznym 72 cm rtęci.

Odp. 13215 Kg.

123. Cylinder szklany o wysokości 20 cm i przekroju 30 cm² napełniono wodą, przykryto papierem i przewrócono. Jaka siła przyciska papier do walca, jeżeli barometr rtęciowy wskazuje 71 cm?

Odp. 28,359 Kg.

124. W rurce, zanurzonej w wodzie (rys. 168), znajduje się tłok. Jaką siłę trzeba zastosować, aby tłok ten utrzymać w równowadze po wysunięciu na wysokość 5 m od poziomu wody, jeżeli ciśnienie atmosfery wynosi 9,8 m słupa wody, a przekrój rury 80 cm²?

Odp. 40 Kg.

125. Wysokość barometryczna, poprawiona względem temperatury i poziomu morza, była ta sama na równiku, jak i na biegunie. W którym z tych miejsc ciśnienie atmosfery było faktycznie większe?

Odp. Na biegunie.

126. Kawałek drzewa i kawałek żelaza ważą w powietrzu jednakowo. Który ma większą masę?

Odp. Drzewo.

127. Balon kulisty o objętości 65,4 m³ i powierzchni 78,5 m² napełniony jest wodorem. Gęstość powietrza wynosi 0,0012, gęstość wodoru 14 razy mniej; 1 m² tkaniny balonu waży 200 gr. Obliczyć siłę, z jaką balon ten ciągnie do góry linę, do której jest przywiązany.

Odp. 57,2 Kg.

128. Pewna ilość powietrza zajmuje pod ciśnieniem 74 cm słupa rtęci objętość 1 m³; obliczyć objętość tej samej masy powietrza pod ciśnieniem 30 i 80 cm w niezmienniej temperaturze.

Odp. 2,467; 0,925 m³.

129. Objętość gazu pod ciśnieniem 1,75 Atm wynosi 3,8 l; pod jakim ciśnieniem gaz ten będzie miał objętość 2,7 l?

Odp. 2,463 Atm.

130. Pewna ilość wodoru pod ciśnieniem 76 cm słupa rtęci posiada gęstość 0,06926; pod jakim ciśnieniem gęstość ta zwiększy się do 0,09?

Odp. 98,76 cm.

131. W temperaturze 0° panuje jednocześnie ciśnienie barometryczne: w Wilnie 71,2 cm, w Warszawie 75,2 cm rtęci. O ile ciężar 1 m³ powietrza większy jest wówczas w Warszawie, niż w Wilnie, jeżeli 1 l powietrza przy 0° C i ciśnieniu 76 cm waży 1,293 gr?

Odp. 68,05 Gr.

132. Rurka szklana o długości 100 cm zatopiona jest na jednym końcu i napełniona rtęcią do wysokości 80 cm. Wolny koniec rurki zatknięto wówczas palcem, rurkę zaś przewrócono i końcem tym zanurzono w rtęci na głębokość 10 cm. Jaką objętość zajmuje wtedy zamknięta w rurce ilość powietrza, jeżeli ciśnienie barometryczne wynosi 70 cm rtęci?

Odp. 48,73 cm.

133. Rurka szklana o długości 60 cm zatopiona jest na jednym końcu, drugim zaś otwartym zanurzona w rtęci na głębokość 56 cm. Jaka jest długość zamkniętego w tej rurce słupka powietrza, jeżeli barometr rtęciowy wskazuje 72 cm?

Odp. 40 cm.

134. Szklankę o wysokości 20 cm zanurzono w wodzie dnem do góry. Do jakiej wysokości wejdzie do niej woda, jeżeli: a) szklanka zanurzona jest do połowy; b) aż do dna; c) dno zanurzone do głębokości 1 m pod poziomem wody? Ciśnienie atmosfery przyjąć = 10 m słupa wody.

Odp. 0,2; 0,4; 2,1 cm.

135. Pokój posiada 8 m długości, 7,6 m szerokości i 4 m wysokości. Ile kg powietrza zawiera ten pokój przy 0° C i ciśnieniu 72 cm rtęci?

Odp. 297,9 kg.

136. Tłok pompy posiada przekrój 24 cm². Z jednej strony tego tłoka panuje w walcu ciśnienie 70 cm, z drugiej 1,4 cm rtęci. Obliczyć siłę, niezbędną na wprowadzenie tego tłoka w ruch (c. wł. rtęci = 13,6).

Odp. 22,391 Kg.

Do §§ 29 i 30.

137. Prety z żelaza, cynku i mosiądzu mają długość 1 m w temperaturze 0°; o ile wydłużą się przez ogrzanie do 100°?

Odp. 1,2; 2,9; 1,9 mm.

138. O ile 1 m³ ołowiu jest lżejszy w temperaturze 100°, niż w temperaturze 0°?

Odp. 98 kg.

139. Sztabka żelazna posiada długość 45 cm w temperaturze 15°. Jaką długość posiada ta sztabka w temperaturze 80°?

Odp. 45,034 cm.

140. Zapomocą skali mosiężnej zmierzono w temperaturze 16° pewną długość i odczytano 1860,4 m. Jaka jest ta długość w rzeczywistości, jeżeli skalę sprawdzono w temperaturze 0°?

Odp. 1860,972 m.

141. Objętość rtęci w temperaturze 16° wynosi 8 cm^3 . Jaka będzie objętość tej rtęci w temperaturze 80° ?

Odp. $8,0929 \text{ cm}^3$.

142. Ciężar właściwy rtęci w temperaturze 0° wynosi $13,596$; jaką wartość posiada on w temperaturze 100° ?

Odp. $13,354$.

143. Jakie jest ciśnienie barometryczne, odpowiednio do temperatury 0° , jeżeli w temperaturze 32° barometr rtęciowy wskazuje $728,4 \text{ mm}$?

Odp. $724,17 \text{ mm}$.

144. Naczynie otwarte, nie zmieniając swej pojemności przy ogrzaniu, zawiera w temperaturze 0° pewną ilość powietrza. Jaka część tego powietrza zostanie w naczyniu po ogrzaniu pod stałym ciśnieniem do 130° ?

Odp. $0,68$.

145. To samo naczynie oziębamy do -20° i wtłaczamy do niego tyle powietrza, aby prężność urosła do 10 Atm . Ile razy zwiększy się ilość zawartego powietrza?

Odp. $10,8$.

146. Jaką objętość zajmowałby w stanie normalnym gaz, którego objętość w temperaturze 23° pod ciśnieniem 847 mm rtęci wynosi 3 l ?

Odp. $3,083 \text{ l}$.

147. Ile traci na wadze kilogram mosiężny w powietrzu o temperaturze 20° , gdy barometr wskazuje 750 mm rtęci?

Odp. 141 mgr .

148. Ile waży 1 m^3 powietrza w temperaturze -30° pod ciśnieniem 735 mm rtęci?

Odp. 1405 gr .

149. Balon szklany, napełniony w temperaturze 0° czystym tlenkiem węgla, pod ciśnieniem $735,7 \text{ mm}$ waży $57,9559 \text{ gr}$; po zupełnym wypompowaniu gazu ciężar wynosi $57,3412 \text{ gr}$. Tenże balon, wypełniony wodą w temperaturze 15° , waży $564,725 \text{ gr}$. Obliczyć gęstość tlenku węgla w warunkach normalnych.

Odp. $0,001251$.

150. Flaszkę, zawierającą powietrze, wstawiono do wrzącej wody, poczem zatknięto szczelnie. Jaką prężność uzyska zawarte w niej powietrze, gdy ostygnie do 20° ?

Odp. $293/373 \text{ Atm}$.

151. Ile waży 2500 cm^3 powietrza w temperaturze 18° pod ciśnieniem 71 cm rtęci?

Odp. $2,833 \text{ gr}$.

152. Jaka jest temperatura powietrza w objętości 136 cm^3 pod ciśnieniem 74 cm rtęci, jeżeli ta sama ilość powietrza w temperaturze 8° i pod ciśnieniem 75 cm posiada objętość 112 cm^3 ?

Odp. $63,7^{\circ}$.

Do § 31.

153. Jaką temperaturę otrzymamy po zmieszaniu równych mas wody o temperaturach 0° i 100° ?

Odp. 50° .

154. Obliczyć temperaturę mieszaniny 5 kg wody przy 15° i 13 kg przy 70° ?

Odp. $54,7^{\circ}$.

155. Ile wody wrzącej (100°) należy dodać do 20 kg wody w temperaturze 10° , aby temperatura mieszaniny wypadła 15° ?

Odp. $1,18 \text{ kg}$.

156. Do naczynia, zawierającego 1 kg wody w temperaturze 17° , włożono 100 gr lodu 0° . O ile oziębi się przez to woda?

Odp. $8,9^{\circ}$.

157. Do kalorymetru lodowego wprowadzono 150 gr wody w temperaturze 70° . Obliczyć ilość stopionego lodu.

Odp. $132,5 \text{ gr}$.

158. O ile stopni 3 Kal ciepła ogrzeją masy: 1 kg wody, $0,5 \text{ kg}$, żelaza, 2 kg rtęci?

Odp. 3° ; 54° ; 45° .

159. Jaką temperaturę otrzymamy po zmieszaniu 2 kg rtęci, ogrzanej do 50° i 3 kg wody 20° ?

Odp. $21,9^{\circ}$.

160. Kawał żelaza, ogrzany do 100° i ważący 15 kg , wrzucono do 12 kg wody o temperaturze 20° . Temperatura wypadkowa wynosi $29,96^{\circ}$. Obliczyć stąd ciepło właściwe żelaza.

Odp. $0,11376$.

161. Kawał miedzi, ogrzany do 100° i ważący 700 gr , wrzucono do kalorymetru lodowego. Miedź ta stopiła $81,5 \text{ gr}$ lodu. Obliczyć jej ciepło właściwe.

Odp. $0,094$.

162. Ile ciepła potrzeba, aby zamienić 60 gr lodu o temperaturze -12° na wodę o temperaturze 0° (ciepło wł. lodu = $0,502$).

Odp. 5113 cal .

163. Celem zmierzenia temperatury pieca ogrzano w nim kulę platynową (ciepło wł. = $0,032$), ważącą 100 gr , i wrzucono do 500 gr wody o temperaturze $12,17^{\circ}$. Woda ogrzała się wówczas do $19,62^{\circ}$. Obliczyć stąd temperaturę pieca.

Odp. 995° .

164. Kawałek srebra, ważący $0,8 \text{ kg}$ w temperaturze 200° , wrzucono do kalorymetru mosiężnego, ważącego $0,6 \text{ kg}$ i zawierającego $1,2 \text{ kg}$ wody w temperaturze 16° . Temperatura ostateczna wypadła $22,44^{\circ}$. Obliczyć ciepło właściwe srebra, uwzględniając poprawkę kalorymetryczną.

Odp. $0,05699$.

165. Ile ciepła potrzeba do ogrzania o 10° powietrza, znajdującego się w pokoju, którego wymiary linjowe wynoszą: 5 m, 10 m i 6 m?
Odp. Około 850 cal.

Do §§ 32 — 35.

166. Rtęć, spadająca z wysokości 2,225 m, ogrzewa się wskutek uderzenia o dno naczynia o $0,1573^{\circ}$. Obliczyć stąd dynamiczny równoważnik ciepła.
Odp. 425 Kg . m/Kal.
167. Kamień, ważący 8,6 kg, spada na ziemię z prędkością 50 m/sek. Jaka ilość ciepła wydzieli się po uderzeniu?
Odp. 2,548 Kal.
168. Silnik gazowy o dzielności 3 HP zużywa 0,75 kg gazu na godzinę. Obliczyć wydajność dynamiczną tego silnika, jeżeli z 1 kg gazu przy spalaniu wydziela się 6000 Kal ciepła.
Odp. $41,86\%$.
169. Ciało, ważące 29,43 kg, trzeba podnieść na wysokość 30 m. Prędkość początkowa tego ciała wynosi 3 m/sek, a końcowa 5 m/sek. Jaka ilość ciepła odpowiada użytej na to ilości energii?
Odp. 2,109 Kal.
170. Do 10 kg wody w temperaturze 65° wrzucono 2,5 kg lodu 0° . Obliczyć temperaturę ostateczną.
Odp. 36° .
171. Udało się przechłodzić 1 kg wody do -7° . Ile lodu utworzy się w chwili wstrząśnienia?
Odp. 87,5 gr.
172. Zmieszano 3 kg lodu w temperaturze -10° (ciepło wł. = 0,5) z 12 kg wody 40° . Obliczyć temperaturę mieszaniny.
Odp. 15° .
173. Ile potrzeba lodu, aby oziębic 3 kg miedzi od 20° do 0° ?
Odp. Najmniej 70 gr.
174. Pół kilograma ołowiu stopionego (ciepło utajone = 5,6) w temperaturze topnienia 328° wlane do śniegu 0° . Obliczyć ilość stopionego śniegu.
Odp. 101,6 gr.
175. Do kalorymetru mosiężnego, ważącego 120 gr i zawierającego 450 gr wody w temperaturze 15° , wprowadzono 17 gr pary wodnej w temperaturze 100° , poczem kalorymetr ogrzał się do $37,3^{\circ}$. Obliczyć ciepło parowania wody.
Odp. 537.
176. Kilogram węgla, spalając się, daje około 8000 Kal; połowa tego ciepła rozpraszana się nieużytecznie w piecu. Obliczyć ilość węgla, potrzebną do wyparowania 1 m³ wody w temperaturze 100° , jeżeli temperatura początkowa tej wody wynosi 20° .
Odp. 155 kg.

177. Ile pary wytwarza się w kotle parowym, kosztem 1 kg węgla (patrz zadanie poprzednie)?
Odp. Około 7 kg.
178. Kaloryfer parowy w temperaturze pokojowej skrapla w ciągu 1 godziny na każdym 1 m² swojej powierzchni 1,8 kg pary w temperaturze 100° . Ile m² powierzchni ogrzewalnej powinien posiadać kaloryfer, aby mógł dostarczać 3000 Kal ciepła na godzinę, przyczem woda skroplona odpływa z powrotem do kotła?
Odp. Około 3 m².
179. Ile pary w 100° trzeba wprowadzić do 60 kg wody w temperaturze 20° , aby ogrzać ją o 17° ?
Odp. 1,7 kg.
180. Zmieszano razem 3 kg lodu, 18 kg wody i 1,5 kg pary; temperatura lodu = 0° , wody = 10° i pary = 100° . Obliczyć temperaturę mieszaniny. (Ciepło ut. lodu = 80; pary = 540).
Odp. 40° .



Nauka o ciepł (Kaloryka).

TREŚĆ CZĘŚCI PIERWSZEJ.

Przedmowy	3
---------------------	---

Wstęp	7
-----------------	---

§ 1. O pomiarach fizycznych. Układ jednostek miar	13
---	----

MECHANIKA.

A. Nauka o ruchach (Kinematyka).

§ 2. Rodzaje ruchów i ich elementy.	23
§ 3. Ruch jednostajny	25
§ 4. Ruch jednostajnie zmienny	28
§ 5. Składanie elementów ruchu	33

B. Nauka o działaniu sił (Dynamika).

§ 6. Dwojaki rodzaj działania sił	37
§ 7. Zasady dynamiczne Newtona.	40
§ 8. Pęd i popęd. Uderzenie.	45
§ 9. Siły, powstające w ruchu krzywoliniowym	49
§ 10. Rzut pionowy i ukośny ciał ważkich w próżni.	54
§ 11. Przeszkody ruchu	58
§ 12. Praca mechaniczna.	62
§ 13. Energia i jej odmiany	66

C. Nauka o równowadze sił (Statyka).

§ 14. Podstawowe zasady statyki	72
§ 15. Odkształcenia ciał pod działaniem sił.	74
§ 16. Składanie i rozkładanie sił	79
§ 17. Środek ciężkości i masy	88
§ 18. Rodzaje równowagi ciał	92
§ 19. Machiny proste	95

Mechanika cieczy (Hidromechanika).

§ 20. Własności fizyczne cieczy. Zasada Pascal'a.	110
§ 21. Ciśnienie hydrostatyczne	112
§ 22. Prawo Archimiedesa	118
§ 23. Metody wyznaczania gęstości ciał	122

Mechanika gazów (Aeromechanika).

§ 24. Ciśnienie atmosferyczne. Barometry	125
§ 25. Własności i prawa fizyczne, dotyczące gazów	130
§ 26. Przyrządy do przesylania cieczy i gazów	137

§ 27. Zewnętrzne skutki działania ciepła	145
§ 28. Termometria.	148
§ 29. Oznaczanie rozszerzalności cieplnej ciał	152
§ 30. Zależności między czynnikami stanu fizycznego gazów	158
§ 31. Kalorymetria.	160
§ 32. Związek między ciepłem a pracą mechaniczną.	164
§ 33. Ciepło jako energia. Teoria kinetyczna materji	169
§ 34. Zmiany stanu skupienia materji:	
A. Topnienie i krzepnięcie	172
B. Parowanie i skraplanie.	176
§ 35. Własności par. Higrometria.	183
§ 36. Silniki cieplne (termiczne)	188
§ 37. Rozchodzenie się ciepła	194
§ 38. Wiadomości ogólne z meteorologii.	199

Dodatek. Ćwiczenia i zadania	205
--	-----