BIBLIOTEKA POPULARNA
NAUK STOSOWANYCH.

MECHANIKA

WYKŁAD PRZYSTĘPNY
:: OPRACOWANY WEDŁUG ::
ROBERTA S. BALLA
PRZEZ
ZYGMUNTA STRASZEWICZA

. . . . . 1912.
Nakład Spółki Wydawniczej Warszawskiej
Skład Główny w księgarni E. WENDEGO i S-ki
(T. Hiża i A. Turkuła). Krak.-Przedm. № 9.

Cena 60 kop.

MECHANIKA

Biblioteka Popularna Nauk Stosowanych

MECHANIKA

Wykład przystępny

opracowany według

Roberta S. Balla

przez

Zygmunta Straszewicza

WARSZAWA
Nakładem Spółki Wydawniczej Warszawskiej
Skład Główny w księgarni E. WENDEGO i S-ki
(T. Hiża i A. Turkuła). Krak.-Przedm. № 9
1912.

Drukarnia „ZORZA", Warszawa, Warecka 12.

MECHANIKA.

ROZDZIAŁ I.

WSTĘPNE WIADOMOŚCI O RUCHU.

§ 1. **Wstęp.** — W nauce mechaniki mamy do czynienia z temi różnorodnemi zjawiskami, którym zazwyczaj nadaje się ogólną nazwę *ruchu*. Z doświadczenia codziennego znamy tysiące najrozmaitszych rodzajów ruchu; ruchy naszego ciała i ruchy zwierząt, ruchy pojazdów, maszyn, obłoków, ciał niebieskich (słońce, księżyc, gwiazdy) i t. d. oto są przykłady zjawisk, o które chodzi. Wspomniane przedmioty tak dalece różnią się jeden od drugiego, ich ruchy są tak złożone i różnorodne, że na pierwszy rzut oka trudno jest dopatrzeć się w owych zjawiskach jakichś rysów wspólnych. Co może być np. wspólnego pomiędzy ruchem obłoku i ruchem kuli bilardowej? Tem nie mniej to coś wspólnego istnieje: zarówno obłok, jak i kula, poruszając się, przechodzą z jednego położenia do drugiego, czyli *zmieniają położenie w przestrzeni*.

Wskazawszy na ten zasadniczy rys wspólny różnym zjawiskom ruchu, rozważymy teraz bliżej parę sposobów, którymi różne przedmioty (lub *ciała*) uskuteczniają zmianę położenia.

§ 2. **Ruch jednostajny.**—Wyobraźmy sobie prostą i poziomą (bez spadków i wzniesień) linię kolei żelaznej i przypuśćmy, że linię tę przebiega pociąg *ruchem jednostajnym*. Mówiąc «jednostajny» rozumiemy przez to, że pociąg ani zwalnia ani przyśpiesza biegu, lecz robi stale tyle a tyle kilometrów na godzinę, lub metrów na sekundę. Uważając lokomotywę i wszystkie wagony za jeden przedmiot (lub jedno ciało), mamy tu przykład najprostszego ruchu ciała, jaki tylko można sobie wyobrazić, *ruchu jednostajnego prostoliniowego*.

Ruch pociągu może być jednostajny i w tym razie, gdy linia kolei posiada łuki (zakrzywienia) i spadki, nie jest on wszakże już teraz prostoliniowym; nazwiemy go *jednostajnym krzywoliniowym*.

W ruchu jednostajnym, zarówno prostoliniowym jak i krzywoliniowym, droga, odbyta przez ciało, jest proporcjonalna do czasu; znaczy to, że w ciągu podwójnego czasu ciało przebiega podwójną drogę, w ciągu potrójnego czasu—potrójną drogę i t. d. Opierając się na tem, można bez trudności rozwiązywać rozmaite zagadnienia, dotyczące ruchu jednostajnego.

Przypuśćmy dla przykładu, że pociąg przebiega na minutę kilometr drogi; pytamy, jaką drogę przebiegnie on w ciągu godziny? Oczywiście droga ta będzie 60 razy większa od 1 kilometra, czyli wyniesie 60 kilometrów.

Albo przykład taki: piechur przechodzi na godzinę cztery kilometry; w ciągu jakiego czasu przejdzie on 20 klm? Jasną jest rzeczą, że na odbycie tej drogi potrzeba będzie 5 godzin.

Inny przykład: okręt w trzy dni przepłynął 720 mil morskich; jaką też drogę odbywa ten okręt na tydzień? Znajdziemy przedewszystkiem, że dziennie okręt przepływa $720 : 3 = 240$ mil morskich, a zatem na tydzień, czyli w ciągu 7 dni, przepłynie $240 \times 7 = 1680$ mil morskich.

§ 3. **Szybkość.**—Wiemy, że ciała mogą się poruszać prędzej lub wolniej, czyli z większą lub mniejszą szybkością. Jeżeli ruch ciała jest jednostajny, to mówimy, że porusza się ono z *szybkością* (lub prędkością) tylu a tylu kilometrów na godzinę, albo metrów na minutę, albo metrów na sekundę i t. d. Tak np. mówimy, że pociąg idzie z szybkością 60 klm na godzinę, lub 1 klm na minutę.

Jeżeli mamy drogę, jaką ciało, poruszające się jednostajnie, odbyło w ciągu pewnego określonego czasu, to możemy bez trudności wyrachować szybkość tego ciała. W tym celu należy tylko liczbę, wyrażającą drogę, podzielić przez liczbę, wyrażającą czas. Naodwrót, mając szybkość ciała, wyznaczymy łatwo drogę, odbytą w ciągu pewnego danego czasu, albo czas, potrzebny na odbycie pewnej drogi.

§ 4. **Przykłady.** — Ciało przebiegło w ciągu $1\frac{1}{2}$ minuty 9 klm 630 m; szybkość tego ciała wyniesie oczywiście $9630 : 90 = 107$ metrów na sekundę.

Odwrotnie, gdybyśmy wiedzieli, że ruch ciała jest jednostajny, i że szybkość jego wynosi 107 m na sekundę, to znaleźlibyśmy, że ciało to w ciągu $1^1/_2$ minuty przebiega $107 \times 90 = 9630$ m, lub 9 klm 630 m.

Jeżeli wreszcie wiemy, że szybkość ciała wynosi 107 m na sek., i że przebiegło ono 9630 m, to znajdziemy, że stało się to w czasie $9630 : 107 = 90$ sek lub $1^1/_2$ min.

Szybkość pewnego ciała wynosi 12 centymetrów na minutę; jaką drogę przejdzie to ciało w ciągu 3 godzin i 15 minut? Znajdziemy odpowiedź, mnożąc dany czas, wyrażony w minutach, przez szybkość; wypadnie $195 \times 12 = 2340$ cm.

Stoję w odległości 2310 m od armaty i w pewnej chwili dostrzegam błysk wystrzału, zaś huk słyszę dopiero o 7 sek. później; z jaką szybkością rozchodzi się głos w przestrzeni?

Zauważyć tu należy, że światło, podobnie jak i głos rozchodzi się w przestrzeni z pewną szybkością, a więc dostrzegam błysk nie w samej chwili wystrzału, lecz dopiero wtedy, gdy światło przebiegło drogę od wylotu armaty do mego oka. Ale szybkość światła jest bardzo wielka; wynosi ona, licząc okrągło, 300 000 klm. na sek., a zatem światło przebiegnie daną drogę w ciągu niezmiernie drobnej cząstki sekundy, i nie popełnię ważniejszego błędu, uważając, że dostrzegam błysk w samej chwili wystrzału. Natomiast głos biegnie bez porównania wolniej. Na odbycie danej drogi zużył on aż 7 sek, a więc szybkość jego wynosi $2310 : 7 = 330$ m na sek.

§ 5. **Ruch obrotowy jednostajny.**—Rozważymy teraz inny prosty rodzaj ruchu, a mianowicie tak zwany *ruch obrotowy*. Ruch taki posiada np. koło (pasowe, rozpędowe lub zębate), obracające się około swej osi.

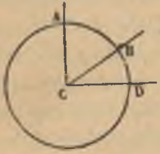

Fig. 1.

Na fig. 1 widzimy właśnie takie koło; oś jego oznaczono literą C. Weźmy pod uwagę jeden z promieni tego koła (np. jedną ze szprych) i uważajmy, co się dzieje z tym promieniem podczas ruchu. W pierwszej chwili zajmował on, dajmy na to, położenie AC. Koło, obracając się, unosi ten promień ze sobą, tak że po pewnym czasie dojdzie on do położenia BC. Obecnie uważany promień tworzy z położeniem pierwotnem kąt ACB; jeżeli kąt ten zawiera 60°, to powiemy, że koło obróciło się od położenia pierwotnego o 60°. Następnie promień nasz dojdzie do położenia DC, tworząc z położeniem pierwotnem kąt prosty; powiemy, że koło obróciło się o 90°, i t. d. Wreszcie uważany promień w pewnej chwili powróci do położenia pierwotnego; wówczas powiemy, że koło obróciło się o 360°, lub że wykonało obrót całkowity.

Przypuśćmy, że koło, poruszając się w ten sposób, nie zwalnia i nie przyśpiesza biegu, lecz wciąż obraca się o tyle a tyle stopni na sekundę, lub robi tyle a tyle obrotów na minutę; taki ruch koła, albo wogóle jakiegokolwiek ciała, nazywa się *ruchem obrotowym jednostajnym*.

W ruchu obrotowym jednostajnym kąt, o który obróciło się ciało, jest proporcjonalny do czasu;

należy jednak dodać, że ta proporcjonalność powinna zachodzić nawet dla najdrobniejszych odstępów czasu.

Konieczność ostatniego zastrzeżenia wyjaśni nam następujący prosty przykład. Wskazówka sekundnika na zegarku robi zupełny obrót dokładnie w ciągu minuty, dwa obroty w ciągu dwóch minut, trzy — w ciągu trzech minut i t. d. Wypada więc, że ilość obrotów jest ściśle proporcjonalna do czasu, tem nie mniej ruch wskazówki nie jest jednostajny; składa się on z drobnych przeskoków, i kąty, które zatacza wskazówka w ciągu bardzo małych odstępów czasu, nie są proporcjonalne do czasu.

§ 6. **Szybkość obrotowa.** — Ciało, obracające się około osi, może poruszać się wolniej lub prędzej, czyli może posiadać *szybkość obrotową* mniejszą lub większą. Jeżeli ruch ciała jest jednostajny, to mówimy, że jego szybkość obrotowa wynosi tyle a tyle obrotów na sekundę lub minutę.

Przypuśćmy, że szybkość obrotowa koła, obracającego się jednostajnie, wynosi 10 obrotów na minutę. Znajdziemy bez trudności, że to koło w ciągu godziny wykona 600 obrotów; na wykonanie 100 obrotów zużyje ono 10 minut czasu, jeden obrót robi w ciągu jednej dziesiątej minuty lub 6 sekund, a na sekundę odbywa szóstą część obrotu, czyli obraca się o 60^0; taki właśnie kąt zatoczy na sekundę każdy promień koła.

§ 7. **Szybkość punktu ciała, posiadającego ruch obrotowy.** — Wyobraźmy sobie koło, które obraca się około swego środka; oczywiście każdy punkt obwodu za każdym obrotem obiega cały ten obwód. Wogóle każdy punkt ciała, posiadającego ruch obrotowy, za każdym obrotem zatacza koło, którego środek leży na osi obrotu. Jeżeli znamy promień tego koła, czyli odległość tego punktu od osi, to możemy znanym sposobem wyznaczyć długość obwodu, czyli drogę, którą punkt przebiega w ciągu jednego obrotu. Jeżeli ruch jest jednostajny, i znamy ilość obrotów na minutę, to możemy łatwo wyliczyć, jaką drogę odbędzie na minutę nasz punkt, czyli szybkość tego punktu.

§ 8. **Przykład.** — Doskonały przykład zasady, podanej w paragrafie poprzedzającym, mamy w użytecznej maszynie, zwanej *piłą bez końca* (fig. 2). Głównemi częściami jej są dwie jednakowe tarcze okrągłe umieszczone jedna nad drugą, jak to wyraźnie widać na rysunku. Tarcze te owija na podobieństwo pasa cienka i giętka wstęga stalowa bez końca, której jeden brzeg jest zazębiony i tworzy piłę. Jedna z tarcz zostaje wprawiona w ruch zapomocą maszyny parowej lub innego motoru. Skutkiem tego zaczyna poruszać się wstęga a także tarcza druga. Z dwóch części wstęgi, przebiegających pionowo pomiędzy tarczami, jedna biegnie

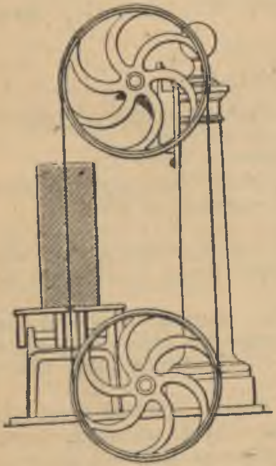

Fig 2.

na dół, druga — do góry. Do części, biegnącej na dół, przyciska się sztukę drzewa, która ma być przepiłowana.

Jeżeli maszyna taka jest w dobrym stanie, to wstęga niema poślizgu na tarczach, i w takim razie oczywiście szybkość wstęgi jest taka sama, jak szybkość obwodu każdej tarczy.

Dajmy na to, że obwód każdej tarczy posiada jeden metr długości, i że każda tarcza robi 90 obrotów na minutę; mamy wyrachować szybkość wstęgi.

Oczywiście każdy punkt obwodu tarczy przebiega na minutę $1 \times 90 = 90$ metrów, taka więc będzie szybkość wstęgi na min., na sekundę zaś szybkość wstęgi wyniesie $90 : 60 = 1^1/_2$ metra, albo 150 centymetrów.

ZAGADNIENIA.

1) Jaką drogę odbędzie pociąg w ciągu pół godziny, jeżeli przebiega 10 metrów na sekundę?

Odpowiedź. 18 kilometrów.

2) Koń przebiegł w 40 minut 5 klm 400 m; wyznaczyć szybkość konia w centymetrach na sek.

Odp. 225.

3) Arena cyrkowa ma 21 m w średnicy, i koń obiega ją 2 razy na minutę; jaką drogę przebiegnie koń w kwadrans czasu.

Odp. 1 klm 980 m. Aby wyznaczyć obwód koła najprościej jest średnicę pomnożyć przez 22 i to, co wypadnie, podzielić przez 7. W danym razie obwód areny wynosi 66 m.

4) Odległość pomiędzy dwiema stacjami kolei żelaznej wynosi 21 klm. Ze stacyi tych wychodzą jednocześnie dwa pociągi i dążą jeden na spotkanie drugiego; jeden idzie z szybkością 30, drugi—z szybkością 54 klm na godz. Kiedy nastąpi spotkanie, i jaką drogę przebiegnie do owej chwili pociąg szybszy?

Odp. Spotkanie nastąpi za 15 min; szybszy pociąg przejdzie przez ten czas $13^1/_2$ klm. Przedewszystkiem należy znaleźć, o ile metrów zbliżają się do siebie pociągi na minutę.

5) Koło rozpędowe, którego obwód ma 6 m długości, robi 160 obrotów na min; wyznaczyć szybkość punktu obwodu na sekundę.

Odp. 16 m.

6) Ciało przeszło 15 m w 9 sekund; w jakim czasie ciało to przejdzie 25 m.

Odp. 15 sek.

7) Niech d oznacza w metrach średnicę tarczy maszyny, wyobrażonej na fig. 2, a n ilość obrotów tarczy na min. Wyznaczyć szybkość piły w metrach na sekundę.

Odp. Obwód tarczy ma $\frac{22\,d}{7}$ m długości, a zatem piła przebiega na minutę $\frac{22\,dn}{7}$, czyli na sekundę $\frac{22\,dn}{7\times 60} = \frac{22\,dn}{420} = \frac{11dn}{210}$ metrów.

8) Lokomotywa jedzie z szybkością v klm na godzinę, a jej prowadzące koło ma d m w średnicy. Ile obrotów robi to koło na minutę.

Odp. Na godzinę lokomotywa przebiega $1000\,v$ metrów, a na minutę $\frac{1000\,v}{60}$. Obwód koła ma $\frac{22\,d}{7}$ m długości, a ponieważ w ciągu jednego obrotu lokomotywa odbywa drogę równą temu obwodowi, przeto szukana ilość obrotów wyniesie $\frac{1000\,v}{60} : \frac{22\,d}{7} = \frac{1000.7}{60.22}\,\frac{v}{d} = \frac{175\,v}{33\,d}$.

ROZDZIAŁ II.

WSTĘPNE WIADOMOŚCI O SILE.

§ 9. **Pierwsze prawo ruchu.** — W mechanice nazywamy pierwszem prawem ruchu twierdzenie następujące:

Ciało, pozostawione samemu sobie, trwa w stanie spoczynku albo w stanie ruchu jednostajnego i prostoliniowego; zmienić ten stan może tylko siła, przyłożona do ciała.

Żaden człowiek, znający się na rzeczy, nie wątpi ani na chwilę, że jest to prawda bezwzględna, gdyż nie zauważono nigdy żadnego zjawiska, stojącego w najlżejszej sprzeczności z twierdzeniem powyższem. Zresztą jedna część tego prawa jest zupełnie oczywista. Każdy wie, że ciało, pozostające w spoczynku, nie zacznie się poruszać samo przez się; ruch może nastąpić tylko w tym razie, jeżeli zacznie działać pewna przyczyna zewnętrzna, jeżeli np. ciało zostanie popchnięte albo pociągnięte przez jakieś ciało inne. Kamień, leżący na ziemi w pewnem miejscu, pozostanie tam na zawsze, jeżeli nie poruszy go człowiek, woda lub uderzenie innego kamienia. Może się wydawać, że wyjątek stanowią tutaj istoty żyjące, które przynajmniej na pozór same przez się wprawiają się w ruch bez żadnej przyczyny zewnętrznej, ale jest to wyjątek pozorny. Zawcześnie byłoby tutaj szczegółowo wyjaśniać, w jaki sposób zwierzę lub człowiek porusza się z miejsca, ale w ogólnych zarysach rzecz odbywa się tak: zwierzę wywiera odpowiednie siły na grunt, na którym stoi; skutkiem tego i grunt wywiera na ciało zwierzęcia siły odwrotne, i pod działaniem tych ostatnich, a więc pewnej przyczyny zewnętrznej, zwierzę zostaje wprawione w ruch. Tak samo lokomotywa porusza się pod działaniem sił, jakie szyny wywierają na koła wiodące. Jeżeli szyny są bardzo gładkie, omarznięte lub posmarowane oliwą, to nie mogą one wywrzeć na koła w kierunku poziomym sił dostatecznie wielkich, i lokomotywa nie ruszy z miejsca pomimo działania maszyny, Podobnież gładka powierzchnia lodu jest zdolna wywierać na stopy w kierunku poziomym jedynie słabe siły, skutkiem czego trudniej jest chodzić po gładkim lodzie niż po nierównym gruncie.

Inna część pierwszego prawa ruchu stoi napozór w sprzeczności z doświadczeniem codziennem. Według tego prawa ciało, wprawione w ruch, powinno bez końca poruszać się jednostajnie w linii prostej, *jeżeli żadne siły nań nie działają.* Twierdzenie to dlatego wydaje się nam niesłusznem, że nie mamy możności spełnić postawionego w niem warunku, nie możemy zrobić tak, aby na jakieś ciało żadne siły nie działały. Można jednak przekonać się o prawdziwości tej części pierwszego prawa ruchu zapomocą rozumowania następującego.

Na chodniku asfaltowym albo na podłodze leży kamień; uderzam go silnie nogą tak, że zaczyna sunąć po chodniku. Kamień zaczął się poruszać, gdyż noga działała nań z pewną siłą, ale z chwilą, gdy ustało zetknięcie pomiędzy nogą i kamieniem, owa siła przestała działać; na zasadzie pierwszego prawa ruchu można byłoby oczekiwać, że kamień będzie poruszał się nieograniczenie, natomiast w rzeczywistości kamień zatrzyma się prędko, przebiegłszy niewielką przestrzeń. Sprzeczność pomiędzy pierwszem prawem i doświadczeniem jest tu tylko pozorna. Chociaż kamień przestał się stykać z nogą, to jednak pewne siły nieprzestały nań działać, a przedewszystkiem tak zwana siła tarcia, którą wywiera chodnik. Tarcie jest następstwem nierówności chodnika i bardzo prędko sprowadzi zatrzymanie się kamienia.

Powtórzmy to samo doświadczenie na gładkim lodzie. I tutaj istnieje tarcie, przeciwdziałające ruchowi, ale jest ono w tym razie bez porównania mniejsze, dzięki czemu kamień przebiegnie daleko większą przestrzeń. Widać stąd, że kamień nie zatrzymuje się *sam przez się,* lecz pod działaniem tarcia o powierzchnię, po której się porusza. Otóż pierwsze prawo ruchu twierdzi, że gdyby się dało usunąć całkowicie tarcie oraz inne siły, hamujące ruch, to kamień biegłby bez końca w linii prostej z niezmienną szybkością.

Tak więc ciało, pozostające w spoczynku, może zacząć się poruszać, a ciało poruszające się może zmienić kierunek ruchu, albo zmienić szybkość, tylko pod wpływem pewnej przyczyny zewnętrznej czyli pod wpływem pewnej *siły.* Opiszemy tutaj niektóre ważniejsze rodzaje sił.

§ 10. **Siła ciążenia.** — Kamień, wypuszczony z ręki, spada na ziemię. Siła, pod działaniem której kamień zostaje wprawiony w ruch, nazywa się *ciążeniem*. Wszystkie otaczające nas ciała podlegają działaniu ciążenia. Ciążenie sprawia, że krople deszczu, powstałe w chmurze, spadają na ziemię, i że woda płynie w korycie rzeki.

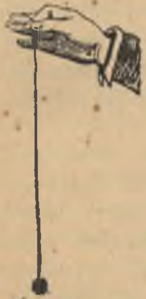

Fig. 3.

Zawieśmy jakiekolwiek ciało na sznurze, jak wskazuje fig. 3; sznur wskaże kierunek, w którym spadałoby ciało, gdybyśmy na to pozwolili. Taki właśnie kierunek posiada siła ciążenia, działająca na ciało. Kierunek ten nazywa się *pionowym*, a linia sznura — *linią pionową*, lub krótko *pionem*.

Każda płaszczyzna, przechodząca przez linię pionową, zowie się *płaszczyzną pionową*. Powierzchnie ścian domów są zwykle płaszczyznami pionowemi. Płaszczyzna prostopadła do pionu zowie się *poziomą*. Powierzchnia wody, spokojnie stojącej w naczyniu lub stawie, jest właśnie taką płaszczyzną poziomą. Każda linia prosta, położona w płaszczyźnie poziomej, albo prostopadła do pionu, nazywa się *prostą poziomą*.

§ 11. **Siły międzycząsteczkowe.**—Jeżeli pewne ciało sprężyste, np. kawałek gumy, zostało rozciągnięte albo ściśnięte (wogóle odkształcone), to usiłuje ono powrócić do postaci pierwotnej. Jeżeli owo odkształcenie nie było zbyt wielkie, (nie przekraczało granic sprężystości), to ciało istotnie odzyska dawną postać, jak tylko zostanie wyswobodzone. W tym razie cząsteczki ciała zostają wprawione w ruch pod działaniem pewnych sił, które usiłują je zbliżyć albo rozsunąć, zależnie od wypadku. Siły takie zowią się *międzycząsteczkowemi.*

Siłom międzycząsteczkowym zawdzięczamy ruch maszyny parowej. Pod wpływem ciepła cząsteczki wody się odpychają i woda przechodzi w parę, przybierając przytem daleko większą objętość. Siły międzycząsteczkowe, które wywołują to rozszerzenie, są tak potężne, że rozszerzająca się para wywiera silne ciśnienie; właśnie ciśnienie to zużytkowano w maszynach parowych.

§ 12. **Przyciąganie elektryczne.** — Inny jeszcze rodzaj sił występuje w zjawiskach *elektrycznych.* Kawałek laku lub szkła, potarty wełną lub jedwabiem, otrzymuje tak zw. ładunek elektryczny i wówczas posiada zdolność wywierać pewne siły na otaczające przedmioty, np. przyciągać kawałki papieru. W ścisłym związku z siłami elektrycznemi pozostają *siły magnetyczne,* które magnes wywiera na żelazo.

§ 13. **Ciśnienie i ciągnienie.** — W wielu wypadkach siła, działająca na ciało, nie wywołuje wcale ruchu. Tak np. kamień, leżący na stole, pozostaje w spoczynku, jakkolwiek siła ciążenia wciąż nań działa; gdybyśmy usunęli stół, to kamień natychmiast zacząłby spadać. Również pozostaje w spokoju kamień zawieszony na sznurze, którego koniec umocowano u sufitu, ale oczywiście siła ciążenia działać nie przestała, bo gdybyśmy tylko przecięli sznur, to kamień natychmiast podążyłby ku ziemi.

W wypadku pierwszym kamień wywiera ciśnienie na stół, stół zaś ze swej strony wywiera odwrotne ciśnienie na kamień. Tak więc na kamień działają dwie siły odwrotne, siła ciążenia i ciśnienie stołu; siły te nawzajem się znoszą lub równoważą, dzięki czemu kamień pozostaje w spoczynku.

W wypadku drugim kamień ciągnie za sznur, i odwrotnie sznur ciągnie kamień ku górze; to ciągnienie sznura równoważy siłę ciążenia, działającą na kamień.

§ 14. **Zmiana ruchu pod działaniem siły.** — Siła, działająca na ciało, będące w ruchu, wywołuje zawsze pewne zmiany tego ruchu. Rzućmy kamień pionowo w górę. Dopóki kamień pozostawał jeszcze w ręku, to ręka wywierała nań siłę, skierowaną ku górze, a ta siła nadawała kamieniowi ruch. Gdy kamień wyleci z ręki, to owa siła przestaje działać, i kamień wznosi się dalej dzięki ruchowi, który poprzednio otrzymał. Na kamień działa wciąż siła ciążenia, która usiłuje nadać mu ruch odwrotny, ku dołowi; siła ta niszczy stopniowo ruch wstępujący, kamień wznosi się coraz wolniej, aż ostatecznie ruch wyczerpie się całkowicie, i kamień zatrzyma się na chwilę. Osiągnie on w owej chwili największą wysokość. Ale siła ciążenia działać nie przestaje; pod jej wpływem kamień podąży ku dołowi i będzie poruszał się coraz prędzej, dopóki nie dojdzie do ziemi. Siła ciążenia opóźniała ruch kamienia podczas wznoszenia się i przyśpieszała ten ruch podczas spadania.

§ 15. **Bezwładność.** — Widzieliśmy, że ciało *samo przez się* nie może przejść ze stanu spoczynku do stanu ruchu, albo ze stanu ruchu do stanu ruchu odmiennego; ta właściwość ciał nazywa się *bezwładnością.* Mówimy, że ciała są bezwładne, lub że posiadają bezwładność. Następujące przykłady mają wykazać działanie bezwładności w różnych zjawiskach znanych.

Człowiek jedzie konno, wtem nagle koń stanął. Jeżeli jazda była szybka, to jeździec może wypaść z siodła i przelecieć przez łeb koński. Dlaczego tak się dzieje?

Ciało człowieka skutkiem bezwładności usiłuje poruszać się dalej w kierunku poprzednim, i jeżeli jeździec nie oprze się silnie o strzemiona (t. j. nie wywoła dużych sił, działających nań w kierunku odwrotnym do ruchu), to zostanie wyrzucony naprzód.

Gdy pociąg rusza ze stacyi, to szybkość jego wzrasta *stopniowo*, i dopiero po pewnym czasie pociąg osiąga pełną szybkość. Czy nie możnaby odrazu ruszyć z pełną szybkością?

Gdy pociąg ma ruszyć, to lokomotywa zaczyna działać na wagony z pewną siłą. Pod działaniem tej siły pociąg osiąga w ciągu pierwszej sekundy pewną bardzo małą szybkość. Tym sposobem na początku drugiej sekundy pociąg już posiada jakąś szybkość i z taką szybkością poruszałby się dalej, gdyby nawet lokomotywa przestała ciągnąć; ale lokomotywa ciągnie dalej, skutkiem czego w ciągu drugiej sekundy szybkość pociągu wzrośnie; w ciągu trzeciej sekundy szybkość otrzyma nowy przyrost i t. d. Powiększając siłę lokomotywy, możnaby w krótszym czasie dojść do pełnej szybkości, ale w każdym razie musi to odbywać się stopniowo.

Nasuwa się tu pytanie, do jakiej granicy może wzrastać szybkość pociągu pod działaniem siły lokomotywy? Granicę tę zakreślają opory, jakich doznaje pociąg w swym ruchu. Ważną rolę odgrywa tu opór powietrza, który wzrasta bardzo szybko ze wzrostem szybkości. Tak np. gdy szybkość się podwoi, to opór powietrza, czyli siła, z którą powietrze hamuje ruch pociągu, powiększy się cztery razy. Gdy szybkość wciąż wzrasta, to ostatecznie dojdzie do tego, że opór zrównoważy siłę lokomotywy, i od tej chwili wzrost szybkości ustaje. Ponieważ wówczas siła lokomotywy i opory znoszą się nawzajem, możemy więc uważać pociąg za ciało, na które żadne siły nie działają, a ruch takiego ciała musi być jednostajny.

Dla czego podczas biegu pociągu niebezpiecznie jest wyskakiwać ż wagonu? Bo ciało wyskakującego brało udział w ruchu wagonu; gdy nogi jego oprą się o ziemię, to tułów usiłuje poruszać się dalej w kierunku ruchu pociągu; skutkiem tego człowiek zostaje rzucony na ziemię i to tem gwałtowniej, im prędzej biegł pociąg. Im większa jest szybkość pociągu, tem niebezpieczniej wyskakiwać z wagonu.

§ 16. **Ruch pocisku**.—Wyobraźmy sobie działo, ustawione pod pewnym kątem do poziomu. Gdy następuje wystrzał, to kula wylatuje z działa i w pierwszej chwili biegnie po linii, stanowiącej przedłużenie lufy. Gdyby nie działała siła ciążenia, to kula poruszałaby się w tym samym kierunku bez końca. Ale ciążenie działa wciąż i stopniowo odchyla kulę od pierwotnego kierunku; skutkiem tego kula zatacza linię krzywą. Podobną linię zatacza kamień, rzucony w górę nie pionowo; strumień wody, wychodzący z sikawki, przybiera również kształt takiej linii.

ZAGADNIENIA.

1) Woda wypływa z otworu, zrobionego w dnie naczynia, i płynie strumieniem pionowym. Można zauważyć, że przy samym otworze strumień jest przezroczysty, zaś ku dołowi mętnieje. Jeżeli spadek jest dostatecznie duży, to u dołu wyraźnie woda spada w postaci kropli. W Szwajcaryi jest piękny wodospad, zwany Staubbach, w którym woda spada z bardzo dużej wysokości i dochodzi do ziemi w postaci pyłu wodnego, lub mgły. Jednem słowem płyn, spadając z góry, rozpada się na coraz drobniejsze kropelki. Dlaczego tak się dzieje?

Odpowiedź. Główna przyczyna działająca w tem zjawisku, jest taka. Wyobraźmy sobie dwie krople, z których jedna zaczęła spadać cokolwiek wcześniej od drugiej. W samym początku krople te znajdują się jedna tuż pod drugą i stanowią jakby jedną masę. Ale siła ciążenia działała na pierwszą kroplę nieco dłużej, a zatem nadała jej nieco większą szybkość. Skutkiem tego pierwsza kropla, poruszając się prędzej, wyprzedza drugą coraz bardziej. Odległość pomiędzy niemi wzrasta. Toż samo dotyczy wszystkich kropli, z których składa się strumień. W miarę spadania rozchodzą się one coraz dalej jedna od drugiej.

2) Każdy widział, jak malarz, pragnąc uwolnić pędzel od nadmiaru farby, nadaje mu szybki ruch na dół i nagle wstrzymuje. Dlaczego wówczas farba odpryskuje od pędzla? Dlaczego w wirówce (centryfudze) woda oddziela się od przędzy?

3) Wioślarz z rzadka tylko porusza wiosłami; dlaczego łódka płynie w należytym kierunku i w przerwach?

4) Gdy wielki okręt najedzie na skałę, to następstwem są zwykle duże uszkodzenia, chociażby szybkość okrętu była bardzo mała. Dlaczego tak się dzieje?

Odp. Do nagłego wstrzymania okrętu potrzebna jest ogromna siła, gdyż ciężar jego jest bardzo wielki. Siłę taką stanowi w danym razie parcie skały, zwykle ześrodkowane na drobną cząstkę powierzchni okrętu. Nic dziwnego, że materjał nie wytrzymuje takiego parcia.

ROZDZIAŁ III.

ZASADA DŹWIGNI.

§ 17. **Mierzenie siły.** — Na każde ciało działa siła ciążenia, ale na jedno ciało działa siła większa, na drugie — mniejsza. Aby zmierzyć siłę ciążenia, działającą na jakieś ciało, należy to ciało zważyć np. na wadze sprężynowej. Na fig. 4 widzimy właśnie jedną z najprostszych postaci tego przyrządu. Główną część jego stanowi silna sprężyna stalowa, zgięta w formie litery łacińskiej V. Dalej widzimy na rysunku dwa łuki metalowe; każdy z nich jest przymocowany do jednego końca sprężyny i przechodzi swobodnie przez otwór, wyrobiony w drugim końcu. Dzięki takiemu urządzeniu łuki nie stanowią przeszkody przy zginaniu sprężyny. Im silniej jest zgięta sprężyna, tem znaczniejsze części łuków wystają po obydwóch jej stronach, jak to widzimy na fig. 5. Swobodne końce łuków są zaopatrzone, jeden — w haczyk, a drugi — w kółko.

Fig. 4.

Gdy zawieszę na haczyku jakieś ciało ciężkie, to sprężyna się zegnie i to tem silniej, im cięższe jest owo ciało; tak więc ze zgięcia sprężyny można wnioskować o ciężarze ciała, czyli o natężeniu siły ciążenia, która na to ciało działa. Na jednym z łuków jest urządzona podziałka, na której można odrazu odczytać, ile waży zawieszone ciało. Jeżeli naprzykład łuk wysunie się poza sprężynę, aż do kreski, oznaczonej cyfrą 5, to znaczy, że dane ciało waży 5 kg, albo że siła ciążenia, działająca na nie, posiada natężenie 5 kg.

W kilogramach również można wyrażać natężenia innych sił, nie pochodzących z ciążenia, jak to widać z przykładu następującego.

Aby przesunąć ciężar, leżący na podłodze, ciągnę za sznur, przymocowany do ciężaru. Źródłem siły, która w tym razie działa na ciężar, jest naprężenie mych mięśni. Przy pomocy opisanego przyrządu można tę siłę zmierzyć. W tym celu przecinamy sznur i jeden z otrzymanych w ten sposób końców przywiązujemy do kółka przyrządu, zaś drugi — do haczyka, jak wskazuje fig. 5. Jeżeli teraz ciągnę za sznur, to na podziałce można odrazu odczytać, z jaką siłą jest wyprężony sznur, albo z jaką siłą działam na ciężar. Jeżeli np. łuk z podziałką wysunie się aż do kreski, oznaczonej cyfrą 12, to znaczy, że ciągnę z siłą 12 kg. Gdybym utrzymywał w zawieszeniu ponad podłogą ciężar 12 kg, to mięśnie moje byłyby tak samo wyprężone, jak obecnie.

Fig. 5.

Waga sprężynowa bywa często nazywana *dynamometrem,* szczególnie gdy, jak w ostatnim przykładzie, służy do mierzenia sił, nie pochodzących z ciążenia.

§ 18. **Kierunek siły.** — Na stole leży ciężkie ciało niewielkich rozmiarów; przywiązuję doń sznur i ciągnę poziomo w jakimkolwiek kierunku. Jeżeli ciągnę dostatecznie silnie, to ciało zacznie się poruszać w kierunku sznura. Mówimy, że taki właśnie jest kierunek siły, którą wywieram na ciało. Aby ocenić, jaki skutek wywrze siła, przyłożona do pewnego ciała, potrzeba znać nietylko wielkość lub natężenie tej siły, ale i kierunek, w którym działa.

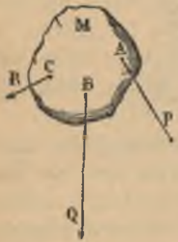

Fig. 6.

Na fig. 6 mamy wyobrażone ciało M; w punkcie A działa nań pewna siła w kierunku AP; również w punktach B i C są przyłożone siły, skierowane odpowiednio według prostych BQ i CR.

Możemy w ten sposób wyobrażać kierunki sił zapomocą linii prostych; strzałki, porobione na tych linjach, mają oznaczać, że siły ciągną, a nie pchają.

§ 19. **Natężenie siły.** — Można również urządzić się tak, aby długość odcinka linii, wskazującej kierunek, wyobrażała wielkość lub natężenie siły. Zróbmy np. pomiędzy sobą umowę następującą: jeden centymetr ma wyobrażać siłę jednego kilograma, dwa centymetry — siłę dwóch kilogramów i t. d. Przy takiej umowie odcinki AP, BQ i CR na fig. 6 wskazują w sposób kompletny, jakie siły działają na ciało M. Tak np. odcinek AP wskazuje, że do punktu A ciała M pzyłożona jest siła, że siła ta wynosi półtora kg (bo odcinek AP ma $1^1/_2$ cm), i że działa ona w kierunku AP, to jest usiłuje przysunąć punkt A do P.

§ 20. **Składanie sił.** — Wypada nieraz rozważać, jaki skutek wywrą dwie lub więcej sił, działających jednocześnie na pewne ciało. Przypuśćmy dla przykładu, że *dwie siły działają na jeden i ten sam punkt ciała w tym samym kierunku.* Dla każdego jest rzeczą oczywistą, że takie dwie siły razem wywrą taki sam skutek, jak siła jedna, przyłożona w tym samym punkcie, działająca w tym samym kierunku i równa pod względem natężenia sumie tamtych dwóch. Jeżeli np. siły dane mają odpowiednio 2 i 5 kg, to zastąpi je całkowicie siła jedna o natężeniu 7 kg. Owe siły dane nazywają się *składowemi*, a siła, która je może zastąpić, *wypadkową.*

Jeżeli siły działają na różne punkty ciała, albo posiadają różne kierunki, to sprawa jest nie tak łatwa, tem niemniej w wielu wypadkach można wyznaczyć siłę, która wywarłaby taki sam skutek, co kilka sił danych, czyli wypadkową kilku danych składowych. Czynność, przy pomocy której wyznacza się wypadkową, zowie się składaniem sił.

§ 21. **Siły równoległe.** — Rozważymy przedewszystkiem wypadek, gdy dwie siły, działające na ciało, są *równoległe.* Do tego będzie nam potrzebny przyrząd, wyobrażony na fig. 7.

Widzimy tam prosty sztywny drążek drewniany AB, zawieszony w środkowym punkcie C. Zawieszenie jest tak urządzone, że drążek może się swobodnie obracać około tego punktu zawieszenia C. Przednia strona drążka jest podzielona kreskami na jednakowe części; przypuśćmy dla przykładu, że długość każdej części wynosi 10 cm.

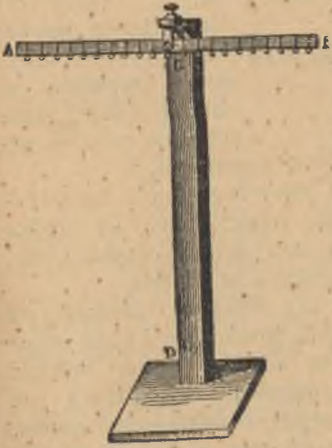

Fig. 7.[1]

Pod każdą kreską jest urządzone uszko, na którem można zawiesić ciężar. Prócz tego mamy pewną ilość jednakowych ciężarów, podobnych do gwichtów, ale każdy z nich jest zaopatrzony w dwa haczyki, jeden — u góry, drugi — u dołu. Przypuśćmy dla okrągłego rachunku, że każdy z tych ciężarów waży 1 kg. Gdy taki ciężar wisi na drążku, to wywiera on na drążek siłę, skierowaną pionowo; jeżeli zawiesimy na drążku kilka ciężarów, to wszystkie siły, działające na drążek, jako pionowe, będą równoległe.

Pierwsze doświadczenie będzie takie. Zawieszamy na drążku dwa tylko co opisane ciężary w jednakowych odległościach od środka.

Fig. 8.

Na fig. 8, która to doświadczenie wyobraża, odległość każdego ciężaru od środka wynosi 40 cm. Zauważymy, że drążek pozostanie poziomym, i istotnie niema żadnego powodu, dlaczegoby miał się on nachylić w jedną stronę, a nie w drugą.

Zdejmujemy teraz ciężary i zawieszamy je pośrodku drążka, jak wskazuje fig. 9. Drążek i teraz zachowa położenie poziome i oczywiście wywiera on obecnie takie same ciśnienie na swe zawieszenie, jakie wywierał poprzednio.

Fig. 9.

Tak więc dwie siły równoległe po 1 kg, przyłożone w jednakowych odległościach od środka drążka, wywierają ten sam skutek, co jedna siła, wynosząca 2 kg, przyłożona w środku.

Wogóle, jeżeli dwie siły składowe, działające na ciało sztywne, są równe, równoległe i skierowane w tę samą stronę, to siły te można zastąpić przez jedną siłę wypadkową; wypadkowa jest równoległa do składowych, równa ich sumie, i przyłożona w środku odcinka, łączącego punkty przyłożenia składowych.

Zawieśmy teraz na drążku 11 jednakowych ciężarów, jak wskazuje fig. 10. Ponieważ są one rozmieszczone jednakowo po obydwóch stronach środka, to oczywiście drążek zachowa położenie poziome. Zdejmujemy teraz po pięć ciężarów z każdej strony środka i zawieszamy je tak, jak wskazuje fig. 11. Oczywiście ciśnienie, jakie drążek wywiera na swe zawieszenie, nie zmieni się i wy-

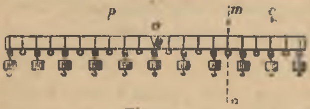

Fig. 10.

nosi obecnie, jak i poprzednio, 11 kg, powiększonych o ciężar samego drążka.

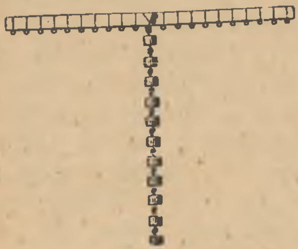

Fig 11.

Zrobimy teraz inaczej. Zawieśmy ciężary, jak na fig. 10, i poprowadźmy kreskę mn przez szóstą podziałkę drążka, licząc od prawego końca. Tym sposobem podzieliliśmy cały drążek na dwie części: prawą z 3 ciężarami i lewą z 8 ciężarami. Na prawej części uczyńmy zmianę następującą. Ciężar środkowy, zawieszony pod kreską q, pozostawmy na miejscu, zaś dwa ciężary pozostałe zawieśmy również pod kreską q. Jak wiemy z rozważań poprzednich, działanie tych dwóch ostatnich ciężarów na drążek skutkiem tego nie zmieni się, a zatem drążek zachowa i nadal położenie poziome.

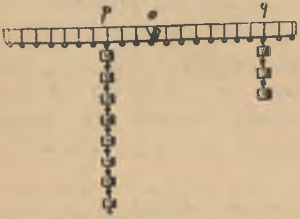

Fig. 12.

Ciężary lewej strony, jak widać z rysunku, są jednostajnie rozłożone po obydwóch stronach kreski p. Możemy więc zdjąć wszystkie te ciężary i zawiesić je pod kreską p, skutkiem czego działanie ich na drążek nie ulegnie zmianie.

Tym sposobem doszliśmy do układu ciężarów, wyobrażonego na fig. 12. I przy takim układzie drążek pozostaje w położeniu poziomem.

Porównajmy teraz fig. 12 z fig. 11. Na fig. 12 mamy dwie siły: jedna z nich, prawa, ma 3 kg, i jest przyłożona w punkcie q, druga, lewa, ma 8 kg i jest przyłożona w punkcie p; zaś na fig. 11 mamy jedną siłę 11 kg, przyłożoną w środku drążka (punkt o na fig. 10 i 12). Wiemy, że ta ostatnia siła wywiera taki sam skutek, jak 11 sił na fig. 10, a te 11 sił wywierają znowu ten sam skutek, co dwie siły na fig. 12. Ostatecznie wypada, że skutek jednej siły 11 kg, przyłożonej w punkcie o, jest taki sam, jak skutek dwóch sił 3 i 8 kg, przyłożonych w punktach q i p, lub innemi słowy, pierwsza z tych sił jest wypadkową dwóch pozostałych.

Z rozważań powyższych wynika przedewszystkiem,. że *wypadkowa dwóch sił równoległych, skierowanych w jedną stronę, jest do nich równoległa, skierowana w tę samą stronę, i pod względem natężenia równa ich sumie.* Potrzeba jeszcze zastanowić się, gdzie jest przyłożona ta wypadkowa.

W naszym przykładzie siły składowe są przyłożone w q i p, a wypadkowa — w o. Odległość po wynosi 30 cm, a odległość oq — 80 cm; pierwsza z tych odległości jest $^3/_8$ razy większa od drugiej, czyli stosunek po do oq jest równy $^3/_8$. Lecz również stosunek prawej siły składowej do lewej wynosi $^3/_8$. Związek ten wyrazimy krótko w sposób następujący: *punkt przyłożenia wy-*

padkowej dzieli odcinek, zawarty pomiędzy punktami przyłożenia składowych, odwrotnie proporcyonalnie do tych składowych.

Mówimy «odwrotnie proporcyonalnie,» gdyż stosunek lewej części odcinka (po) do prawej (oq) jest taki, jak stosunek prawej składowej do lewej. Gdyby stosunek lewej części do prawej był taki, jak stosunek lewej składowej do prawej, to powiedzielibyśmy «wprost proporcyonalnie.»

Jeżeli znamy punkty przyłożenia i natężenia składowych, to możemy wyznaczyć punkt przyłożenia wypadkowej w sposób następujący. Dzielimy odcinek, zawarty między punktami przyłożenia składowych, na tyle równych części, ile kilogramów zawiera wypadkowa (albo ile kg mają razem obydwie składowe); odległość punktu przyłożenia wypadkowej od punktu przyłożenia jednej ze składowych będzie zawierała tyle owych części, ile kilogramów ma druga składowa. *)

§ 22. **Przykład.** Na fig. 13 widzimy ciało M, na które działają cztery siły równoległe, a mianowicie: siła 3 kg, przyłożona w punkcie A, siła 5 kg, przyłożona w E, siła 4 kg, przyłożona w C, i wreszcie siła 1 kg, przyłożona w D. Pragniemy wyznaczyć wypadkową tych wszystkich sił.

Przedewszystkiem dwie pierwsze siły, przyłożone w punktach A i B, zastąpimy przez ich wypadkową. Wiemy, że ta wypadkowa ma 8 kg

---

*) Jeżeli składowe zawierają części kilograma, to, aby uniknąć ułamków, należy dane siły wyrazić w mniejszych jednostkach, np. w hektogramach (hektogram zawiera 100 gramów i stanowi $^1/_{10}$ część kilograma) albo w gramach.

i jest równoległa do sił danych. Jej punkt przyłożenia znajdziemy sposobem, podanym w § poprzedzającym. W tym celu dzielimy odcinek AB na 8 równych części, i piąty punkt podziału od A, albo trzeci od B, będzie szukanym punktem przyłożenia. Punkt ten oznaczono na rysunku literą O.

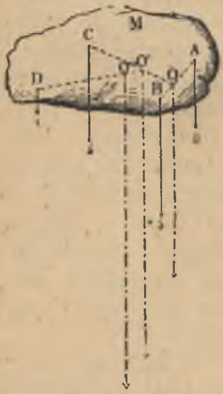

Fig 13.

Mamy już teraz tylko trzy siły, przyłożone w punktach O, C i D. Dwie pierwsze z tych sił zastąpimy znowu przez ich wypadkową. Oczywiście ma ona 8+4 (albo 3+5+4), czyli 12 kg. Aby wyznaczyć jej punkt przyłożenia dzielimy odcinek OC na 12 równych części, i czwarty punkt od O, albo ósmy od C, będzie punktem szukanym (na rysunku O′).

Wyznaczymy wreszcie wypadkową owej siły 12 kg, przyłożonej w O′, i ostatniej siły, przyłożonej w D. Będzie to wypadkowa wszystkich sił danych. Jest ona równa oczywiście 12+1 albo 3+5+4+1 czyli 13 kg. Jej punkt przyłożenia O″ wyznaczymy w sposób znany.

Z przykładu tego wynika, że dowolną ilość sił równoległych i skierowanych w jedną stronę, można zawsze sprowadzić do jednej siły wypadkowej; wypadkowa ta jest równoległa do sił danych i równa ich sumie.

§ 23. **Dźwignia.** Dźwignia jest to narzędzie wielce użyteczne; jedną z licznych jej postaci wyobraża fig. 14. Widzimy tam mocny drążek AB,

Fig. 14.

zapomocą którego robotnik usiłuje podźwignąć ciężar M. Ciężar ciśnie na prawy koniec drążka, oznaczony literą A, zaś robotnik działa z pewną siłą na drugi koniec B. Drążek jest oparty w punkcie C o odpowiednią podstawkę i może obracać się około tego punktu. Odcinki AC i BC, albo odległości punktów przyłożenia sił od punktu oparcia, zowią się *ramionami* dźwigni.

Dajmy na to, że ciężar został nieco uniesiony i robotnik utrzymuje go w położeniu, wyobrażonem na naszym rysunku. Zwróćmy uwagę przedewszystkiem na dwie siły, przyłożone do dźwigni w punktach A i B; pierwszą wywiera ciężar M, drugą — robotnik. Obydwie te siły są skierowane ku dołowi. Można je uważać za równoległe, a zatem dadzą się one zastąpić przez jedną siłę wypadkową, która wywrze ten sam skutek, co obydwie składowe. Wypada teraz rozważyć pytanie, w którym punkcie drążka jest przyłożona ta wypadkowa.

Odpowiedź na to pytanie narzuca się sama przez się. Jeżeli robotnik pragnie, aby dźwignia i ciężar pozostawały w spoczynku, to musi on tak wymiarkować siłę, z którą działa na punkt B, aby owa wypadkowa była przyłożona w punkcie C. Przypuśćmy na chwilę, że jest inaczej, że wypadkowa jest przyłożona nie w punkcie C, lecz z lewej strony tego punktu i działa np. według linii mn. W takim razie oczywiście dźwignia nie zostałaby w spokoju. Zaczęłaby ona się obracać około punktu C, przyczem koniec B schodziłby na dół. Gdyby wypadkowa była przyłożona z prawej strony punktu C i działała np. według linji rq, to dźwignia obracałaby się w kierunku odwrotnym. Tak więc jeżeli dźwignia pozostaje w spoczynku, to wypadkowa sił, przyłożonych w punktach A i B, jest niewątpliwie przyłożona w punkcie C. Z tego zaś wynika, że punkt C dzieli odcinek AB odwrotnie proporcyonalnie do sił składowych.

Przypuśćmy, że ramię BC jest 5 razy dłuższe od ramienia AC, i że ciężar ciśnie na punkt A z siłą 5 kg. Podzielmy całą dźwignię na 6 równych części. W takim razie ramię BC zawiera 5 takich części, t. j. właśnie tyle, ile kilogramów działa na punkt A; stąd wynika, że w punkcie B musi działać tyle kilogramów, ile owych części zawiera ramię AC, innemi słowy robotnik powinien wywierać na punkt B siłę 1 kg, czyli siłę 5 razy mniejszą od tej, którą wywiera ciężar.

Gdyby ciężar wywierał siłę 100 kg, to robotnik powinien działać z siłą tylko 20 kg, i t. d.

Wogóle siła robotnika powinna być tyle razy mniejsza od siły, wywieranej przez ciężar, ile ramię AC jest krótsze od ramienia BC. Gdyby pierwsze było 10 razy krótsze od drugiego, to robotnik działałby z siłą 10 razy mniejszą od siły, z którą ciśnie ciężar.

§ 24. **Beźmian.** Fig. 15 wyobraża przyrząd, w którym mamy inne zastosowanie dźwigni. Jest to tak zwany beźmian, używany dawniej powszechnie do ważenia ciężarów; dzisiaj spotykamy go rzadziej.

Główną częścią tego przyrządu jest sztywny drążek AB, zawieszony w punkcie C;

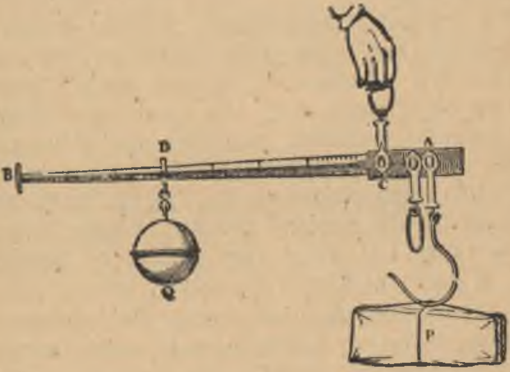

Fig. 15.

około tego punktu drążek może się swobodnie obracać. Do drążka jest przyczepiony gwicht Q, ważący, dajmy na to, 1 kg; zawieszenie jest urządzone w taki sposób, że gwicht można przesuwać wzdłuż drążka.

Przedmiot, który ma być zważony, przyczepiamy do haka, zawieszonego na drążku w punkcie A; następnie przesuwamy gwicht Q wzdłuż drążka, dopóki nie natrafimy na takie położenie, przy którem gwicht i przedmiot P równoważą się nawzajem, i drążek nie przechyla się ani na jedną ani na drugą stronę. Dajmy na to, że nastąpi to wtedy, gdy gwicht zajmie położenie, wskazane na rysunku, gdy więc jest zawieszony w punkcie D. Mamy teraz dźwignię, której ramionami są odcinki CA i CD, i na którą działają dwie siły równoległe, a mianowicie ciężar przedmiotu P i ciężar gwichtu Q.

Z § poprzedzającego wiemy, że ciężar przedmiotu jest tyle razy większy od ciężaru gwichtu (lub zawiera tyle kilogramów), ile razy ramię CD jest dłuższe od ramienia AC. Na lewej części drążka jest zrobiona podziałka, na której można bez mierzenia odczytać stosunek ramienia lewego do prawego albo wagę przedmiotu P. Tak np. na naszym rysunku gwicht wisi na czwartej kresce, znaczy to, że ramię CD jest 4 razy dłuższe od ramienia AC, a zatem przedmiot P waży 4 kg.

§ 25. **Reakcya.** Jest rzeczą dla każdego oczywistą (była już o tem mowa), że gdy przyłożymy do pewnego punktu ciała dwie siły równe lecz odwrotne, to siły te zniosą się nawzajem i nie wywrą żadnego wpływu na ruch ciała. Odwrotnie, jeżeli wiemy, że na ciało działa pewna siła, a pomimo to pozostaje ono w spokoju, to musimy przyjść do wniosku, że na ciało działa prócz tego jeszcze inna siła, równoważąca działanie pierwszej.

Na stole leży kamień; pozostaje on w spokoju pomimo to, że działa nań siła ciążenia, której podlegają wszystkie ciała na ziemi; musi więc istnieć inna siła, znosząca skutki tamtej. Siłę taką wywiera stół; ciśnie on na kamień pionowo w górę z siłą równą ciężarowi. Ową siłę, wywieraną przez stół, nazywamy *reakcyą*, albo odporem stołu.

§ 26. **Równowaga.** Dajmy na to, że na ciało działa pewna ilość sił, lecz działania ich znoszą się nawzajem, i wszystkie siły razem nie wywierają żadnego skutku; mówimy wówczas, że siły te *się równoważą* lub *pozostają w równowadze.* Tak np. siła ciążenia, działająca na kamień, i reakcya stołu w przykładzie z § poprzedzającego pozostają w równowadze.

W wypadku dźwigni, wyobrażonej na fig. 14, również zachodzi równowaga, ale trzeba dodać, że prócz dwóch sił, które rozważaliśmy w § 23, na dźwignię działa jeszcze trzecia siła, a mianowicie reakcya podstawki. Widzieliśmy, że siły, działające na punkty A i B, łączą się w jedną wypadkową, równą ich sumie i przyłożoną w punkcie C. Reakcya podstawki jest równa i odwrotna do tej wypadkowej i działa także na punkt C dźwigni, bo tylko w punkcie C dźwignia styka się z podstawką. Tym sposobem wypadkowa i reakcya znoszą się nawzajem, a zatem trzy siły, działające na dźwignię, pozostają w równowadze.

§ 27. **Inny rodzaj dźwigni.** Na fig. 16 widzimy drążek BC, który może się swobodnie obracać około punktu C. Do drążka są przedewszystkiem przyłożone dwie siły równoległe w punktach B i A. Na rysunku jedną z nich oznaczono literą P, a drugą — literą Q. Możemy uważać np., że Q jest ciężarem jakiegoś ciała, przyczepionego do drążka w punkcie A, a P — siłą, z którą robotnik działa na punkt B.

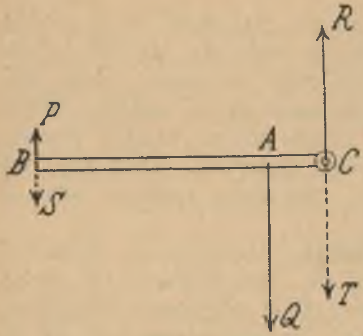

Fig. 16.

Urządzenie takie nazywa się *dźwignią,* podobnie, jak urządzenie, wyobrażone na fig. 14. Odległości punktów przyłożenia sił od punktu oparcia A, czyli odcinki AC i BC nazywają się i tutaj ramionami dźwigni.

Dajmy na to, że dźwignia pozostaje w spokoju, czyli, że siły, działające na nią, równoważą się. Znajdziemy, w jakim stosunku pozostaje siła P do Q.

Jest rzeczą oczywistą, że prócz sił P i Q na drążek działa jeszcze trzecia siła, i jest nią reakcya punktu oparcia C. Jest ona równoległa do siły P i skierowana w tę samą stronę. Wypadkowa sił P i R równoważy siłę Q, a zatem jest jej równa pod wzgledem natężenia, lecz odwrotna pod względem kierunku. Wynika stąd, że siła Q jest pod względem natężenia równa sumie sił P i R.

Wyobraźmy sobie teraz, że punkt oparcia, (albo czop, na którym jest osadzona dźwignia), został przeniesiony z punktu C do punktu A, i jednocześnie w C przyłożono siłę R, równą reakcyi dawnego punktu oparcia, oraz usunięto ciężar Q. Łatwo można się przekonać, że i przy takiem urządzeniu drążek pozostanie w równowadze; mianowicie nowy punkt oparcia wywrze reakcyę równą sile Q, a ta siła, jak wiemy, równoważy siły P i R. Obecnie mamy już dźwignię taką, jak na fig. 14, tylko że tam siły są skierowane ku dołowi, a tutaj — ku górze. Stąd zaś wynika, że siła R jest tyle razy większa od P, ile razy ramię AB jest większe od ramienia AC.

Przypuśćmy dla przykładu, że AB jest cztery razy większe od AC, i że siła P wynosi 1 kg; w takim razie siła R ma 4 kg, a siła Q $1+4=5$ kg. Widzimy więc, że siła P jest 5 razy mniejsza od siły Q, lecz i ramię AC jest 5 razy mniejsze od ramienia BC.

Doszliśmy tutaj do tego samego wyniku, co w wypadku dźwigni, wyobrażonej na fig. 14. Siła robotnika jest tyle razy mniejsza od siły, którą wywiera ciężar, ile razy ramię ciężaru jest mniejsze od ramienia, na które działa robotnik.

Do tych samych wniosków możemy dojść na innej drodze. Przypuśćmy, jak poprzednio, że punkt oparcia dźwigni znajduje się w punkcie C, że odcinek AB jest 4 razy dłuższy od AC, i że siła Q ma 5 kg; pragniemy znaleźć, z jaką siłą należy działać na punkt B, aby dźwignia pozostała w równowadze.

Wiemy, że w pewnych razach można dwie siły, działające na ciało, zastąpić przez jedną, a mianowicie przez ich wypadkową, można i odwrotnie zastąpić jedną siłę przez dwie siły inne, dla których pierwsza jest wypadkową, czyli *rozłożyć siłę na dwie składowe.* Otóż rozłóżmy siłę Q na dwie składowe równoległe do niej; jedna z nich ma być przyłożona w punkcie B (na fig. 16 oznaczono ją literą S), a druga (T) ma być przyłożona w punkcie C. Aby wyznaczyć natężenia tych sił, podzielmy BC na 5 równych części, gdyż wypadkowa Q ma 5 kg. Odcinek AB zawiera cztery takie części, a odcinek AC — jedną; stąd wynika, że składowa S ma 1 kg, a składowa T — 4 kg. Składowa T działa na nieruchomy punkt drążka, a zatem nie wywrze żadnego skutku — innemi słowy — równoważy się z reakcyą punktu opacia. Aby dźwignia pozostała w równowadze, potrzeba jeszcze tylko zrównoważyć składową S, a do tego należy przyłożyć w punkcie B siłę równą i odwrotną do S, czyli siłę 1 kg, skierowaną w górę. Tak więc, jeżeli na punkt A działa siła 5 kg, to dla równowagi na punkt B musi działać 1 kg. Ten sam wynik osiągnęliśmy poprzednio.

§ 28. **Wentyl bezpieczeństwa.** Na fig. 17 widzimy ważne zastosowanie dźwigni, opisanej w § poprzedzającym. Jest to tak zwany wentyl bezpieczeństwa. W wentyl taki musi być zaopatrzony każdy kocioł parowy, aby ciśnienie nie przekraczało granicy dozwolonej.

Na naszym rysunku widzimy przedewszystkiem rurę R, wyobrażoną w przekroju. Rura ta łączy się z przestrzenią parową kotła, a więc panuje w niej to samo ciśnienie, co i w kotle. Wylot rury R jest szczelnie zamknięty przez grzybek wentyla ab. Widzimy tam prócz tego drążek, czyli dźwignię EF; jej punktem oparcia jest czop F.

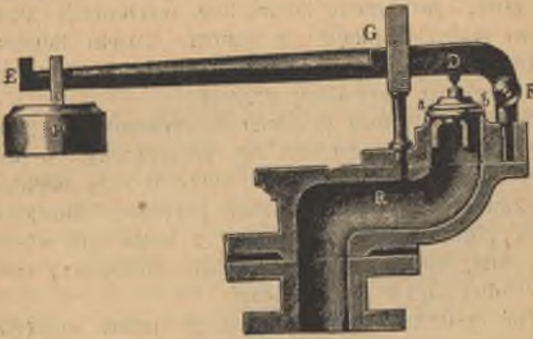

Fig. 17.

Para usiłuje podnieść grzybek ab w górę, skutkiem czego grzybek ciśnie na punkt D dźwigni z siłą skierowaną pionowo w górę. Prócz tego na dźwignię działa jeszcze pionowo na dół ciężar przeciwwagi P, którą można przesuwać wzdłuż drążka. Za długość jednego ramienia tej dźwigni należy uważać odległość pomiędzy pionem, przechodzącym przez F, i pionem przez D, zaś długość drugiego ramienia jest równa odległości pomiędzy pionem przez F i pionem przez punkt zawieszenia przeciwwagi P. W wypadku, wyobrażonym na naszym rysunku, drugie ramię jest 7 razy większe od pierwszego.

Gdy ciśnienie pary w kotle jest tak wysokie, że grzybek działa na dźwignię z siłą 7 razy większą niż przeciwwaga, to dźwignia właśnie pozostaje w równowadze. Jeżeli ciśnienie pary jest jeszcze większe, to równowaga zostaje zachwiana, grzybek wraz z dźwignią unosi się w górę, para może swobodnie wychodzić, skutkiem czego ciśnienie się obniża. Dzięki takiemu urządzeniu ciśnienie w kotle nie może przekroczyć pewnej określonej granicy.

Możemy granicę tę zmieniać, przesuwając przeciwwagę P. Przesuńmy np. przeciwwagę w prawo, tak aby ramię jej było tylko 6 razy większe od ramienia, na które działa grzybek. Skutkiem tego para zacznie wychodzić z kotła już wtedy, gdy siła, którą wywiera grzybek, przekroczy sześciokrotny ciężar przeciwwagi.

Na rysunku widzimy jeszcze jeden szczegół, o którym dotychczas nie było wzmianki, a mianowicie prowadnik G. W górnej części posiada on wydłużone prostokątne ucho (nie widoczne na rysunku), przez które swobodnie przechodzi drążek dźwigni. Dzięki temu urządzeniu, w razie nagłego wzrostu ciśnienia pary, dźwignia nie może być zbyt wysoko wyrzucona w górę, i grzybek nie może wypaść z siedzenia. Na tem polega głównie rola prowadnika G.

§ 29. **Dźwignia łamana.** Uważaliśmy dotychczas, że dźwignię tworzy drążek prosty, i że działają na nią siły równoległe. Obecnie rozważymy *dźwignię łamaną,* wyobrażoną na fig. 18;

może ona się obracać około punktu C, a więc C jest punktem oparcia; siły są przyłożone w punktach A i B i mają kierunki prostopadłe do ramion AC i BC.

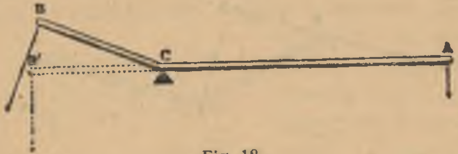

Fig. 18.

Wyobraźmy sobie, że ramię AC zostało przedłużone aż do punktu B' tak, że CB' jest równe CB, i że zamiast siły, przyłożonej w B, w punkcie B' działa siła prostopadła do ramienia CB' i równa tamtej. Jest rzeczą jasną, że o ile chodzi o obracanie dźwigni, to nowa siła wywrze taki sam skutek, jak siła, przyłożona w B. Uważajmy teraz prostą dźwignię ACB'. Pozostanie ona w równowadze, jeżeli siła, przyłożona w punkcie A, jest tyle razy mniejsza od siły, przyłożonej w B', ile razy ramię B'C jest krótsze od ramienia AC, a stąd wynika, że dźwignia łamana pozostanie w równowadze, jeżeli siła, działająca na punkt A jest tyle razy mniejsza od siły, działającej na B, ile razy ramię BC jest krótsze od ramienia AC.

Zdarza się nieraz, że siły, działające na dźwignię, nie są prostopadłe do ramion. Taki właśnie wypadek widzimy na fig. 19. Przypuśćmy, że dźwignia ta pozostaje w równowadze. Przeprowadźmy z punktu C prostą CA' prostopadłą do kierunku siły, przyłożonej w punkcie A, i wyobraźmy sobie, że ramię AC zastąpiono przez ramię A′C, przyczem siła nie uległa zmianie ani pod względem kierunku, ani pod względem wielkości, lecz jedynie jej punkt przyłożenia został

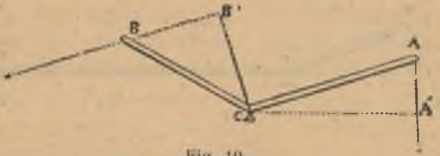

Fig. 19.

przeniesiony z punktu A do punktu A′. Oczywiście i po tej zmianie dźwignia pozostanie w równowadze. Taksamo możemy zastąpić w wyobraźni ramię BC przez ramię B′C, prostopadłe do siły, przyłożonej w punkcie B. Tym sposobem zamiast dźwigni ACB otrzymaliśmy dźwignię A′CB′, na którą działają siły, prostopadłe do ramion, czyli doszliśmy do wypadku poprzedzającego. Teraz już znajdziemy bez trudności, w jakim stosunku powinny stać do siebie siły, aby dźwignia pozostawała w równowadze.

Można wypowiedzieć proste prawidło ogólne, obejmujące wszystkie rozważane przez nas wypadki dźwigni, do tego jednak musimy nieco zmienić sposób wyrażania się. Będziemy mianowicie nazywali długością ramienia, albo wprost ramieniem siły, nie długość drążka pomiędzy punktem oparcia a punktem przyłożenia siły, lecz długość prostopadłej, przeprowadzonej z punktu oparcia do siły.

Dzięki umowie powyższej możemy powiedzieć ogólnie: *dwie siły, działające na dźwignię, po-*

zostają w równowadze, jeżeli pierwsza jest tyle razy większa od drugiej, ile razy ramię drugiej jest większe od ramienia pierwszej.

Prawidło to można jeszcze sprawdzić zapomocą prostego doświadczenia, które wyobraża fig. 20.

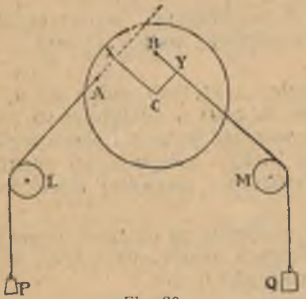

Fig. 20.

Widzimy tu okrągłą tarczę, osadzoną na poziomej osi C, około której może się swobodnie obracać. Do tarczy są w punktach A i B przyczepione dwa sznury, które przechodzą następnie przez bloki L i M; do końców tych sznurów przyczepiamy dowolne ciężary P i Q. Zauważymy, że tarcza pod działaniem sił P i Q przybiera pewne określone położenie; gdybyśmy ją odchylili od tego położenia, to powróci do niego znowu, jak tylko pozostawimy ją samej sobie.

Sznury tworzą na tarczy pewne linie, według których siły P i Q działają na tarczę. Wykreślmy na tarczy proste CX i CY, prostopadłe do tych linii, i zmierzmy ich długości. Znajdziemy zawsze, że CX jest tyle razy dłuższe od CY, ile razy siła Q jest większa od P, i tak właśnie być powinno według wyżej podanego prawidła.

W doświadczeniu tem rolę dźwigni odgrywa tarcza, i taki rodzaj dźwigni jest właśnie w danym razie najdogodniejszy, gdyż tarcza całym swym ciężarem opiera się na osi, czyli innemi słowy, ciężar tarczy całkowicie równoważy się reakcyą osi; gdyby nie to, musielibyśmy rachować się z nim przy wyciąganiu wniosków.

ZAGADNIENIA.

1) Odcinek, mający 8 cm długości, wyobraża siłę 4 kg. Jaką siłę wyobraża odcinek, mający 12 cm?
Odp. 6 kg.

2) Dwie siły równoległe, z których jedna ma 9, a druga 7 kg, są przyłożone do ciała w odległości 96 cm. Wyznaczyć wypadkową i wskazać jej punkt przyłożenia.
Odp. Wypadkowa ma 16 kg; odległość jej punktu przyłożenia od punktu przyłożenia pierwszej składowej (9 kg) wynosi 42 cm.

3) Ciężki stół stoi na podłodze na czterech nogach; każda noga ciśnie na podłogę z pewną siłą; czemu jest równa wypadkowa tych wszystkich sił?
Odp. Ciężarowi stołu.

4) Na moście, którego rozpiętość wynosi 90 m, stoi lokomotywa, ważąca 30 tonn (tonna ma 1000 kg), w odległości 27 m od jednego końca mostu. Znaleźć, jaką część ciężaru lokomotywy podtrzymuje każdy przyczołek?
Odp. 21 i 9 tonn

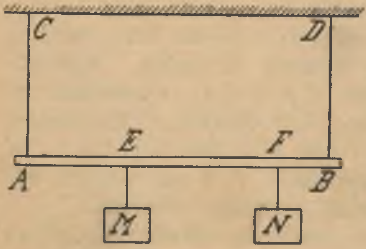

Fig. 21.

5) Poziomy drążek AB (fig. 21) o długości 6 m wisi na dwóch pionowych sznurach AC i BD. Do drążka w punktach E i F są przyczepione ciężary M i N, z których pierwszy ma 4 kg, a drugi 8 kg. Odcinek AE=2 m, EF=3 m. Wyznaczyć siły, które działają na każdy ze sznurów, podtrzymujących drążek.

Odp. Na AC działają 4 kg, a na BD 8 kg. Należy wyznaczyć wypadkową sił M i N, a następnie zastąpić tę wypadkową przez dwie składowe, przyłożone w punktach A i B. Albo trzeba każdy ciężar zastąpić przez dwie składowe, przyłożone w punktach A i B.

6) Gdy na haku beźmianu (fig. 15) wisi przedmiot, ważący 2 kg, to ramię CD dla równowagi musi mieć 25 cm. Zawieszamy na haku inny przedmiot; równowaga następuje dopiero wtedy, gdy ramię CD ma 75 cm. Ile waży ten drugi przedmiot?

Odp. 6 kg.

7) W beźmianie, wyobrażonym na fig. 15, odległość AD wynosi 56 cm; gwicht Q waży $1^1/_2$ kg, a przedmiot P — $5^1/_2$ kg. Wyznaczyć długości ramion AC i DC.

Odp. 12 i 44 cm.

8) Kocioł parowy nie pracuje, i para nie wywiera ciśnienia na grzybek wentyla bezpieczeństwa (fig. 17); pomimo to oczywiście dźwignia pozostanie w równowadze. Jaka siła równoważy w tym razie ciężar P?

9) W wentylu bezpieczeństwa, wyobrażonym na fig. 17, ramię, na które działa grzybek, ma $7^1/_2$ cm długości, przeciwwaga waży 12 kg, a przekrój wentyla (czyli przekrój wylotu rury, który zamyka grzybek) zawiera 8 centymetrów kwadratowych. Jak należy ustawić przeciwwagę, aby ciśnienie w kotle nie przekraczało 9 atmosfer?

Odp. Ciśnienie jednej atmosfery, działając na 1 kw. cm przekroju, wywiera siłę 1 kilograma. W danym więc razie, przy najwyższem ciśnieniu dozwolonem, czyli przy 9 atmosferach, para działałaby na grzybek z siłą $9 \times 8 = 72$ kg. Wiedząc to, znajdziemy łatwo, że ramię przeciwwagi powinno mieć 45 cm długości, a odległość jej punktu zawieszenia od D powinna wynosić $37^1/_2$ cm.

10) Na fig. 20 ciężar P ma 2 kg, Q — 3 kg, a długość ramienia CX wynosi 120 mm. Ile mm ma ramię CY, gdy tarcza pozostaje w spokoju?

Odp. 80 mm.

ROZDZIAŁ IV.

RÓWNOLEGŁOBOK SIŁ.

§ 30. **Równowaga trzech sił.** Na pewne drobne ciało, oznaczone na fig. 22 literą O, powiedzmy cząsteczkę O, działają trzy siły P, Q i R; przypuśćmy, że siły te są równe pod względem natężenia i tworzą ze sobą kąty równe. Można przekonać się łatwo, że siły takie pozostają w równowadze.

Fig. 22.

Dajmy na to, że początkowo, zanim siły P, Q i R zaczęły działać, cząsteczka O pozostawała w spokoju. Gdyby siły te nie równoważyły się nawzajem, to pod ich działaniem cząsteczka O zaczęłaby się poruszać. Zastanówmy się, w którym kierunku ruch ten mógłby nastąpić? Możemy co do tego uczynić jedno z dwóch przypuszczeń, albo kierunek ten zgadzałby się z jedną z sił, albo przypadałby w jednym z kątów POQ, QOR lub ROP, które tworzą siły. Pierwszy wypadek jest oczywiście niemożliwy, bo dla czego cząsteczka ma się zacząć poruszać w kierunku jednej siły a nie innej, skoro żadna z nich nie wyróżnia się niczem z pośród pozostałych? Niemożliwy jest i drugi wypadek, bo dla czego kierunek ruchu cząsteczki ma przypaść w jednym kącie a nie w innym, skoro te kąty niczem się od siebie nie różnią?

Widzimy stąd, że cząsteczka pozostanie w spokoju, a zatem trzy takie siły pozostają w równowadze.

Nad wypadkiem tym warto jest zatrzymać się dłużej. Widzimy przedewszystkiem, że zbiorowe działanie dwóch sił równoważy siłę trzecią; tak np. siły P i R wspólnie znoszą skutki działania siły Q, czyli innemi słowy równoważą siłę Q.

Przedłużmy linię OQ i odetnijmy na niej odcinek XO równy odcinkowi OQ, jak to uczyniono na fig. 23. Gdybyśmy do cząstki O przyłożyli siłę X, odpowiadającą temu odcinkowi OX, czyli siłę równą i odwrotną do Q, to siła ta oczywiście zrównoważyłaby siłę Q. Lecz widzieliśmy przed chwilą, że siłę Q równoważą także siły P i R, a zatem skutek wspólnego działania sił P i R jest zupełnie taki sam, jak skutek działania siły X. Siły P i R mogą być zastąpione przez siłę X, a więc ta ostatnia jest ich wypadkową.

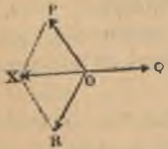

Fig. 23.

Ta wypadkowa X jest równa sile Q, a więc jest równa każdej ze składowych P i R. Może się wydać dziwnem, że jedna siła wywiera taki sam skutek, jak dwie inne siły, z których każda jest jej równa. Należy zważyć jednak, że siły P i R ciągną cząsteczkę O w kierunkach różnych, jakkolwiek nie całkowicie odwrotnych, dzięki czemu skutki działania tych sił po części się znoszą.

Połączmy punkt X liniami prostemi z punktami P i R. Otrzymamy tym sposobem czworobok

ORXP, w którym każde dwa przeciwległe boki są równe i równoległe.

Łatwo można się o tem przekonać. Kąty POQ, QOR i ROP są równe, a zatem każdy z nich zawiera 120^0, zaś kąt POX, jako połowa kąta POR, zawiera 60^0. W równoramiennym trójkącie POX kąty przyległe do boku PX, są równe, i każdy z nich zawiera także 60^0. Stąd wynika, że boki PX i OR są równoległe, gdyż kąty PXO i XOR są równe. Taksamo dowiedziemy, że boki RX i OP są równoległe.

Czworobok taki, jak ORXP, zowie się, jak wiadomo, równoległobokiem, a odcinek OX—jego przekątnią.

Rozważania powyższe doprowadziły nas do wniosku następującego: wypadkową dwóch sił tak pod względem wielkości jak i kierunku wyobraża przekątnia równoległoboku, którego przyległymi bokami są odcinki, wyobrażające siły składowe.

§ 31. **Wypadkowa dwóch sił dowolnych.** Przypuśćmy znowu, że na cząsteczkę O zaczynają jednocześnie działać dwie siły P i Q, jak to wyobraża fig. 24, lecz w tym razie mają to być siły jakiekolwiek, a więc nie równe; również i kąt POQ ma być jakikolwiek. Jeżeli poprzednio cząsteczka O pozostawała w spokoju, to siły P i Q wprawią ją w ruch, i ruch ten oczywiście nastąpi w kierunku, zawartym wewnątrz kąta POQ, dajmy na to, w kierunku OT.

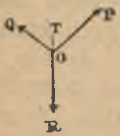

Fig. 24.

Moglibyśmy niedopuścić do tego ruchu, przyłożywszy do cząsteczki O pewną siłę, dostatecznie wielką i skierowaną odwrotnie do OT. Przypuśćmy, że taką właśnie będzie siła R. Ta siła R niweczy całkowicie skutki działania sił P i Q, a więc siły P, Q i R pozostają w równowadze. Lecz z drugiej strony wiadomo, że siła R może być zrównoważona przez siłę jej równą i działającą w kierunku odwrotnym (w kierunku OT), a zatem owa siła równa i odwrotna do R wywiera taki sam skutek, jak siły P i Q razem, a przeto jest wypadkową tych ostatnich. I w tym razie przekątnia równoległoboku, którego bokami przyległymi są odcinki OP i OQ, wyobrazi dokładnie wypadkową pod względem wielkości i kierunku, gdyż twierdzenie, wyłożone w § poprzedzającym, jest ważne nie tylko w wypadku szczególnym, o ktorym tam była mowa, lecz we wszystkich wypadkach możliwych. Stwierdza to doświadczenie, które opiszemy w § następnym.

§ 32. **Stwierdzenie doświadczalne.** Na fig. 25 widzimy dwa małe bloki A i B; bloki te powinny się obracać możliwie łatwo (przy możliwie małem tarciu) na ośkach. Przez bloki przerzucono sznur jedwabny, bardzo wiotki (giętki), a do jego końców przyczepiono ciężary P i Q; prócz tego do punktu c, położonego mniej więcej pośrodku, przyczepiono przy pomocy kawałka takiego samego sznura trzeci ciężar R.

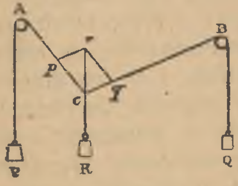

Fig. 25.

Zobaczymy jakie siły działają na węzeł c. Przedewszystkiem działa tu siła, skierowana według sznura c A; gdyby blok A obracał się nie łatwo około ośki, i sznur nie był wiotki, to owa siła mogłaby być mniejsza od ciężaru P, jeżeli jednak wszystko jest dobrze urządzone, to możemy uważać, że siła, działająca na węzeł c w kierunku c A, jest dokładnie równa ciężarowi P.

Również w kierunku c B działa siła równa ciężarowi Q, wreszcie w kierunku pionowym, na dół, działa ciężar R.

W takiem urządzeniu węzeł c przybiera pewne określone położenie, a jeżeli odchylimy go z tego położenia, to po kilku wahaniach powraca do niego znowu. Przy tem położeniu węzła trzy działające nań siły P, Q i R pozostają w równowadze, a zatem siła R jest równa i odwrotna do wypadkowej sił P i Q.

Wykreślmy na ścianie, przed którą wisi nasz przyrząd, odcinki c p i c q; pierwszy z nich ma wyobrażać siłę P, a więc powinien mieć, dajmy na to, tyle milimetrów, ile gramów ma ciężar P. Również długość odcinka c q powinna wynosić tyle mm, ile gramów ma ciężar Q. Dopełniamy następnie równoległobok c p r q i przeprowadzamy w nim przekątnię c r. Przekonamy się, że kierunek tej przekątni jest pionowy, i że na długość ma ona tyle milimetrów, ile gramów ma ciężar R.

Widzimy więc, że zgodnie z podanem wyżej twierdzeniem przekątnia c r wyobraża wypadkową sił P i Q zarówno pod względem kierunku jak i wielkości.

§ 33. **Przykład.** Przy pomocy twierdzenia o równoległoboku można łatwo wyznaczyć siłę wypadkową, gdy znamy siły składowe. Wiemy np., że na pewien punkt ciała działają dwie siły, jedna z nich ma 60, druga 20 kg, a kierunki ich tworzą kąt 75°.

Aby wyznaczyć wypadkową, obieramy na papierze punkt M; ma on wyobrażać ten punkt ciała, na który dane siły działają. Następnie wykreślamy dwie proste, przechodzące przez ten punkt M i tworzące kąt 75°, jak to uczyniono na fig. 26. Na jednej z tych prostych odcinamy od punktu M 20 mm, na drugiej 60 mm. Otrzymujemy tym sposobem odcinki MD i MC, wyobrażające dane siły, przyczem 1 mm odpowiada jednemu kilogramowi. Wreszcie budujemy

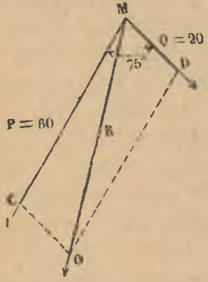

Fig. 26.

równoległobok CMDO i przeprowadzamy jego przekątnię MO, wyobrażającą wypadkową. Zmierzywszy tę przekątnię, znajdziemy, że ma ona 68 mm długości, a zatem szukana wypadkowa ma 68 kg. Mierzymy jeszcze kątomierzem jeden z kątów, które przekątnia tworzy z bokami równoległoboku np. kąt CMO; znajdziemy $16^1/_2{}^0$, i taki sam kąt tworzy wypadkowa z większą składową. Tym sposobem wyznaczyliśmy wypadkową tak pod względem kierunku jak i wielkości.

Wyobrażaliśmy tutaj 1 kg przez 1 mm, skutkiem czego otrzymaliśmy mały rysunek i niewielką dokładność; gdyby chodziło o większą dokładność, to należałoby wyobrażać 1 kg przez większą długość, np. przez 5 mm, albo przez 1 cm.

§ 34. **Rozkładanie sił.** Przy pomocy równoległoboku sił można rozwiązać i zadanie odwrotne, a mianowicie można wyznaczyć dwie siły, dla których dana siła jest wypadkową, czyli *rozłożyć siłę daną na dwie siły składowe.*

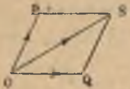
Fig. 27.

Przypuśćmy dla przykładu, że odcinek OS na fig. 27 wyobraża siłę, przyłożoną do punktu O. Przeprowadzamy przez punkt O dwie dowolne proste OP i OQ, a przez punkt S równoległe do nich SQ i SP. Tym sposobem otrzymujemy równoległobok OPSQ, w którym odcinek OS jest przekątnią. Gdyby odcinki OP i OQ wyobrażały siły, to siły te możnaby było zastąpić przez ich wypadkową, czyli przez siłę odpowiadającą odcinkowi OS, a więc i odwrotnie można siłę, odpowiadającą odcinkowi OS zastąpić przez dwie siły, odpowiadające odcinkom OP i OQ, czyli mówiąc krócej, rozłożyć siłę OS na siły składowe OP i OQ.

Można również rozłożyć daną siłę na dwie siły składowe do niej równoległe; uczyniliśmy już z tego użytek w § 27.

§ 35. **Doświadczenie.** Metoda rozkładania sił, opisana w § poprzednim, daje się łatwo stwierdzić w doświadczeniu następującem.

Przytwierdzamy jeden koniec sznura do ściany w punkcie A, a drugi przywiązujemy do haczyka dynamometru B (fig. 28). Prócz tego w punkcie C sznura AB uczepiamy inny sznur CD, na którym wisi ciężar D. Gdy teraz kto zacznie ciągnąć za kółko dynamometru, to całe urządzenie ułoży się tak, jak wskazuje rysunek.

Na węzeł C działają tutaj trzy siły. Jedna z nich jest skierowana pionowo na dół według sznura CD; wywiera ją ciężar D. Druga siła jest skierowana według sznura CA, od węzła C do punktu A; jest to reakcya ściany. Wreszcie

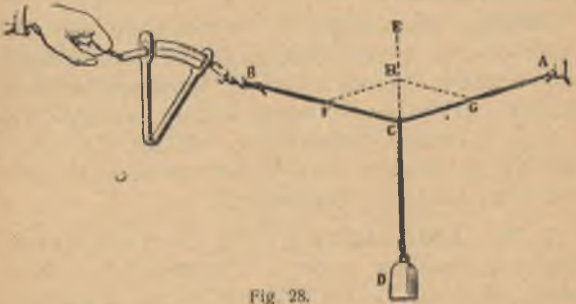

Fig. 28.

trzecia siła ma kierunek od C do B; wywiera ją ręka ciągnącego. Trzy te siły pozostają w równowadze, a zatem siły, działające według CA i CB, równoważą trzecią siłę, działającą pionowo. Trzecią siłę zrównoważyłaby także siła jej równa i odwrotna, a zatem dwie pierwsze siły są składowemi owej siły odwrotnej. Ten właśnie wniosek można sprawdzić przy pomocy opisanego urządzenia.

Gdy wszystko pozostaje w spokoju (lepiej jest kółko dynamometru przywiązać do jakiegoś przedmiotu nieruchomego niż trzymać w ręku), wykreślamy na ścianie linię CE, stanowiącą przedłużenie sznura CD. Na linii tej odmierzamy od punktu C w górę tyle centymetrów, ile kilogramów ma ciężar D. Otrzymujemy tym sposobem odcinek CH, wyobrażający siłę równą i odwrotną do siły, działającej wzdłuż CD. Prowadzimy następnie przez punkt H prostą HF, równoległą do CA i prostą HG, równoległą do CB; powstanie równoległobok CFHG, w którym odcinek CH jest przekątnią.

Budując równoległobok, rozłożyliśmy siłę CH stosownie do § poprzedzającego na dwie składowe, a zatem odcinki CG i CF powinny wyobrażać siły, działające na węzeł według sznurów CA i CB. I istotnie zmierzywszy odcinek CF, znajdziemy, że zawiera on tyle centymetrów, ile kilogramów wskazuje dynamometr.

§ 36. **Łódź żaglowa.** Fig. 29 wyobraża łódź żaglową, widzianą z góry. Przypuśćmy, że wiatr wieje od P do Y, i że łódź ma płynąć z wiatrem, czyli w tym samym kierunku. W tym razie sprawa jest prosta. Ustawiamy żagiel prostopadle do wiatru, czyli prostopadle do osi łódki. Na rysunku właściwe położenie żagla wyobrażono zapomocą kreski AB. Oczywiście wiatr działa na żagiel z siłą, przyłożoną w punkcie O i skierowaną według OY. Pod działaniem tej siły łódź posuwa się naprzód.

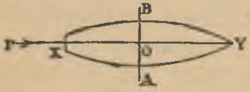

Fig. 29.

Przypuśćmy teraz, że wiatr wieje prostopadle do kierunku, w którym ma płynąć łódka, że np. wiatr wieje z północy, a łódka dąży na zachód. Wiadomo, że i w tym razie można tak ustawić żagiel, aby łódź posuwała się w pożądanym kierunku; zobaczymy właśnie, jak się to robi.

Na fig. 30 widzimy znowu łódkę, która ma dążyć w kierunku od X do Y; taki też kierunek nadaje się osi łódki przy pomocy steru.

Wiatr wieje prostopadle do XY w kierunku strzałki W, a żagiel ustawia się tak, jak wskazuje kreska AB. W tym razie płaszczyzna żagla nie jest prostopadła do kierunku wiatru, pomimo to jednak, jak uczy doświadczenie, wiatr działa na żagiel z siłą, prostopadłą do jego płaszczyzny.

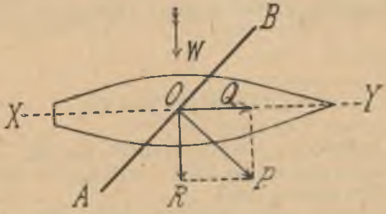

Fig. 30.

Na rysunku siłę tę wyobraża odcinek OP. Gdyby łódź mogła poruszać się z jednakową łatwością we wszystkich kierunkach, tak jak wiadro, pływające w wodzie, to dążyłaby w kierunku OP. Tak jednak nie jest. Woda stawia opór ruchowi łodzi, i wielkość tego oporu jest zależna od kierunku ruchu. Dzięki szczególnym kształtom łodzi, opór ten jest stosunkowo mały, gdy ruch odbywa się w kierunku osi, czyli w kierunku XY, natomiast opór wody jest bardzo duży, gdy kierunek ruchu jest prostopadły do osi XY.

Aby przewidzieć, jaki będzie w tych warunkach bieg łodzi, rozkładamy przy pomocy równoległoboku siłę OP na dwie składowe w kierunku osi i w kierunku prostopadłym. Pierwszą wyobraża na rysunku odcinek OQ, drugą — odcinek OR. Składowa OQ nada łódce szybki ruch w swym kierunku, czyli w kierunku pożądanym XY. I składowa OR nada łódce ruch w swym kierunku, ale szybkość tego ruchu będzie bardzo mała skutkiem dużego oporu wody; zatem łódź popłynie w kierunku, różniącym się niewiele od XY. W każdym razie składowa OR odchyla łódź nieco w prawo od właściwej drogi. Aby zrównoważyć ten wpływ składowej OR należy sterować cokolwiek w lewo.

ZAGADNIENIA.

1) W urządzeniu, wyobrażonem na fig. 25, sznur cA jest przyczepiony do haka, wbitego w ścianę. Jaka siła działa na ten hak?

2) Na punkt ciała działają dwie siły, nachylone pod prostym kątem jedna do drugiej; jedna ma 3 druga 4 kg. Wyznaczyć wypadkową.

Odp. 5 kg. Aby wyznaczyć wypadkową należy wykreślić równoległobok, ale w tym razie każdy, kto zna początki geometryi, może łatwo wyrachować wypadkową i bez wykreślania.

3) Dwie jednakowe krokwie AB i BC tworzą kąt prosty (fig. 31). Ich końce A i C tkwią w ziemi, a dwa pozostałe końce są połączone w punkcie B. W punkcie B jest zawieszony ciężar P, ważący 300 kg. Z jaką siłą ciężar P usiłuje wcisnąć każdą krokiew głębiej w ziemię?

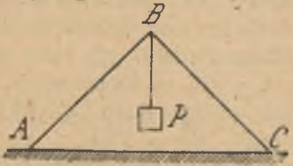

Fig. 31.

Odp. Wykreśliwszy odpowiedni równoległobok, znajdziemy, że siła ta wynosi 212 kg. Można łatwo otrzymać to samo przy pomocy rachunku.

4) Na fig. 32 widzimy urządzenie, na którem ma być zawieszony ciężar P, ważący 280 kg. Urządzenie składa się z poziomej belki AB, osadzonej na zawiasie A i drutu żelaznego BC, którego jeden koniec jest przymocowany do belki, a drugi — do ściany w punkcie C. Drut jest półtora raza dłuższy od AC. Jaki przekrój powinien przynajmniej posiadać drut, aby obciążenie jego nie przekraczało 14 kg na kwadratowy mm?

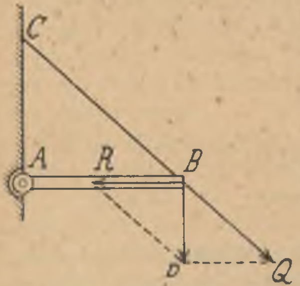

Fig. 32.

Odp Rozkładamy siłę P na składowe R i Q, jak wskazuje rysunek. Pierwsza z nich usiłuje wtłoczyć belkę w ścianę, a druga usiłuje zerwać drut. Ponieważ trójkąt PQB jest podobny do trójkąta ABC, przeto składowa Q jest półtora raza większa od P, a więc ma 420 kg. Aby na każdy mm² przekroju drutu działało nie więcej od 14 kg, to przekrój ten powinien mieć przynajmniej 420 : 14 = 30 mm².

5) Mamy takie same urządzenie, jak poprzedzające, z tą tylko różnicą, że punkt B jest środkiem belki, a nie jej końcem, zaś ciężar P jest zawieszony na końcu. Jaki przekrój powinien mieć drut w tym razie?

Odp. Można uważać belkę za dźwignię, której punktem podparcia jest zawiasa A. Aby zrównoważyć ciężar wypada przyłożyć w B siłę pionową 560 kg, a stąd wynika, że ciężar 280 kg, zawieszony na końcu, działa na drut zupełnie tak samo, jakby działał ciężar 560 kg, zawieszony w B. Drut powinien mieć przynajmniej 60 mm² w przekroju. Warto zauważyć, że w danym wypadku ciężar usiłuje jeszcze złamać lub zgiąć część belki, wystającą poza punkt B.

6) Aby wagon tramwajowy ruszył z miejsca, trzeba nań działać równolegle do szyn z siłą, wynoszącą

22 kg. Koń ciągnie ten wagon w kierunku, tworzącym z szynami kąt 60^0; jaką siłę powinien wywierać koń, aby poruszyć wagon?

Odp. 44 kg.

ROZDZIAŁ V.

CIĄŻENIE.

§ 37. **Kierunek siły ciążenia.** Zwykle ziemię naszą wyobrażamy sobie jako kulę, mówimy też często o «kuli ziemskiej.» Nie jest to całkowicie zgodne z prawdą, gdyż postać ziemi różni się nieco od kuli, ale różnica jest niezbyt wielka, i nie popełnimy ważniejszego błędu, uważając ziemię za kulę.

Wyobraźmy sobie, że owa kula ziemska została przecięta na pół płaszczyzną, przechodzącą przez środek; w przecięciu otrzymamy koło, i środek ziemi jest zarazem środkiem tego koła. Koło, wykreślone na fig. 33, ma właśnie wyobrażać taki przekrój ziemi, zaś punkt O jej środek.

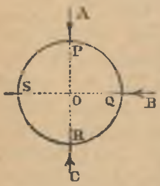

Fig. 33.

Przypuśćmy teraz, że z punktu A zostało wypuszczone swobodnie jakieś ciało ciężkie. Wiadomo, że dąży ono do ziemi najkrótszą drogą, i jest rzeczą dla każdego oczywistą, że taką najkrótszą drogą jest linia AP, przechodząca (w przedłużeniu) przez środek O, czyli linia, stanowiąca przedłużenie promienia ziemskiego OP. Również ciała, wypuszczone z punktów B, C, D i t. d., podążą odpowiednio drogami BQ, CR, DS ku środkowi ziemi.

Wogóle *ciało ciężkie, wypuszczone swobodnie z punktu, położonego ponad powierzchnią ziemi, spada po linii prostej, skierowanej do środka kuli ziemskiej.*

§ 38. **Przyciąganie.** Dzięki bardzo zmudnym i bardzo delikatnym doświadczeniom, stwierdzono pewien fakt nader ważny i ciekawy, a mianowicie, że dwa jakiekolwiek ciała wywierają zawsze jedno na drugie pewne siły, a mianowicie przyciągają się nawzajem.

Każdy wie, co to jest przyciąganie, bo każdy widział, jak magnes przyciąga żelazo, a żelazo — magnes, ale pomiędzy przyciąganiem magnetycznem, a przyciąganiem, które wogóle istnieje między ciałami, zachodzą ważne różnice; wskażemy tylko na jedną z nich.

Siła, z jaką magnes działa na żelazo, zależy od różnych okoliczności, a przedewszystkiem od odległości i od stopnia namagnesowania tego kawałka stali, który nazywamy magnesem. Przy odpowiednich urządzeniach można tak namagnesować magnes, że będzie on przyciągał żelazo z siłą bardzo znaczną. Dla tego też przyciąganie magnetyczne rzuca się w oczy i jest zjawiskiem znanem ogólnie.

Również przyciąganie pomiędzy dwoma jakiemikolwiek ciałami, np. pomiędzy kamieniem i kawałkiem drzewa, zależy od odległości, ale przy danej odległości owych przedmiotów niema sposobu wzmocnić go lub osłabić. Przytem jest ono wogóle bardzo słabe i dlatego też zwykle (prócz wypadku, o którym zaraz będzie mowa) nie rzuca się tak w oczy, jak przyciąganie magnetyczne.

Wyobraźmy sobie np. dwie cegły, leżące na podłodze. Przyciągają się one nawzajem, ale siła przyciągania jest bardzo słaba; nie jest ona w stanie przezwyciężyć tarcia, jakie zachodzi pomiędzy podłogą i cegłami, nie może więc wprowadzić żadnej z nich w ruch. Skutkiem tego przyciąganie nie ujawnia się niczem i pozostaje niedostrzeżonem.

Siła przyciągania, którą jedno ciało wywiera na drugie, jest tem większa, im większe są te ciała. Tak np. wielki kamień przyciąga z większą siłą kawałek drzewa, niż kamień mały. Ziemia jest ciałem olbrzymiem i dla tego też przyciąga ona przedmioty znajdujące się w pobliżu jej powierzchni z siłami znacznemi. Właśnie to przyciąganie ziemi stanowi siłę, którą nazywamy *ciężarem*, lub *wagą* ciała; jest ono także przyczyną spadania ciał.

Kamień został podniesiony ponad powierzchnię ziemi, dajmy na to, do punktu A (fig. 33). Ziemia przyciąga go z pewną siłą, i łatwo pojąć, że siła ta musi być skierowana do środka O, gdyż niema powodu, dlaczegoby kierunek jej miał odchylać się w jedną a nie w inną stronę od linii AO. Gdy kamień zostanie wypuszczony swobodnie, to oczywiście podąży on za kierunkiem siły ku środkowi kuli ziemskiej.

§ 39. **Środek ciężkości.** Badanie wpływu, jaki ciążenie wywiera na ciała, rozpoczniemy od pewnego bardzo prostego doświadczenia, które może wykonać każdy.

Bierzemy kawałek blachy lub kartonu jakiegokolwiek kształtu, np. takiego, jak wyobraża fig. 34, i wzdłuż brzegu przebijamy szereg okrągłych otworów, które na rysunku oznaczono literami A, B, C, D i E. Potrzebny jest jeszcze gwóźdź lub sztyft, wbity w ścianę, takiej grubości, aby mógł swobodnie przechodzić przez każdy z owych otworów, oraz pion, czyli nić z przywiązanym ciężarkiem.

Fig. 34.

Zakładamy naprzód blachę na sztyft otworem A, tak aby wisiała zupełnie swobodnie, a przed nią zawieszamy na sztyfcie pion. Jak wiadomo, blacha zajmie pewne zupełnie określone położenie; jeżeli odchylimy ją od tego położenia, to po kiku wahaniach powróci do niego znowu. Na rysunku wyobrażono właśnie to położenie blachy, przyczem ltera H oznacza ciężarek pionu. Aby zanotować położenie blachy względem pionu, wykreślamy na niej linię przechodzącą przez punkt A w kierunku nici.

Zdejmujemy następnie blachę i zawieszamy ją powtórnie, zakładając teraz na sztyft otwór B. Znowu blacha zajmie pewne określone położenie, i wówczas prowadzimy, jak poprzednio, przez punkt B linię wzdłuż nici pionu. Powtórzywszy toż samo z otworami C, D i E, otrzymamy na blasze tyle linii prostych, ile było otworów; zauważymy przytem, że wszystkie te linie przechodzą przez pewien określony punkt, który oznaczono na rysunku literą P.

Z doświadczenia powyższego wynika, że ten punkt P posiada pewną godną uwagi właściwość; jakkolwiek zawiesimy blachę, to zawsze ustawi się on pionowo pod punktem zawieszenia.

Punkt P posiada jeszcze inną ciekawą właściwość. Załóżmy na sztyft, którykolwiek otwór blachy; może to być jeden z otworów, zrobionych u brzegu blachy, albo otwór, położony bliżej środka, np. w punkcie Q. W każdym razie blacha, zawieszona w taki sposób, może pozostawać w spokoju tylko w jednem określonem położeniu, gdy punkt P leży dokładnie pionowo pod punktem zawieszenia. Wyjątek stanowi tylko sam punkt P.

Przebijmy otwór w punkcie P i zawieśmy blachę na sztyfcie tym otworem. Przekonamy się, że blacha może pozostawać w spokoju w każdem położeniu, jakie jej nadamy.

Jest to fakt wielce godny uwagi, że każda płyta jakiegokolwiek kształtu posiada zawsze jeden punkt o tak wyjątkowych właściwościach; punkt taki zowie się *środkiem ciężkości.*

§ 40. **Środek ciężkości dowolnego ciała.** W § poprzedzającym była mowa o kawałku kartonu lub blachy (wogóle o cienkiej płycie), gdyż w ciele tego kształtu najłatwiej jest wykryć środek ciężkości; ale i w każdem innem ciele istnieje środek ciężkości, czyli punkt o właściwościach takich, jak opisane w § poprzedzającym. Można byłoby się o tem przekonać zapomocą doświadczeń, podobnych do wyżej opisanego.

Zawieszamy w tym celu jakiekolwiek ciało w sposób, wskazany na fig. 35. Gdy ustaną wahania, to ciało zajmie pewne określone położenie, i wówczas wiercimy w niem otwór AB dokładnie w kierunku sznura, na którym wisi. Może nie łatwo byłoby to zrobić, ale przypuśćmy, że jednak otwór taki został wywiercony. Następnie zawieszamy ciało inaczej, np. tak jak wskazuje fig. 36, i znowu wiercimy otwór CD w kierunku sznura. Gdyby takie dwa otwory były zrobione dokładnie, to moglibyśmy się łatwo przekonać, że przecinają się one wewnątrz ciała. W tym celu należałoby przetknąć przez jeden z nich długą szpilkę, a następnie spróbować przesunąć inną szpilkę przez drugi. Znaleźlibyśmy, że jest to niemożliwe, gdyż pierwsza szpilka zagrodziła drogę.

Fig. 35.

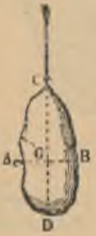

Fig. 36.

Gdybyśmy zawiesili ciało jeszcze inaczej i wywiercili nowy otwór w kierunku sznura, to otwór ten przeszedłby znowu przez punkt przecięcia dwóch pierwszych.

Tak więc w każdem ciele istnieje punkt, posiadający tę szczególną właściwość, że zajmuje on zawsze położenie na pionie, przechodzącym przez punkt zawieszenia, jeżeli ciało zawieszone swobodnie pozostaje w spokoju.

§ 41. **Położenie środka ciężkości.** W ciele jednorodnem, to jest złożonem całkowicie z jednego materjału, można zazwyczaj wskazać odrazu położenie środka ciężkości, kierując się względami symetryi. Tak np. środek ciężkości kuli jednorodnej leży w środku tej kuli, bo tylko ten jeden punkt jest symetrycznie położony względem ciała. Należy jednak jasno zdawać sobie sprawę, że dotyczy to tylko ciała jednorodnego. Środek ciężkości nie leży w środku kuli np. w tym razie, gdy jedna półkula jest zrobiona z żelaza, a druga z miedzi.

Fig. 37.

Fig. 38.

Fig. 39.

Środek ciężkości prostego cylindra czyli walca (fig. 37) leży oczywiście na osi, a mianowicie w jej punkcie środkowym G, bo niema powodu, dla którego miałby leżeć bliżej jednego końca niż drugiego.

Mniej jest może oczywistem, że środek ciężkości cylindra skośnego (fig. 38) leży również w punkcie środkowym osi (punkt G na rysunku), ale chwila namysłu doprowadzi każdego do wniosku, że tylko ten jeden punkt posiada położenie symetryczne względem materjału ciała.

Gdy w równoległościanie (fig. 39) połączymy dwa wierzchołki przeciwległe, to otrzymamy prostą, zwaną przekątnią. Można przeprowadzić cztery takie przekątnie, i wszystkie one przechodzą przez jeden punkt G. Punkt ten posiada położenie symetryczne względem materjału ciała i jest środkiem ciężkości.

Zdarza się nieraz, że środek ciężkości leży nazewnątrz materjału, z którego ciało się składa.

Fig. 40.

Tak np. środek ciężkości kuli dętej leży w środku tej kuli, środek ciężkości pierścienia, wyobrażonego na fig. 40, leży w punkcie G, gdyż ten punkt jedynie posiada położenie symetryczne względem materjału.

§ 42. **Główna właściwość środka ciężkości.** Możemy uważać, że kazde ciało, jakikolwiek jest jego kształt i budowa, składa się z bardzo wielkiej ilości bardzo drobnych cząsteczek materjału. Każdą z tych cząsteczek przyciąga ziemia, na każdą więc z nich działa siła, skierowana do środka ziemi.

Tak więc na ciało działa bardzo wielka ilość sił i linie, według których te siły działają, przecinają się wszystkie w środku kuli ziemskiej. Punkt ten jest bardzo odległy od powierzchni ziemi, a mianowicie odległość jego wynosi przeszło 6000 kilometrów, i z tego względu nie popełnimy wyraźnego błędu, uważając, że wszystkie siły ciążenia, działające na cząsteczki ciała nawet bardzo wielkich rozmiarów, są równoległe.

Widzieliśmy w § 22, że jeżeli na ciało działa pewna ilość sił równoległych, skierowanych w jedną stronę, to można zawsze wyznaczyć ich wypadkową, a zatem i owe siły ciążenie, działające na różne cząsteczki ciała, sprowadzają się do jednej wypadkowej; ta wypadkowa jest równoległa do sił składowych, a ponieważ siły składowe są skierowane pionowo na dół, zatem i wypadkowa ma kierunek pionowy.

Przyszliśmy tedy do ważnego wniosku, że ciążenie wywiera na ciało *jedną* siłę, i ta siła, zwana ciężarem lub wagą ciała, jest skierowana pionowo na dół; wypada jeszcze okazać, że jej linia działania przechodzi zawsze przez środek ciężkości ciała.

Niech będzie jakiekolwiek ciało, wiszące spokojnie na sznurze OA, jak wskazuje fig. 41. Jego środek ciężkości G leży, jak wiemy, na linii prostej, stanowiącej przedłużenie sznura. Na ciało działają dwie siły, a mianowicie siła ciążenia i reakcya sznura. Druga z nich działa wzdłuż sznura i jest skierowana od A do O, chodzi o to, gdzie jest przyłożona pierwsza.

Fig. 41.

Przypuśćmy na chwilę, że siła ciążenia działa według linii PQ, nie przechodzącej przez środek ciężkości. Dla każdego jest rzeczą oczywistą, że dwie siły, działające według prostych AO i PQ, nie mogłyby się równoważyć, i ciało, podlegające ich działaniu, nie mogłoby pozostawać w spokoju. Stąd widać, że linia działania siły ciążenia musi przechodzić przez środek ciężkości. Ponieważ dzieje się tak przy każdem położeniu ciała, przeto możemy powiedzieć, że środek ciężkości jest punktem przyłożenia tej siły.

§ 43. **Równowaga ciała, opartego na płaszczyźnie poziomej.** Twierdzenia o środku ciężkości, które tylko co poznaliśmy, wyjaśniają nam różne zjawiska, spotykane na każdym kroku. Wspomnimy tylko o niektórych.

Fig. 42.

Fig. 43.

Mamy tu dwie figury, 42 i 43. Każda z nich wyobraża cylinder skośny, ustawiony na stole. Pomiędzy dwoma wyobrażonymi wypadkami zachodzi jednak ważna różnica: cylinder pierwszy będzie stał spokojnie, gdy go pozostawimy samemu sobie, natomiast drugi przewróci się natychmiast, gdy przestaniemy go podtrzymywać. Gdzie należy szukać przyczyny tak odmiennego zachowania się cylindrów?

W każdym z cylindrów środek ciężkości leży w punkcie środkowym osi; na obydwóch rysunkach punkty te oznaczono literą G. Na każdy cylinder działa siła ciążenia, skierowana pionowo na dół i przyłożona w owym punkcie G. W pierwszym cylindrze linia działania tej siły przecina oparcie, czyli tę część powierzchni ciała, która pozostaje w zetknięciu ze stołem; w tym razie oparciem jest dolna podstawa cylindra. W cylindrze drugim linia działania siły ciążenia mija oparcie.

Na każdy z cylindrów działają dwie siły, a mianowicie siła ciążenia i reakcya stołu. Jeżeli siły te się równoważą, to cylinder pozostanie w spokoju. Reakcya jest to siła, z którą stół działa na cylinder; oczywiście może ona być przyłożona tylko w jednym z punktów, w których stół styka się z cylindrem. Stąd wynika, że w wypadku, wyobrażonym na fig. 43, reakcya i siła ciążenia nie mogą działać według jednej linii, a więc i równowaga pomiędzy niemi jest niemożliwa, i cylinder się przewróci.

Inaczej rzeczy stoją w wypadku, wyobrażonym na fig. 42. W tym razie stół wywiera na cylinder siłę równą i odwrotną do siły ciążenia, siły te się zrównoważą, i cylinder pozostanie w spokoju.

Możemy wypowiedzieć następujące prawidło ogólne: *ciało, postawione na płaszczyźnie poziomej, pozostanie w równowadze, jeżeli linia pionowa, przeprowadzona przez środek ciężkości, przechodzi wewnątrz podstawy, na której ciało się wspiera.*

§ 44. **Równowaga trwała i chwiejna.** Fig. 44 wyobraża ciało formy owalnej, zwane elipsoidą. Proste A B i C D nazywają się osiami, a ich punkt przecięcia S, położony symetrycznie względem ciała, — środkiem; ten punkt S jest zarazem środkiem ciężkości ciała. Na naszym rysunku elipsoida spoczywa na płaszczyźnie poziomej, przyczem krótsza oś posiada położenie pionowe. W tym razie ciało jest oparte tylko w jednym punkcie D, ale prosta pionowa, przeprowadzona przez środdek ciężkości, przechodzi właśnie przez ten punkt oparcia, i dzięki temu ciało pozostaje w równowadze.

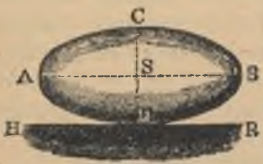

Fig. 44

Odchylmy nieco elipsoidę od tego położenia i pozostawmy ją samej sobie. Jest rzeczą dla każdego oczywistą, że po pewnych wahaniach powróci ona do niego znowu. Mówimy, że w tem położeniu równowaga elipsoidy jest *trwała*.

Można elipsoidę ustawić na płaszczyźnie pionowej i w taki sposób, aby oś większa była pionowa, jak to widzimy na fig. 45. I tutaj pion ze środka ciężkości przechodzi przez punkt oparcia A, skutkiem czego ciało pozostaje w równowadze. Ale pomiędzy tym wypadkiem równowagi a poprzedzającym, zachodzi ważna różnica. Tutaj ciało nie odzyskuje pierwotnego położenia nawet po najlżejszem odchyleniu, lecz przewraca się zupełnie. Równowagę taką nazywamy *chwiejną.*

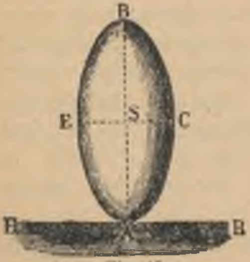

Fig. 45

Stanowisko pośrednie pomiędzy równowagą trwałą i chwiejną zajmuje tak zwana równowaga *obojętna*. Równowagę obojętną posiada np. kula, leżąca na płaszczyźnie poziomej (fig. 46).

Jeżeli odchylimy kulę od położenia, w którem poprzednio pozostawała w spokoju, to nie usiłuje ona do niego powracać, jak byłoby w wypadku równowagi trwałej, lecz również nie usiłuje odchylać się w dalszym ciągu, jak w wypadku równowagi chwiejnej.


Fig. 46.

Równowaga kuli na płaszczyźnie poziomej zasługuje na bliższą uwagę. W położeniu pierwotnem środek ciężkości znajdował się w S, i pion z tego punktu przechodził przez punkt oparcia D. Po odchyleniu kula zajmie, dajmy na to, położenie, oznaczone na rysunku linią przerywaną, i znowu środek ciężkości S_1 i punkt oparcia D_1 leżą na jednym pionie. Dzięki temu nowe położenie kuli jest taksamo położeniem równowagi, jak i poprzedzające. Ważną jest przytem okoliczność, że odcinki SD i S_1D_1 są równe, czyli, że odchylenie nie zmienia wysokości środka ciężkości.

Ta ostatnia uwaga naprowadza nas na bardzo prosty sposób odróżniania równowagi trwałej od chwiejnej. Rzućmy jeszcze raz okiem na figury 44 i 45. W wypadku, wyobrażonym na pierwszej z nich, skutkiem odchylenia elipsoidy od położenia równowagi, środek ciężkości wzniesie się w górę, w wypadku drugim, odchylenie wywoła obniżenie środka ciężkości. Wogóle *równowaga ciała jest trwała, jeżeli środek cieżkości zajmuje położenie możliwie najniż-*

sze, równowaga jest chwiejna, jeżeli środek ciężkości zajmuje położenie najwyższe.

Na fig. 47 mamy jeszcze jeden przykład dwóch opisanych wyżej rodzajów równowagi. Widzimy tam jakieś ciało w postaci prosto-

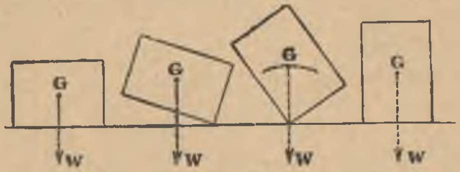

Fig. 47.

padłościanu, np. pudełko lub cegłę, w czterech położeniach. W położeniu pierwszem oczywiście ciało ma równowagę trwałą. Jeżeli je odchylimy np. tak, jak wskazuje rysunek drugi, to oczywiście środek ciężkości G się podniesie, i ciało powróci do położenia pierwotnego, jak tylko pozostawimy mu swobodę. Położenie, wyobrażone na rysunku trzecim, jest znowu położeniem równowagi, ale jest to równowaga chwiejna, gdyż środek ciężkości G osiągnął tutaj największą wysokość. Wreszcie na rysunku czwartym mamy nowe położenie równowagi trwałej.

§ 45. **Równia pochyła**. Uważaliśmy dotychczas, że ciało jest oparte o płaszczyznę poziomą—należy teraz zastanowić się nad wypadkiem, gdy ciało opiera się na gładkiej płaszczyźnie pochyłej, czyli nachylonej pod pewnym kątem do poziomu. W tym razie reakcya płaszczyzny nie może zrównoważyć całkowicie siły ciążenia, i ciało musi zsuwać się nadół, jeżeli nie przeszkodzi temu jakaś trzecia siła. Wprawdzie spotykamy na każdym kroku fakty, stojące na pozór w sprzeczności z powyższem twierdzeniem: na pochyłości wzgórza leżą w spokoju kamienie, na niezbyt pochyłym dachu może bezpiecznie stać człowiek i t. d. Tak dzieje się jednak skutkiem tego, że płaszczyzny pochyłe, które widzimy w rzeczywistości, są niegładkie; nierówności ich nie pozwalają ciału się zsuwać, jeżeli tylko nachylenie nie jest zbyt wielkie. Będziemy uważali tymczasem, że płaszczyzna pochyła jest doskonale gładka i nie posiada nawet najdrobniejszych nierówności, a w rozdziale następnym rozważymy, jaki wpływ wywiera to, co nazywamy tarciem.

Na fig. 48 widzimy ciężkie ciało, położone na pochyłej płaszczyźnie czyli równi H F. Środek ciężkości ciała oznaczono literą S; działa nań siła ciążenia, którą wyobraża pionowy odcinek S G. Poprowadźmy przez punkt S prostą P S równolegle do H F i prostą N S prostopadle do H F, a przez punkt G poprowadźmy dwie proste, równoległe do tamtych. Tym sposobem otrzymamy równoległobok G N S P, w którym S G jest przekątnią, a zatem odcinki S P i S N wyobrażają siły składowe siły ciążenia S G, i możemy uważać, że na ciało działa nie siła S G, lecz

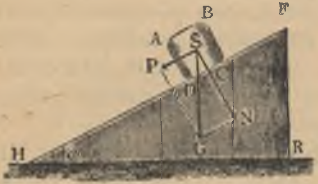

Fig. 48.

siły SP i SN. Łatwo teraz przewidzieć, jaki skutek wywrze każda z tych ostatnich.

Siła S N przyciska tylko ciało do płaszczyzny i równoważy się całkowicie z jej reakcyą, natomiast siła S P pozostaje niezrównoważoną, i pod jej działaniem ciało zacznie się zsuwać. Jeżeli chcemy, aby ciało pozostało w spokoju, to musimy zrównoważyć siłę S P, czyli przyłożyć do ciała siłę jej równą lecz odwrotną.

Zwróćmy uwagę na trójkąty G S P i R H F; trójkąty tego rodzaju zowią się w geometryi podobnymi, gdyż większy jest jakby powiększeniem mniejszego. Przy takiem powiększeniu kąty nie ulegają zmianom, zaś boki zmieniają się w jednakowym stosunku. Stąd widać, że siła S P jest tyle razy mniejsza od S G, ile razy wysokość F R jest mniejsza od długości H F.

Z powyższego wynika, że ciężkie ciało można utrzymać w spokoju na równi pochyłej przy pomocy siły mniejszej od ciężaru ciała, a mianowicie owa *siła będzie tyle razy mniejsza od ciężaru, ile razy wysokość równi jest mniejsza od jej długości.*

Przypuśćmy dla przykładu, że długość równi pochyłej wynosi 8 m, a wysokość 2 m; z jaką siłą należy działać na ciężar, ważący 200 kg, aby utrzymać go w spokoju? Ponieważ wysokość jest w tym razie cztery razy mniejsza od długości, więc i szukana siła jest 4 razy mniejsza od 200 kg, czyli wynosi 50 kg.

ZAGADNIENIA.

1) Gdzie leży środek ciężkości prostego pręta.

2) Dlaczego wóz wysoko naładowany sianem przewraca się łatwiej niż wóz próżny?

3) Dlaczego trudniej jest chodzić po linie niż po ziemi?

4) Gdzie leży środek ciężkości kręga, wyciętego z blachy lub z kartonu?

5) Czy środek ciężkości zwykłej szklanki o prostych ścianach leży bliżej dna, czy bliżej otworu?

6) Dwóch ludzi niesie sztabę AB, ważącą 60 kg i 2 m długą. Jeden z nich ujął sztabę w odległości $^1/_2$ m od końca A, zaś drugi — za sam koniec B. Jaki ciężar przypada na każdego?

Odp. Na pierwszego 40 kg, na drugiego 20.

7) Wyznaczyć środek ciężkości płyty trójkątnej ABC (fig. 49).

Odp. Połączmy wierzchołek A ze środkiem D podstawy BC. Z geometryi wiadomo, że prosta AD dzieli na pół odcinek każdej prostej, równoległej do BC, zawarty pomiędzy pozostałymi bokami trójkąta, np. odcinek mn. Podzielmy w wyobraźni cały trójkąt na bardzo wązkie paski prostemi, równoległemi do BC. Każdy z tych pasków można uważać za cienki pręt, a zatem jego środek ciężkości leży w punkcie środkowym, czyli na prostej AD. Wyobraźmy sobie teraz, że płytę położono na ostrzu trójkątnego pryzmatu PQ, i że właśnie na samem ostrzu leży prosta AD. W takim razie każdy z pasków będzie w równowadze, gdyż jest podparty w swym środku ciężkości, a zatem i cała płyta

Fig. 49.

będzie w równowadze. Stąd wynika, że środek ciężkości płyty leży na prostej AD. Tak samo można okazać, że środek ciężkości płyty leży na prostej BE, łączącej wierzchołek B ze środkiem boku AC, a zatem leży w jej punkcie przecięcia z prostą AD.

Można jeszcze dowieść, albo przekonać się zapomocą mierzenia, że odcinek GD stanowi trzecią część odcinka AD (lub połowę AG), również GE stanowi trzecią część BE.

8) Trzech ludzi niesie trójkątną płytę ABC, ważącą 45 kg; każdy z nich trzyma za wierzchołek. Ile kilogramów niesie każdy?

Odp. Siła 45 kg jest przyłożona w środku ciężkości płyty G (fig. 50). Możemy ją zastąpić przez dwie siły równoległe, przyłożone w punktach B i D (D jest punktem przecięcia prostej BG z bokiem AC, albo środkiem boku AC), z których pierwsza ma 15, a druga 30 kg. Tę ostatnią rozkładamy jeszcze na dwie, przyłożone w A i C. Wypadnie, że każdy niesie 15 kg.

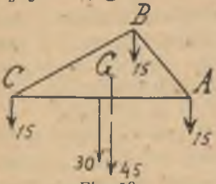

Fig. 50.

9) Pręt AB, ważący 2 kg i mający 2 m długości, jest zaopatrzony na końcach w kule; kula na końcu A waży 4 kg, a kula na końcu B — 2 kg. Gdzie leży środek ciężkości takiego ciała?

Odp. W odległości 75 cm od A.

10) Fig. 51 wyobraża znaną zabawkę; jest to pajac, stojący swobodnie na podstawce g. Nie spada on z podstawki, chociaż odchylimy go od położenia pionowego nawet na znaczny kąt, lecz po pewnych wahaniach powraca znowu do tego położenia; równowaga więc jest trwała. Jak to wytłomaczyć?

Fig. 51.

11) Do naczynia, którego środek ciężkości leży w punkcie G, nalano wody aż do tego punktu G. Możemy teraz uważać naczynie i wodę za jedno ciało; czy środek ciężkości tego nowego ciała leży wyżej, czy niżej od punktu G?

12) Metalowa kula składa się z półkuli żelaznej i półkuli glinowej (aluminiowej); czy środek ciężkości takiego ciała leży w żelazie, czy w glinie?

13) Trzy jednakowe kule leżą na stole w dowolnych miejscach. Uważając te kule za jedno ciało, wyznaczyć jego środek ciężkości; inaczej mówiąc, wyznaczyć środek ciężkości układu, złożonego z tych trzech kul

Odp. Szukany punkt leży w środku ciężkości trójkąta, utworzonego przez środki kul.

14) Na płaszczyźnie, nachylonej do poziomu pod kątem 45° (fig. 52), leży ciało, ważące 100 kg Z jaką siłą trzeba działać na to ciało w kierunku poziomym, aby utrzymać je w spokoju?

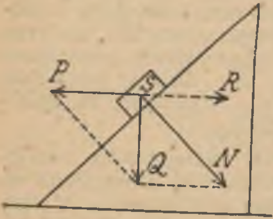

Fig. 52.

Odp. Siłę ciążenia, którą na rysunku wyobraża odcinek SQ, można zastąpić przez dwie siły składowe SN i SP Aby ciało pozostało w spokoju, to trzeba tylko zrównoważyć drugą z nich, czyli przyłożyć siłę SR równą SP i odwrotną do niej. Można łatwo się przekonać, że ta siła pod względem wielkości powinna być równa SQ, czyli w danym wypadku powinna mieć 100 kg.

15) Jaki ciężar utrzyma na płaszczyźnie, nachylonej do poziomu pod kątem 30°, człowiek, który jest w stanie podnieść pionowo 120 kg.

Odp. 240 kg.

ROZDZIAŁ VI.

TARCIE.

§ 46. **Tarcie.** W rozdziałach poprzedzających robiliśmy nieraz przypuszczenia, które w praktyce nie dałyby się dokładnie urzeczywistnić; zakładaliśmy mianowicie, że różne powierzchnie, z któremi mieliśmy do czynienia, były doskonale gładkie. Do takiego stanu rzeczy możemy w rzeczywistości jedynie zbliżyć się mniej lub więcej, ale niema sposobu osiągnąć go całkowicie. Powierzchnie ciał są zawsze do pewnego stopnia *chropowate*, a wszelkie wygładzanie i polerowanie jedynie zmniejsza chropowatość, lecz całkowicie jej nie usuwa. Stąd wynika, że dwa ciała, pozostające w zetknięciu, nie mogą poruszać się z całkowitą swobodą jedno po drugiem; ruch taki napotyka zawsze mniejszy lub większy opór, i opór ten nazywamy *tarciem*.

Przypuśćmy dla przykładu, że ciężkie ciało leży na płaszczyźnie poziomej; działa nań pionowo na dół siła ciążenia P, przyłożona w punkcie G, jak to widzimy na fig. 53. Przyłóżmy jeszcze do tego ciała poziomą siłę F. Możemy np. przywiązać do ciała sznur, i ciągnąć zań

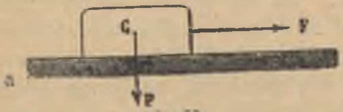

Fig. 53.

w kierunku poziomym. Gdyby powierzchnia, na której leży ciało, była doskonale gładka, to wprawiłaby je w ruch nawet najmniejsza taka siła pozioma. Wiemy jednak, że w rzeczywistości dzieje się inaczej. Jeżeli np. ciało, o którem mowa, jest ciężkim kamieniem, leżącym na drewnianej podłodze, to do poruszenia go potrzebna jest siła bardzo znaczna; musi ona być co najmniej równa sile tarcia, którą podłoga wywiera na kamień.

Natężenie tej siły poziomej, która właśnie wystarcza do poruszenia ciała, zależy od różnych okoliczności, a przedewszystkiem od chropowatości powierzchni, pozostających w zetknięciu, i od ciężaru ciała. Siła ta musi być tem większa, im bardziej są chropowate powierzchnie, i z im większą siłą jedna z nich jest przyciśnięta do drugiej.

§ 47. **Doświadczenia.** Na fig. 54 widzimy prosty przyrząd, przy pomocy którego można zbadać dokładniej zależność siły tarcia od siły, z jaką jedna powierzchnia ciśnie na drugą. Składa się on przedewszystkiem z poziomego stołu B, do którego przymocowuje się płyta, wyrobiona z jednego z badanych materyałów. Na nią kładzie się płyta z drugiego badanego materyału, a do tej ostatniej jest przymocowany sznur, który naprzód idzie poziomo, przechodzi następnie przez blok C i dźwiga na końcu szalkę D. Na płycie, do której przywiązany jest sznur, stoi inna szalka lub skrzynka A. Kładąc gwichty na szalkę D, można wywrzeć odpowiednią siłę poziomą na drugą płytę, zaś kładąc gwichty do skrzynki A, można wywołać żądane ciśnienie pomiędzy badanemi płytami.

Doświadczenie odbywa się w sposób następujący. Kładziemy do skrzynki A pewien określony ciężar; dodawszy do niego ciężar skrzynki i płyty ruchomej, będziemy znali ciśnienie, które zachodzi pomiędzy płytami. Następnie obciążamy stopniowo drobnymi gwichtami szalkę D. Oczywiście siła, z jaką sznur działa na płytę ruchomą, jest równa obciążeniu szalki D, powiększonemu o wagę samej szalki. Dopóki ta siła jest mniejsza od siły tarcia, ktorą przy danem ciśnieniu płyta dolna jest w stanie wywierać na górną, dopóty ta ostatnia

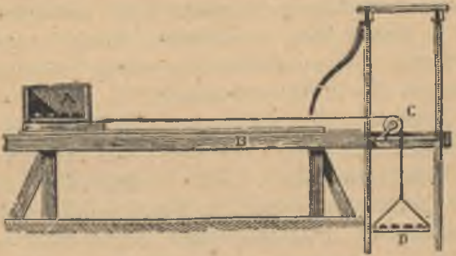

Fig. 54.

pozostanie w spokoju. Dokładając ostrożnie ciężarków na szalkę D, możemy wyznaczyć tę siłę, która właśnie wystarcza do poruszenia płyty górnej, lub siłę tarcia pomiędzy płytami. Zmieniamy następnie obciążenie skrzynki A i wyznaczamy znowu siłę potrzebną do poruszenia płyty i t. d.

Zapomocą takich doświadczeń znaleziono, że pomiędzy siłą, którą płyty są przyciśnięte jedna do drugiej, a siłą, potrzebną do poruszenia płyty górnej lub siłą tarcia, zachodzi bardzo prosty związek. Związek ten można krótko wyrazić tak:

Siła tarcia jest proporcyonalna do ciśnienia, jakie jedno ciało wywiera na drugie.

Przypuśćmy dla przykładu, że przy ciśnieniu 5 kg siła tarcia wynosi 2 kg, to przy ciśnieniu 10 kg, tarcie wyniesie 4 kg, przy ciśnieniu 15 kg tarcie będzie równe 6 kg, i t. d.

Stosunek siły tarcia do odpowiadającego jej ciśnienia zowie się *współczynnikiem tarcia.* Współczynniki tarcia są różne dla różnych materyałów. Tak np. inny jest współczynnik tarcia pomiędzy drzewem a drzewem, inny—pomiędzy drzewem a metalem, a jeszcze inny pomiędzy metalem a kamieniem. Podajemy tutaj współczynniki tarcia, wyznaczone zapomocą doświadczeń podobnych do wyżej opisanego.

Drzewo i drzewo . . .	0,5	lub $^1/_2$
Metal i drzewo . . .	0,6	» $^3/_5$
Metal i metal	0,2	» $^1/_5$

Gdy pomnożymy siłę, z którą jedno ciało jest przyciśnięte do drugiego, przez odpowiedni współczynnik, to otrzymamy siłę tarcia.

Weźmy przykład taki. Na drewnianej podłodze leży płyta metalowa, ważąca 50 kg; jakiej siły poziomej potrzeba do poruszenia płyty.

Siłę tarcia znajdziemy, mnożąc 50 przez 0,6; wypadnie 30 kg, i taka siła jest potrzebna do poruszenia płyty. Gdyby podłoga była żelazna (gładka), to siła tarcia wyniosłaby $50 \times 0,2 = 10$ kg.

Nie należy jednak podanych tutaj współczynników tarcia uważać za zupełnie pewne i ścisłe. Przy ich pomocy można jedynie w przybliżeniu ocenić siłę tarcia, którą w danym razie pokonywać wypadnie, przyczem zdarza się nieraz, że owa siła jest w rzeczywistości znacznie większa lub mniejsza, niż wypada z rachunku, i zrozumiemy łatwo, dlaczego tak się dzieje.

Wspomnieliśmy już w § poprzedzającym, że siła tarcia zależy jeszcze od chropowatości powierzchni. Wyżej podane współczynniki otrzymano, robiąc doświadczenia z ciałami o powierzchniach wygładzonych; jeżeli weźmiemy ciała o powierzchniach tylko z gruba zheblowanych, to tarcie będzie znacznie większe, jeżeli natomiast powierzchnie ciał są dokładnie odpolerowane, to tarcie jest mniejsze, niż wypada z rachunku.

Można znacznie zmniejszyć siłę tarcia, smarując stykające się powierzchnie oliwą lub innym smarem. Dla przykładu powróćmy do wypadku, który rozważaliśmy poprzednio. Na żelaznej gładkiej podłodze leży żelazna płyta; znaleźliśmy, że w celu przesunięcia płyty należy ciągnąć z siłą 10 kg. Jeżeli posmarujemy podłogę oliwą, to do przesunięcia płyty wystarczą trzy kilogramy lub nawet mniej.

Mówiliśmy dotychczas o wpływie, jaki na siłę tarcia wywiera ciśnienie, zachodzące pomiędzy powierzchniami, pozostaje jeszcze zbadać, czy siła tarcia zależy od wielkości stykających się powierzchni. W tym celu należy znowu uciec się do doświadczenia, przyczem można posługiwać się przyrządem, który poznaliśmy przed chwilą, zmieniając tylko za każdem doświadczeniem wymiary płyt, pomiędzy któremi zachodzi tarcie. Znaleziono w ten sposób, że rozmiary stykających się powierzchni nie wywierają żadnego wpływu na siłę tarcia. Jeżeli nie zmienia się siła, z jaką jedna płyta ciśnie na drugą, to nie zmienia się i siła tarcia, pomimo to, że wielkość stykających się powierzchni ulega zmianie.

Przypuśćmy dla przykładu, że obydwie płyty są drewniane, i że jedna ciśnie na drugą z siłą 10 kg. Siła tarcia wyniesie w każdym razie $10 \times 0{,}5 = 5$ kg bez względu na to, czy powierzchnia zetknięcia ma 100, czy 200, czy 300 centymetrów kwadratowych.

Można było z góry przewidzieć, że tak być musi, gdyż wynika to nieodbicie z twierdzenia, że siła tarcia jest proporcyonalna do ciśnienia. Weźmy przykład poprzedzający. Płyty są drewniane i jedna ciśnie na drugą z siłą 10 kg lub 10000 gramów, przyczem powierzchnia zetknięcia ma 100 cm^2. Tym sposobem jeden cm^2 jednej płyty ciśnie na jeden cm^2 drugiej z siłą $10000 : 100 = 100$ gr; siła tarcia na 1 cm^2 wyniesie $100 \times 0{,}5 = 50$ gr, a na całą powierzchnię, czyli na 100 cm^2, $50 \times 100 = 5000$ gr, czyli 5 kg.

Przypuśćmy teraz, że ciśnienie wynosi, jak poprzednio, 10 kg., czyli 10000 gr, lecz powierzchnia zetknięcia ma 200 cm^2. W takim razie na jeden cm^2 wypada ciśnienie $10000 : 200 = 50$ gr, i siła tarcia $50 \times 0{,}5 = 25$ gr., zaś siła tarcia, działająca na całą płytę, wyniesie $25 \times 200 = 5000$ gr, czyli 5 kg, a więc tyleż, co i poprzednio.

§ 48. **Kąt tarcia.** Na fig. 55 widzimy inny prosty przyrząd, przy pomocy którego można badać zjawiska tarcia. Główną jego częścią jest deska A B, osadzona na zawiasach w końcu A. Obracając deskę na tych zawiasach, można nadawać jej dowolne nachylenia.

Ustawiamy naprzód deskę poziomo i kładziemy na nią jakieś ciężkie ciało C; następnie ostrożnie i wolno obracamy deskę na zawiasach, nadając

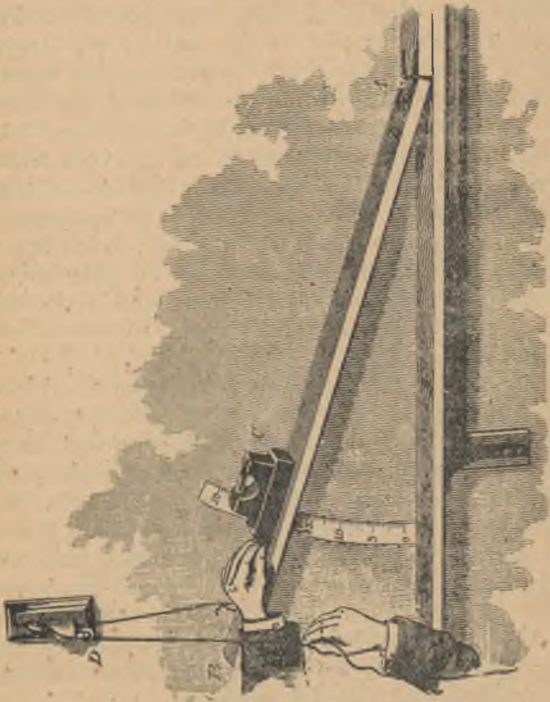

Fig. 55.

jej coraz większe nachylenie do poziomu. Można to uczynić dogodnie w sposób, wskazany na rysunku, ciągnąc za sznur, przywiązany do deski w końcu B i przechodzący przez bloczek D.

Gdyby ciała, z któremi robimy doświadczenie, były doskonale gładkie, to przy najlżejszem nachyleniu deski ciało C zaczęłoby się zsuwać; w rozdziale poprzedzającym, gdy była mowa o równi pochyłej, uważaliśmy, że tak właśnie się dzieje, ale w rzeczywistości, przy małych kątach nachylenia, ciało C dzięki tarciu pozostanie na desce w spokoju. Obracając jednak deskę coraz bardziej, dojdziemy wreszcie do takiego położenia, przy którem ciało C ma właśnie zacząć się zsuwać. Kąt, który wówczas deska A B tworzy z poziomem, nazywa się *kątem tarcia.* Jeżeli deska tworzy z poziomem kąt mniejszy od kąta tarcia, to ciało C pozostaje na niej w spokoju, jeżeli kąt ten jest większy od kąta tarcia, to ciało C się zsuwa.

Znając kąt tarcia, można bez trudności wyznaczyć siłę tarcia. Przypuśćmy, że deska jest ustawiona pod kątem tarcia. Ciało C pozostaje jeszcze w spokoju, a zatem siła tarcia równoważy siłę ciążenia. Przypomniawszy sobie prawidło, dotyczące równi pochyłej, znajdziemy odrazu, że siła tarcia jest tyle razy mniejsza od ciężaru ciała, ile razy wysokość równi jest mniejsza od jej długości. Znając przeto ciężar ciała C oraz długość deski A B i zmierzywszy wysokość końca B po nad deską, do której są przymocowane zawiasy, wyznaczymy odrazu siłę tarcia.

Jasną jest rzeczą, że im większy współczynnik tarcia posiadają dwa ciała, tem większy jest ich kąt tarcia.

§ 49. **Rola tarcia.** Tarcie odgrywa niezmiernie doniosłą rolę zarówno w naturze jak i w technice.

Niekiedy występuje ono, jako czynnik szkodliwy; tak np. hamuje ono i utrudnia ruch mechanizmów, skąd pochodzą straty i różne niedogodności,— natomiast w innych razach właśnie tarcie daje nam możność ruch wywoływać. Doskonały przykład w tym względzie stanowi lokomotywa. Dzięki ogromnemu ciężarowi tej maszyny ciśnienie pomiędzy kołem a szyną jest bardzo wielkie, i siła tarcia zwykle wystarcza, aby niedopuścić do ślizgania się kół; jeżeli zatem nadamy kołom ruch obrotowy, to muszą one toczyć się po szynach, unosząc lokomotywę i pociąg.

Przypuśćmy dla przykładu, że na kołach wiodących lokomotywy spoczywa 15 tonn ciężaru (tonna zawiera 1000 kg). Wiemy (str. 78), że współczynnik tarcia metalu o metal jest równy 0,2, a zatem siła tarcia wyniesie $15 \times 0,2 = 3$ tonny. Jeżeli lokomotywa wraz z pociągiem stawiają opór mniejszy od trzech tonn, to koła się potoczą, i pociąg ruszy, w razie przeciwnym koła będą się ślizgały, i pociąg pozostanie na miejscu.

Nie ma zresztą potrzeby uciekać się aż do lokomotywy, aby ocenić znaczenie, jakie posiada dla nas tarcie. Gdyby nie było tarcia, poprostu nie moglibyśmy istnieć. Przedewszystkiem bez tarcia nie moglibyśmy chodzić, gdyż chodzenie jest możliwe tylko dzięki tarciu, jakie powstaje pomiędzy podeszwami i gruntem. Dlatego też trudno jest chodzić po gładkim lodzie, albo po dachu, którego kąt nachylenia jest mało co mniejszy od kąta tarcia pomiędzy nim i podeszwami. Jeżeli ten kąt nachylenia jest większy od kąta tarcia, to chodzenie jest niemożliwe.

Można utrzymać w ręku szklankę tylko dzięki tarciu, które zachodzi pomiędzy palcami a szkłem. Gdyby zniknęło tarcie, to szklanka natychmiast wysunęłaby się z ręki. Dzięki tarciu, gwóźdź mocno tkwi w drzewie, ziemia nie zsuwa się ze wzgórza i t. d.

§ 50. **Hamulec.** Mechanizm, będący w biegu, nie zatrzyma się odrazu, gdybyśmy nawet całkowicie usunęli siłę poruszającą, gdyż skutkiem bezwładności, wszystkie jego części usiłują zachować ruch, który miały poprzednio. Jednak dzięki tarciu pomiędzy różnemi częściami, które zawsze przeciwdziała ruchowi, a także innym oporom, bieg musi słabnąć, i ostatecznie po pewnym czasie mechanizm się zatrzyma. W tych wypadkach, gdzie chodzi o szybkie wstrzymanie mechanizmu, a tembardziej tam, gdzie siła poruszająca nie daje się całkowicie usunąć, wypada działać na mechanizm z jakąś nową siłą, hamującą ruch. Najczęściej siłą taką jest znowu siła tarcia, a przyrządy, przy pomocy których ją wywołujemy, zowią się hamulcami.

Na fig. 56 widzimy główne części hamulca, używanego do wstrzymywania wozów w miejscowościach górzystych, gdzie na drogach zdarzają się często gwałtowne spadki. Główną część przyrządu stanowi poduszka hamulcowa SS, umieszczona obok koła R. W warunkach zwykłych, gdy wóz jedzie po równinie lub pod górę, poduszka nie dotyka koła i nie wywiera żadnego wpływu na bieg wozu. Podczas jazdy z góry, gdy potrzeba zatrzymać wóz lub zwolnić bieg jego, woźnica przyciska poduszkę do koła, obracając zapomocą rękojeści M śrubę w nieruchomej mutrze V. Śruba pozostaje w odpowiedniem połączeniu z ramieniem a dźwigni łamanej

Fig. 56.

a o b, która skutkiem tego obróci się na pewien kąt około nieruchomego punktu o, a jej drugie ramię b, za pośrednictwem pręta, przyciągnie poduszkę do koła.

Poduszka, cisnąc na koło, wywiera nań pewną siłę tarcia; skutkiem tego, koło zaczyna obracać się wolniej, gdy jeszcze wóz zachowuje dawną szybkość. Łatwo zrozumieć, że teraz już koło nie toczy się po drodze, lecz przynajmniej w pewnym stopniu się sunie. Grunt zaczyna wywierać na koło silne tarcie, które energicznie hamuje ruch wozu.

W podobne hamulce są zaopatrzone wagony kolei żelaznych i tramwajów miejskich.

§ 51. **Liny i pasy.** Szczególnie potężne siły tarcia występują pomiędzy linką a ciałem, które ta linka owija; siły tego rodzaju tem bardziej zasługują na uwagę, że w technice stosujemy je często do różnych celów. Jedno z prostych zastosowań wyobraża fig. 57. Na nieruchomym cylindrze drewnianym AB jest nawinięta linka, na której końcu wisi ciężar P. Ciągnąc za koniec Q, moglibyśmy podnosić ciężar P, ale przytem musielibyśmy przezwyciężać nietylko siłę ciążenia, ale jeszcze siły tarcia, które cylinder wywiera na linkę. Jeżeli ciągniemy z siłą mniejszą od ciężaru P, to ten ostatni usiłuje opadać, i wówczas tarcie zwraca się przeciwko niemu. Tarcie równoważy większą część ciężaru, a nam pozostaje działać na linkę już tylko z niewielką siłą, równą różnicy pomiędzy ciężarem a siłą tarcia. Przy urządzeniu, wyobrażonem na rysunku, można utrzymać w zawieszeniu ciężar, działając na linkę z siłą, ze dwadzieścia razy od niego mniejszą. Jeżeli np. na lince wisi 200 kg, to dostatecznie będzie ciągnąć za koniec Q z siłą 10 kg. Można byłoby osiągnąć ten sam skutek przy pomocy siły jeszcze mniejszej, owinąwszy linkę na cylindrze większą ilość razy.

Fig. 57.

Urządzenie tego rodzaju jest używane na przystaniach do zatrzymywania statków parowych.

Gdy statek zbliża się do przystani, to zostaje zeń wyrzucona linka, której jeden koniec jest dobrze umocowany na statku. Linkę tę chwyta robotnik, stojący na brzegu, i owija kilka razy naokoło pala, mocno osadzonego w gruncie. Ciągnąc następnie za wolny koniec linki, robotnik łatwo zatrzymuje statek, pomimo że ten skutkiem rozpędu działa na linkę z siłą bardzo potężną.

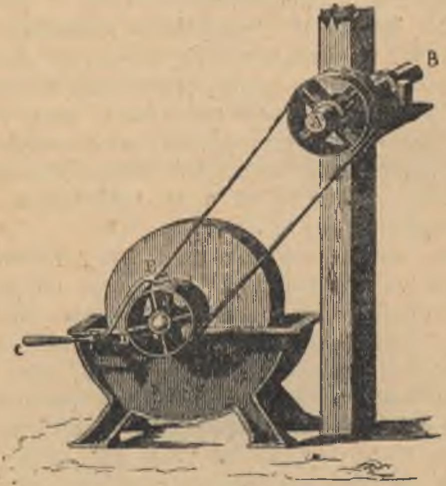

Fig. 58

Rozważany tu rodzaj tarcia znalazł bardzo ważne zastosowanie do przenoszenia ruchu w fabrykach za pośrednictwem lin i pasów transmisyjnych. Przykład takiego urządzenia widzimy na fig. 58. Wyobraża ona przenoszenie ruchu zapomocą pasa z wału transmisyjnego AB na kamień szmerglowy. Na wale i na osi kamienia są osadzone tak zw. koła pasowe, ktore szczelnie owija pas skórzany lub parciany. Gdy wał AB zaczyna się poruszać, to jego koło pasowe wywiera na pas pewne siły tarcia; pod działaniem tych sił pas zostaje wprawiony w ruch i ze swej strony, również zapomocą tarcia, wprawia w ruch koło kamienia i sam kamień.

§ 52. **Koła.** W paragrafach poprzedzających była mowa o urządzeniach, mających na celu zużytkowanie siły tarcia; warto jeszcze wspomnieć o bardzo ważnem urządzeniu, przy pomocy którego można przynajmniej do pewnego stopnia uniknąć tarcia tam, gdzie skutki jego byłyby szkodliwe. Mamy tu na myśli koła taczek, wozów, wagonów i t. d.

Sanki nadają się doskonale do przewożenia ciężarów na gładkiej powierzchni lodu lub śniegu. Współczynnik tarcia pomiędzy żelaznem okuciem płozy a lodem lub śniegiem jest bardzo mały, gdyż wynosi wszystkiego około 0,05, albo $^1/_{50}$, a zatem koń ciągnie z siłą 50 razy mniejszą od ciężaru sanek wraz z ładunkiem. Jeżeli np. sanki ważą 80 a ładunek ich 120 kg, czyli razem 200 kg, to koń utrzyma je w ruchu jednostajnym, ciągnąc z siłą 4 kg. Rezultat ten jest może niedokładny, bo nigdy nie można być pewnym, jaki jest dokładnie współczynnik tarcia, a do tego koń musi przezwyciężać nietylko tarcie pomiędzy płozami i lodem, ale także opór, który powietrze stawia ruchowi sanek. W każdym jednak razie siła, którą ma wywierać koń, jest bardzo mała w porównaniu z ciężarem.

Na gołej drodze sanki są nie do użycia. Współczynnik tarcia pomiędzy płozami a piaskiem lub kamieniami jest duży, a zatem koń musiałby ciągnąć z siłą bardzo znaczną w porównaniu z ciężarem. Daleko lepszy w tym razie jest wóz, osadzony na kołach. Wprawdzie i tutaj powierzchnia drogi wywiera pewną siłę tarcia na obwód koła, ale siła ta nie przeciwdziała ruchowi wozu, lecz tylko wprawia w ruch obrotowy koło; tym sposobem koń nie potrzebuje przezwyciężać tarcia pomiędzy drogą a wozem.

Tem nie mniej i w tym razie istnieje tarcie, hamujące ruch wozu; zachodzi ono pomiędzy osią i kołem, ale koło jest dokładnie dopasowane do osi, stykające się powierzchnie są dobrze smarowane, i dzięki temu tarcie to jest stosunkowo niewielkie.

ZAGADNIENIA.

1) Konie ciągną sanki, ważące 150 kg, po drewnianym bruku. Wyznaczyć siłę, którą wywierają konie. (Współczynnik tarcia = 0,6.)

Odp. 90 kg.

2) Robotnik na budowie ma wciągnąć kamienną płytę, ważącą 70 kg, po desce, tworzącej z poziomem kąt 30^0. Współczynnik tarcia = 0,4. Z jaką conajmniej siłą powinien ciągnąć robotnik w kierunku równoległym do deski?

Odp. Rozłożywszy siłę 70 kg na dwie składowe, z których jedna jest równoległa do deski, a druga do niej prostopadła, znajdziemy (przy pomocy mierzenia lub rachunku), że pierwsza ma 35, a druga 60 kg. Ponieważ płyta jest przyciśnięta do deski z siłą 60 kg, przeto siła tarcia wyniesie $60 \times 0{,}4 = 24$ kg. Robotnik musi pokonywać pierwszą składową i siłę tarcia, czyli razem 59 kg.

3) Ciało, ważące 12 kg, ma właśnie zacząć się zsuwać z równi pochyłej, której wysokość wynosi 2 m, a długość 8 m. Wyznaczyć siłę tarcia.

Odp. 3 kg.

4) Kąt tarcia pomiędzy dwoma materyałami ma 45^0; ile wynosi współczynnik tarcia?

Odp. Przypuśćmy, że płyta, zrobiona z jednego materyału, leży na równi pochyłej, zrobionej z drugiego i ustawionej pod kątem tarcia do poziomu. Dojdziemy łatwo, że siła tarcia jest równa sile, z którą płyta ciśnie na równię, a zatem współczynnik tarcia jest równy 1.

ROZDZIAŁ VII.

PRACA i ENERGIA.

§ 53. **Praca.** Na podłodze leży ciężar. Ktoś podnosi ten ciężar i kładzie na stole; powiemy, że wykonał on pewną pracę. Praca ta będzie tem większa, im większy jest ciężar, i im wyższy jest stół. Stąd wynika, że aby ocenić pracę, to trzeba wiedzieć, ile kilogramów zawiera ciężar i o ile metrów został podniesiony.

Przypuśćmy, że jeden kilogram został podniesiony na wysokość jednego metra; mówimy, że wykonano pracę jednego *kilogramometra*. Kilagramometr obrano za jednostkę pracy, podobnie jak obrano metr za jednostkę długości, a kilogram za jednostkę wagi lub wogóle siły.

Podniesienie jednego kilograma na wysokość dwóch metrów wymaga oczywiście dwa razy więcej pracy, niż podniesienie jednego kilograma o jeden metr, czyli wymaga dwóch kilogramometrów pracy. Wykonamy również pracę dwóch kilogramometrów, podnosząc dwa kilogramy o jeden metr.

Zastanówmy się teraz, ile kilogramometrów pracy potrzeba wykonać, aby podnieść 5 kg na wysokość trzech metrów. Jasnem jest, że podnosząc 5 kg o 1 m, wykonywamy 5 kilogramometrów pracy; czynność tę musimy powtórzyć trzy razy, a zatem wypadnie razem $5 \times 3 = 15$ kilogramometrów.

Jeżeli mamy podnieść 10 kg o 20 m, to każdy metr podniesienia będzie oczywiście wymagał 100 kilogramometrów pracy, wszystkiego więc wyjdzie $100 \times 20 = 2000$ kilogramometrów.

Rozważania powyższe doprowadzają nas do następującego prawidła ogólnego:

Aby wyrazić w kilogramometrach pracę, która wychodzi na podniesienie pewnego ciężaru na pewną wysokość, należy liczbę kilogramów danego ciężaru pomnożyć przez liczbę metrów danej wysokości.

§ 54. **Przykłady.** Praca odbywa się nietylko przy podnoszeniu ciężaru; praca odbywa się zawsze, gdy siła działa na ciało, i ciało to porusza się pod jej działaniem. Tak więc koń wykonywa pracę, ciągnąc wóz na drodze poziomej, robotnik wykonywa pracę, obracając sieczkarnię zapomocą korby, wiatr wykonywa pracę, poruszając śmigi wiatraka, p a r a wykonywa pracę, wprawiając w ruch maszynę parową i t. d. Zobaczymy zaraz, w jaki sposób w niektórych razach można obliczyć wykonaną pracę.

Koń ciągnie wóz z siłą 28 kilogramów; jaką pracę wykona on, odbywszy 1 kilometr drogi? Oczywiście koń wykonałby taką samą pracę, podniósłszy ciało, ważące 28 kilogramów, na wysokość jednego kilometra albo 1 000 metrów, a zatem szukana praca jest równa $28 \times 1\,000 = 28\,000$ kilogramometrów.

Weźmiemy teraz inny przykład, wymagający nieco dłuższych rozważań. Na fig. 59 mamy wagon tramwaju konnego, widziany z góry.

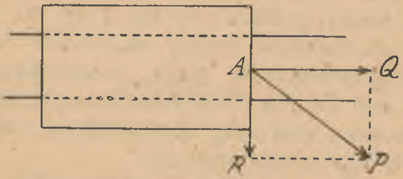

Fig. 59.

W punkcie A do wagonu zaprzęgnięty jest koń; przypuśćmy, że koń ten ciągnie nie w kierunku szyn, lecz nieco w bok, a mianowicie wywiera na wagon siłę AP, równą, dajmy na to, 20 kilogramom. Jak wyznaczyć pracę tego konia na pewnej drodze, np. 10 m?

Wyda się może niejednemu, że szukana praca będzie równa $20 \times 10 = 200$ kilogramometrom, ale zobaczymy zaraz, że jest inaczej.

Rozłóżmy siłę AP na dwie składowe, z których jedna ma być równoległa, a druga — prostopadła do szyn. Na rysunku naszym pierwszej odpowiada odcinek AQ, a drugiej — AR. Jasną jest rzeczą, że składowa AR jedynie przyciska obrzeża kół wagonu do szyn i równoważy się z reakcyą szyn. To ciśnienie boczne kół na szyn / wywołuje siły tarcia, które działają na wagon w kierunku odwrotnym do ruchu wagonu i muszą być przezwyciężane przez konia; aby jednak nie utrudniać sobie rozważań, przyjmiemy, że tarcie jest w tym razie bardzo małe i nie będziemy nań zwracać uwagi. W takim razie możemy powiedzieć, że składowa AR nie wpływa wcale na ruch wagonu. Wagon porusza się tak, jak gdyby działała nań jedynie składowa AQ, innemi słowy, skutek byłby ten sam, gdyby koń ciągnął w kierunku szyn z siłą AQ.

Stąd widać, że przy wyznaczaniu pracy konia należy brać w rachubę tylko składową AQ. Przypuśćmy, że składowa AR ma 12, a składowa AQ 16 kg, to praca konia na odległości 10 m wyniesie $16 \times 10 = 160$, a nie 200 kilogramometrów.

Inny przykład. Rękojeść korby sieczkarni zatacza koło, którego obwód wynosi $1^1/_2$ m. Aby utrzymać sieczkarnię w ruchu, należy działać na korbę z siłą 8 kg. Jaką pracę zużywa sieczkarnia podczas stu obrotów?

Znajdziemy łatwo, że na jeden obrót sieczkarni wychodzi 12 kilogramometrów pracy, a na 100 obrotów 120 kilogramometrów.

Jest wiele maszyn parowych, o których się mówi, że pracują «bez rozprzężenia pary.» Bieg takiej maszyny odywa się, jak następuje. Przypuśćmy, że cylinder jest poziomy, będziemy więc mówili o jego końcu prawym i o końcu lewym. Otóż wyobraźmy sobie, że tłok biegnie od prawego końca do lewego. Podczas tego całego biegu prawa strona cylindra (t. j. przestrzeń, zawarta pomiędzy tłokiem, a prawem dnem) jest połączona z kotłem i panuje w niej takie samo ciśnienie, jak w kotle, zaś lewa strona jest połączona z powietrzem zewnętrznem, i panuje w niej ciśnienie atmosferyczne. Gdy tłok dojdzie do lewego końca, to połączenia się zmieniają. Lewa strona cylindra łączy się z kotłem, a prawa — z atmosferą, i tak pozostaje podczas całego powrotnego biegu tłoka. Takie maszyny «bez rozprzężenia« są często używane do poruszania niewielkich pomp.

Dajmy na to, że w maszynie takiej cylinder ma w przekroju 120 cm^2, skok wynosi 250 mm lub $^1/_4$ m, a ciśnienie w kotle 8 atm. Jaką pracę wykona para, gdy tłok przebiegnie cylinder tam i z powrotem, czyli podczas jednego obrotu maszyny? *)

Para o ciśnieniu jednej atm. działa na kwadratowy cm z siłą jednego kilograma, a ponieważ powierzchnia tłoka, pozostająca pod działaniem pary, ma 120 cm^2, zatem na cały tłok para wy-

---

*) Zazwyczaj maszyna taka nie posiada przyrządu korbowego, ani koła rozpędowego, i żadna jej część nie wykonywa ruchu obrotowego, a zatem wyraz „obrót“ jest w tym razie nie zupełnie właściwy.

wiera siłę $8 \times 120 = 960$ kg. Podczas jednego obrotu tłok odbędzie $^1/_2$ m drogi, a praca wyniesie 480 kilogramometrów.

§ 55. **Energia.** Zdolność do wykonywania pracy nazywamy *energią*, i jeżeli tylko jakieś ciało jest w stanie wykonać pracę, to mówimy, że posiada ono pewną ilość energii. Kilka przykładów lepiej to wyjaśni.

Nakręcając zegar wagowy, wywieramy pewną siłę na klucz; pod jej działaniem klucz się obraca, a więc wykonywamy pracę. Praca ta wychodzi na podniesienie wagi, a podniesiona waga jest zdolna wykonywać pracę; i istotnie w ciągu pewnego czasu od nakręcenia waga pracuje, mianowicie wprawia w ruch mechanizm zegara, przezwyciężając przytem rozmaite opory, które ruchowi temu przeciwdziałają. Tak więc podniesiona waga zegarowa posiada zdolność wykonywania pracy, czyli posiada energię.

Należy zwrócić szczególną uwagę na to, że energię posiada tylko waga podniesiona, innemi słowy waga zawdzięcza swą energię położeniu, które zajmuje. Taką energię nazywamy *potencyalną.*

Jeżeli zegar jest sprężynowy, to i w tym razie podczas nakręcania wykonywamy pracę, a mianowicie pokonywamy opór, który sprężyna stawia zwijaniu. Zwinięta sprężyna może wprawiać zegar w ruch tak samo jak waga, a więc sprężyna posiada również energię; energię jej nazwiemy potencyalną, podobnie jak energię podniesionej wagi.

Wielkie ilości energii potencyalnej zawiera proch strzelniczy i energia ta w jednem mgnieniu oka może przekształcić się w pracę. Zrozumiemy to bez trudności, rozważywszy, co się dzieje w lufie karabinu podczas wystrzału.

Wyobraźmy więc sobie nabity karabin. Proch zajmuje w nim bardzo małą przestrzeń, szczelnie zamkniętą przez kulę. Podczas wystrzału proch się spala, przyczem wytwarza się wielka ilość gazu. W pierwszym momencie gaz ten zajmuje tę samą przestrzeń, lecz usiłuje się rozszerzyć, t. j. zająć przestrzeń większą. W tym stanie rzeczy gaz jest podobny do silnie ściśniętej sprężyny i podobnie jak sprężyna posiada energię potencyalną. Możemy uważać, że energia tkwiła poprzednio w prochu.

Gaz ciśnie z pewną siłą na kulę, jak para w cylindrze maszyny parowej ciśnie na tłok, i pod działaniem tej siły kula zaczyna się poruszać. Tak więc gaz wykonywa pracę, i praca ta trwa dopóty, dopóki kula nie wyjdzie z lufy. Lecz i wówczas energia, która pierwotnie istniała w prochu, a następnie w gazie, nie znika; zmienia ona tylko postać i przechodzi do innego ciała, a mianowicie do kuli.

Że kula po wyjściu z lufy posiada energię, o tem przekonamy się bez trudu. Przypuśćmy w tym celu, że karabin jest wycelowany pionowo w górę, zatem i kula wzniesie się pionowo w górę. Skoro zaś kula może podnieść w górę ciężar, mianowicie swój własny ciężar, to niewątpliwie posiada ona zdolność wykonywania pracy, czyli energię.

Jeżeli karabin był wycelowany poziomo, to kula nie wznosi się w górę, można jednak łatwo okazać, że i w tym razie posiada ona energię po wyjściu z lufy. W tym celu wyobraźmy sobie urządzenie takie. W ziemi jest zrobiony głęboki pionowy otwór, a na jego dnie leży mały ciężarek. Do ciężarka przyczepiono jeden koniec sznura, który przechodzi przez blok, urządzony nad otworem, a drugim końcem jest przymocowany do kuli w lufie karabinu. Każdy łatwo sobie teraz wyobrazi, że gdy nastąpi wystrzał w kierunku poziomym lub jakimkolwiek innym, to (o ile nie zerwie się sznur) kula pociągnie ciężarek w górę, czyli wykona pracę, a stąd widać, że posiada energię.

Z rozważań powyższych wynika, że ciało poruszające się zawiera w sobie pewną ilość energii. Aby odróżnić ten rodzaj energii od energii potencyalnej nazwano ją *cynetyczną*.

§ 56. **Niezniszczalność energii.** W przykładzie ostatnim widzieliśmy, że energia potencyalna ściśniętego gazu przekształciła się na energię cynetyczną kuli. Rozważając ten przykład w dalszym ciągu, poznamy inne przekształcenia energii z jednej postaci w drugą.

Przypuśćmy, że wystrzał nastąpił w kierunku pionowym. W chwili wyjścia z lufy kula posiada bardzo wielką szybkość a zatem i dużą ilość energii cynetycznej. Gdy kula wznosi się coraz wyżej, to szybkość jej się zmniejsza, a skutkiem tego zmniejsza się i energia cynetyczna; jednocześnie jednak kula zajmuje coraz wyższe położenie, zaś ciało, podniesione na pewną wysokość, posiada energię potencyalną, podobnie jak waga zegara. Im wyżej wznosi się kula, tem większa jest jej energia potencyalna. Tak więc jednocześnie zmniejsza się energia cynetyczna, a wzrasta energia potencyalna; możemy powiedzieć, że pierwsza przekształca się w drugą.

Przyszła wreszcie chwila, gdy szybkość kuli wyczerpała się zupełnie. Nie posiada ona już wcale energii cynetycznej, natomiast jej energia potencyalna jest obecnie największa. Cała energia cynetyczna, którą kula otrzymała od gazu, przekształciła się na potencyalną.

Od tej chwili zaczyna się spadanie. Kula schodzi coraz niżej, a zatem zmniejsza się jej energia potencyalna, jednocześnie zaś wzrasta szybkość kuli, a więc wzrasta energia cynetyczna. Teraz energia potencyalna przekształca się na cynetyczną. Gdy kula dojdzie do tego poziomu, na którym znajdował się wylot karabinu, to odzyska ona całkowitą energię cynetyczną, jaką miała, wychodząc z lufy.

W rzeczywistości zjawisko odbywa się inaczej, gdyż kula w swym biegu musi przezwyciężać opór powietrza, przyczem oddaje cząsteczkom powietrza część swej energii; aby jednak nie utrudniać sobie rozważań, pominęliśmy umyślnie tę okoliczność. W każdym razie, z rozważań tych widać, że w ciągu całego zjawiska energia przekształca się z jednej postaci w drugą, lecz nie tworzy się i nie znika, i nigdzie w żadnym wypadku nie dostrzeżono dotychczas tworzenia się lub znikania energii.

Zdawałoby się na pierwszy rzut oka, że przy pomocy pewnych urządzeń, (np. maszyny parowej) można tworzyć energię, ale tak nie jest. Energia występuje w najrozmaitszych postaciach, i my możemy jedynie przy pomocy różnych urządzeń przekształcać jedną postać w drugą, a to jest zupełnie inna sprawa, niż tworzenie. Zrozumienie tej prawdy jest rzeczą niezmiernie ważną, i dla tego też warto się nad tem dłużej zastanowić.

Rozważymy naprzód pewien bardzo pospolity przykład. Zboże we młynie miele się pomiędzy kamieniami młyńskiemi. Aby zmusić kamienie do wykonywania tej pracy, należy dostarczyć im odpowiednich ilości energii. Energię tę czerpią kamienie za pośrednictwem kół zębatych i transmisyi od koła wodnego. Lecz koło wodne nie wytwarza tej energii, ono odbiera jedynie część energii od przepływającej wody i przekształca w sposób odpowiedni. Aby młyn wodny mógł pracować, to po jednej stronie koła woda musi stać na wyższym poziomie (np. w stawie), a po drugiej — na poziomie niższym (np. w kanale odpływowym, którym woda odchodzi do rzeki). W stawie woda posiada energię potencyalną. Gdy woda spada na łopatki koła, to jej energia potencyalna przekształca się na cynetyczną i w pewnej części przechodzi na koło.

Cofnijmy się dalej wstecz i rozważmy, skąd bierze się w wodzie stawu energia potencyalna? Woda ta istniała pierwotnie w postaci pary wodnej w powietrzu, i po skropleniu spadła w postaci deszczu na wzgórza, stamtąd spłynęła do strumienia, a wreszcie do stawu. Lecz skąd się bierze w powietrzu woda w postaci pary? Promienie słoneczne ogrzewają wodę w morzu, skutkiem czego woda paruje, wznosi się w powietrze i tworzy chmury deszczowe. Słońce za pośrednictwem swych promieni zsyła codziennie na ziemię olbrzymie ilości energii, i kosztem tej energii odbywa się między innemi mielenie zboża we młynie.

Koń, wiozący zboże do młyna, spełnia pracę, ale i o nim nie można powiedzieć, że sam wytwarza energię do tej pracy. Energia konia pochodzi z siana i owsa, którym go karmią, zaś poszukując źródeł energii, którą niewątpliwie zawierają siano i owies, doszlibyśmy znowu do słońca, w którego promieniach rośnie trawa na łące i dojrzewa zboże na polu; ale zajęło by to zbyt wiele miejsca, gdybyśmy chcieli opowiadać, w jaki sposób roślina czerpie energię z promieni słonecznych, i utrwala ją w swych łodygach, liściach i owocach.

Młyn parowy czerpie energię nie z wody lecz z węgla, który się spala pod kotłem. Kocioł i maszyna parowa jedynie nadają energii, zawartej w węglu, postać użyteczną. Zastanówmy się jeszcze, skąd pochodzi energia węgla. Wiele, wiele tysięcy, a nawet setek tysięcy lat temu, ziemię okrywała wspaniała roślinność, bez porównania potężniejsza od dzisiejszej. Część tej roślinności, skutkiem różnych gwałtownych przewrotów i stopniowych zmian, zachodzących na powierzchni ziemi, została przykryta pokładami ziemnymi, zwęgliła się z biegiem czasu i zachowała się tym sposobem w postaci węgla kamiennego. Widać stąd, że energia, zawarta w węglu i wprawiająca w ruch młyn parowy, pochodzi znowu ze słońca; spłynęła ona przed wiekami na ziemię na promieniach słonecznych.

§ 57. **Ciepło.** Dotarliśmy do źródła, z którego pochodzi energia, obracająca kamienie młyńskie, wypada teraz zastanowić się nad tem, co dalej dzieje się z tą energią.

Do wodnego młyna, pozostającego w spokoju, zwieziono pewną ilość zboża; wówczas puszczono młyn w ruch, a gdy całe zboże zostało zmielone, to zatrzymano młyn znowu. Przez cały czas mielenia młyn czerpał energię z wody. Cóż się stało z tą energią po zmieleniu zboża? Nie ukrywa się ona w kamieniach, ani w innej części młyna, bo części te nie uległy żadnej zmianie, jeżeli pominiemy nieznaczne zużycie. Mąka i otręby nie zawierają więcej energii, niż poprzednio zboże, a więc i w mlewie nie nagromadziła się energia. Wygląda więc tak, jak gdyby cała energia, którą młyn odebrał od wody, zniknęła bez śladu.

Doszliśmy do takiego wyniku, gdyż nie braliśmy w rachubę pewnej postaci energii, która odgrywa na świecie niezmiernie doniosłą rolę, a mianowicie ciepła.

Że ciepło jest rodzajem energii, o tem mogą przekonać uwagi następujące. Wyobraźmy sobie kocioł parowy, napełniony do należytego poziomu wodą, ale woda ta jest jeszcze zimna. Kocioł ten nie zawiera energii, bo gdy połączymy go z maszyną parową, to maszyna nie ruszy z miejsca.

Rozniećmy ogień pod kotłem. Woda się zagrzeje i powstanie para, zdolna do wykonywania pracy, a mianowicie do poruszania maszyny parowej. Jakim sposobem energia dostała się do kotła? Nie zrobiliśmy nic innego, jak tylko doprowadziliśmy do kotła ciepło, a zatem ciepło jest energią, która w kotle przekształca się na energię pary.

Teraz już wytłomaczymy sobie łatwo, co się stało z energią, którą młyn przez cały czas mielenia pobierał z wody.

Gdy trzemy jedno ciało o drugie, to ciała te zawsze się ogrzewają. Fakt ten jest dobrze znany każdemu, i każdy mógłby przytoczyć wiele takich przykładów z własnego doświadczenia. Nóż ogrzewa się, gdy go ostrzymy na osełce, pilnik ogrzewa się, gdy piłujemy nim żelazo i t. d. Trąc jedno ciało o drugie, wykonywamy pracę, a więc wydajemy energię naszych mięśni, i ta energia przekształca się na ciepło.

Podczas mielenia zachodzi silne tarcie pomiędzy kamieniami a ziarnkami zboża, skutkiem tego ogrzewają się kamienie i mlewo, jak o tem każdy może się łatwo przekonać zapomocą dotykania. Ogrzewanie to nie jest zbyt silne, bo powstałe ciepło rozkłada się na wielkie ilości mąki i otrębów.

Ciało ogrzane stygnie, to znaczy, że ciepło z niego rozpływa się na ciała otaczające, powietrze, ściany budynku, ziemię, i t. d. Ciepło nie ginie, lecz skutkiem rozproszenia przestaje być dla nas dostrzegalnem. Tak samo, gdy kto wyleje do stawu szklankę farbki, to farbka rozejdzie się w wodzie i zniknie nam z oczu, wiemy jednak, że ona istnieje, a tylko nie możemy jej dostrzedz skutkiem wielkiego rozcieńczenia.

Ciepło, które powstało podczas mielenia, rozchodzi się stopniowo na otaczające ciała i w jakie pół godziny po zatrzymaniu młyna staje się zupełnie niedostrzegalnem.

Widzimy teraz, że energia, którą młyn pobrał z wody, nie zginęła. Przeobraziła się ona w ciepło i rozproszyła w powietrzu, w ziemi i t. d., przybrała więc postać, w której już jej zużytkować nie możemy.

§ 58. **Miara energii.** Im więcej energii posiada ciało, tem więcej pracy może ono wykonać, a zatem energia ciała daje się wyrażać w kilogramometrach, podobnie jak praca.

Przypuśćmy, że w zbiorniku, urządzonym na wysokości 20 metrów ponad ziemią, mieści się 1000 litrów, czyli 1000 kg wody.*) Aby podnieść tę ilość wody na taką wysokość, trzeba było wykonać $1000 \times 20 = 20000$ kilogramometrów pracy; odwrotnie, gdybyśmy pozwolili tej wodzie spływać na łopatki koła wodnego, to koło dostarczyłoby nam (gdyby nie było strat) 20000 kilogramometrów pracy. Powiemy przeto, że woda zawiera 20000 kilogramometrów energii potencyalnej.

§ 59. **Sprawność.** Ilość pracy, którą pewna maszyna (np. maszyna parowa, koło wodne, motor gazowy lub motor elektryczny) dostarcza na sekundę, nazywamy sprawnością tej maszyny.

---

*) Litr wody waży 1 kilogram.

Jeżeli np. powiedziano jest, że sprawność pewnego motoru elektrycznego wynosi 300 kilogramometrów na sekundę, to znaczy, że motor ten co sekundę wykonywa 300 kilogramometrów pracy. Służyć on może do poruszania windy, w której klatka ważąca 150 kg jedzie w górę z szybkością dwóch metrów na sekundę. Mógłby on również służyć do poruszania pompy, dostarczającej na sekundę 75 litrów wody na wysokość 4 m, a przynajmniej tak by było, gdyby nie zachodziły straty.

Najczęściej sprawność maszyny wyraża się nie w kilogramometrach na sekundę lecz w tak zwanych *koniach parowych* lub *koniach mechanicznych*. Koniem parowym nazywamy sprawność 75 kilogramometrów na sekundę. Tak więc sprawność motoru elektrycznego, o którym wyżej była mowa, wynosi 4 konie parowe; mówimy również, że na poruszanie windy (lub pompy) wychodzi 4 konie parowe sprawności, albo że winda zużywa 4 k. p.

§ 60. **Przenoszenie energii.** Kto uważnie przeczytał paragrafy poprzedzające, temu nie przyjdzie do głowy, że energia to jest coś materyalnego, że jest to np. jakiś płyn albo gaz, i istotnie wyobrażenie takie byłoby całkiem niedorzeczne. Tem nie mniej można dopatrzeć pewnych podobieństw pomiędzy energią i ciałami materyalnemi, a przedewszystkiem to, że energia, podobnie jak ciało materyalne, może zmieniać położenie w przestrzeni, czyli przenosić się z miejsca na miejsce. Tak np. energia cynetyczna lecącej kuli karabinowej tkwi w tej kuli i wraz z nią się porusza;

energia, zawarta w kotle parowym lokomotywy, jedzie na lokomotywie, jakby była jakim przedmiotem.

Szczególnie nauczający i ważny przykład mamy w urządzeniu współczesnej fabryki, np. fabryki maszyn. Widzimy tam przedewszystkiem kotłownię, do której zwozi się węgiel; można powiedzieć, że to energię zwożą do fabryki. Węgiel spala się pod kotłem, to znaczy, że jego energia potencyalna przechodzi w ciepło. Ciepło przenika do kotłów i znowu przeistacza się w energię pary. Trzeba teraz tę energię przenieść do maszyny parowej; odbywa się to zapomocą rur, przez które przepływa para.

W maszynie parowej energia doznaje nowego przekształcenia, a mianowicie przechodzi w energię cynetyczną koła rozpędowego. Wypada teraz energię w tej nowej postaci przenieść do warsztatów, podzielić na części i doprowadzić do różnych maszyn pomocniczych, tokarni, heblarek i t. d. Do celu tego służą wały transmisyjne, pasy, liny, koła zębate i t. d. Przy pomocy tych urządzeń energia zostaje rozprowadzona po całej fabryce, jak woda przy pomocy rur.

W czasach nowszych do tego samego celu bywa coraz częściej używany prąd elektryczny. Maszyna parowa wprawia w ruch generator elektryczny, wytwarzający prąd. Prąd ten dopływa przez druty do elektromotorów, ustawionych w odpowiednich miejscach i wprawiających w ruch pojedyńcze maszyny pomocnicze albo całe grupy tych maszyn. W kopalniach do rozprowadzania energii służy nieraz ścieśnione powietrze, które od pompy tłoczącej (kompresora), pędzonej od maszyny parowej, rozchodzi się rurami do świdrów pneumatycznych, wiercących dziury w skale.

Tak czy inaczej energia dopływa do maszyny pomocniczej, np. tokarni, i skutkiem tego tokarnia pracuje, a mianowicie zbiera wiór z toczonej sztuki żelaza. Jednocześnie doprowadzona energia przekształca się w ciepło, które rozprasza się w ciałach otaczających.

§ 61. **Straty.** Wyobrażenie o przemianach i przenoszeniu energii byłoby niekompletne, gdybyśmy nie zwrócili uwagi na pewną okoliczność uboczną, którą dotychczas z rozmysłem pomijaliśmy milczeniem, aby nie utrudniać sprawy.

Wszelkie przekształcanie energii z jednej postaci w inną, albo przenoszenie z jednego miejsca na drugie, jest zawsze połączone z pewnemi stratami. Przekształcając energię, otrzymujemy zawsze mniej w nowej postaci, niż było w dawnej, przenosząc energię, otrzymujemy mniej w nowem miejscu, niż było w dawnem. Energia wprawdzie nie niknie, to jest niemożliwe, ale pewna część jej przybiera postać dla nas niepożądaną i staje się nieużyteczną.

Powróćmy jeszcze do ogólnego obrazu fabryki, który nakreśliliśmy w paragrafie poprzedzającym. Z energii, zwiezionej do fabryki w postaci węgla, część tylko po przekształceniu dostaje się do kotła, gdyż pewna część ciepła różnemi drogami wychodzi z paleniska, ogrzewając otaczające powietrze, mury i ziemię, sporo też energii w postaci ciepła uchodzi przez komin z gazami kominowymi. Cała ta ilość ciepła, nie dochodząca do kotła, stanowi dla fabryki stratę energii. Po drodze od kotła do maszyny parowej przechodząca para ogrzewa otaczające przedmioty, czyli znowu traci energię. Maszyna parowa nie może przekształcać całej dopływającej energii w energię cynetyczną z różnych przyczyn, a głównie dla tego, że wiele energii nie wyzyskanej pozostaje jeszcze w parze wydmuchowej.

Dalsze straty energii zachodzą przy przenoszeniu energii od maszyny parowej do maszyn pomocniczych. Przyczynę tych strat stanowi głównie tarcie w łożyskach wałów, pomiędzy pasami i kołami pasowemi, pomiędzy zębami kół zębatych i t. d., bo gdzie tylko zachodzi tarcie, tam zawsze energia przeistacza się w ciepło i zostaje rozproszona. Jeżeli przenoszenie energii odbywa się zapomocą prądu elektrycznego, to pod działaniem prądu ogrzewają się przewodniki, i powstałe ciepło rozprasza się bezużytecznie.

Gdybyśmy porównali ilość energii, którą odbierają maszyny pomocnicze, z ilością energii, wprowadzanej do fabryki pod postacią węgla, to znaleźlibyśmy, że straty poniesione są bardzo wielkie, że tylko drobna część energii węgla zostaje zużyta w sposób pożądany, zaś reszta rozprasza się w postaci ciepła.

Przyczyna takiego stanu tkwi nietylko w niedoskonałości urządzeń technicznych, ale i w samej naturze rzeczy.

ZAGADNIENIA.

1) Jaką pracę należy wykonać, aby podnieść ciężar 15 kg na wysokość 6 m?

Odp. 90 kilogramometrów.

2) Robotnik działa z siłą 5 kg na korbę, której rękojeść zatacza koło, posiadające 1500 mm obwodu. Z jaką sprawnością pracuje robotnik, jeżeli korba robi 120 obrotów na minutę?

Odp. 15 kilogramometrów na sekundę albo $^1/_5$ konia parowego.

3) Maszyna parowa, pracująca bez rozprzężenia, robi 90 obrotów na minutę; cylinder jej ma w przekroju 250 cm², skok ma 250 mm, a ciśnienie pary wynosi 6 atmosfer. Jaka jest sprawność maszyny?

Odp. 15 koni parowych. Jest to tak zw. sprawność wskazana; w rzeczywistości skutkiem różnych strat, zachodzących w mechanizmie maszyny, wyda ona mniej, może wszystkiego 12 lub nawet 10 koni.

4) 26-konna maszyna parowa wprawia w ruch pompę, dostarczającą na godzinę 117000 litrów wody na wysokość 36 m. Ile wynoszą straty, zachodzące w pompie, na godzinę?

Odp. Gdyby nie było strat, to na podniesienie tej ilości wody wystarczyłoby 4212000 kilogramometrów; maszyna parowa daje 7020000 kilogramometrów, a zatem straty wynoszą 2808000 kilogramometrów.

5) Do pędzenia młyna potrzeba 10 koni parowych; woda spada na koło z wysokości 4 m, i straty w kole wynoszą połowę doprowadzanej energii (mówi się, że *współczynnik użytecznego skutku* koła $= ^1/_2$). Ile litrów wody powinno dopływać do koła na sekundę?

Odp. 375.

6) Sikawka ma wyrzucać na sekundę 10 litrów wody na wysokość 27 m, przyczem straty są trzy razy mniejsze od pracy użytecznej. Sikawkę obsługuje 20 ludzi; ile pracy wykona każdy na sekundę?

Odp. 18 kilogramometrów. Współczynnik użytecznego skutku sikawki jest równy $^3/_4$.

7) Okręt płynie z szybkością 18 kilometrów na godzinę, przyczem jego maszyna rozwija 6000 koni parowych. Jaki opór pokonywa okręt?

Odp. 90 tonn.

8) Robotnik poleruje posadzkę mozajkową kamieniem, ważącym 40 kg, przesuwając ten kamień 10 razy na minutę o 1200 mm w jedną stronę i o tyleż z powrotem. Współczynnik tarcia pomiędzy kamieniem i podłogą wynosi $^1/_4$ (lub 0,25). Wyznaczyć sprawność robotnika.

Odp. Robotnik musi wywierać na kamień siłę 10 kg, a zatem na jedno przesunięcie wyłoży 12 kilogramometrów pracy. Sprawność jego wyniesie 4 kilogramometry na sekundę.

ROZDZIAŁ VIII.

MASZYNY PROSTE.

§ 62. **Wielokrążek.** Są urządzenia, które pozwalają przezwyciężać dużą siłę zapomocą małej siły. Przykład takiego urządzenia mieliśmy już w dźwigni. Mogłoby się zdawać, że w ten sposób mała ilość energii daje się przekształcić w dużą; zobaczymy zaraz na przykładzie wielokrążka, że mniemanie takie byłoby z gruntu fałszywe.

Wielokrążek bywa często używany do podnoszenia ciężarów. Składa się on z dwóch ram żelaznych (fig. 60), z których jedna jest przymocowana do sufitu, a do drugiej, swobodnej, przyczepia się podnoszony ciężar, który na rysunku oznaczono literą W. W każdej ramie są osadzone trzy bloki, przez które przebiega sznur, jak wskazuje rysunek. Jeden koniec tego sznura jest uwiązany do górnej ramy, a drugi, swobodny, dźwiga ciężar, oznaczony literą P.

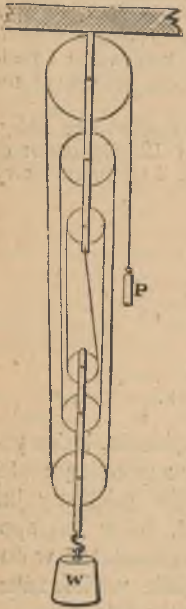

Fig. 60.

Będziemy uważali, że w przyrządzie tym niema tarcia, i rozważymy, przy jakim stosunku ciężarów W i P zachodzi równowaga.

Z rysunku widać, że rama dolna wraz z ciężarem W wisi na sześciu sznurach, które przebiegają prawie pionowo, a zatem równolegle jeden do drugiego. Stąd wynika, że każdy sznur dźwiga szóstą część ciężaru W (uważamy, że dolna rama i jej bloki są bardzo lekkie, i nie bierzemy ich w rachubę), i temu też jest równe napięcie sznura. Jasnem jest teraz, że na ciężar P sznur działa z siłą, skierowaną pionowo w górę i równą szóstej części ciężaru W, a więc jeżeli ma zachodzić równowaga, to ciężar P powinien być równy szóstej części ciężaru W. Jeżeli naprzykład ciężar W ma 6 kg, to można go zrównoważyć zapomocą jednego kg.

Rozważmy teraz taki wypadek. Dajmy na to, że ciężar W ma dokładnie 6 kg, zaś ciężar P jest odrobinę większy od jednego kg. W takich warunkach równowaga jest niemożliwa; ciężar P zacznie schodzić na dół, a W — wznosić się w górę. Przypuśćmy, że W wzniesie się o 1 m w górę, a więc zostanie nad nim wykonana praca 6 kilogramometrów. Każdy z sześciu sznurów, na których wisi dolna rama, skróci się o 1 m, a więc ciężar P wyciągnie 6 m sznura i sam zejdzie o 6 m niżej. Stąd widać, że ciężar P wykona 6 kilogramometrów pracy.

Z rachunku tego wynika, że taka sama praca została wykonana nad ciężarem W, jaką wykonał ciężar P. Przy pomocy wielokrążka przezwyciężamy dużą siłę siłą małą, czyli zyskujemy na sile, ale nie zyskujemy nic na pracy ani na energii.

Zastanowimy się jeszcze chwilę, jaki wpływ na działanie wielokrążka wywiera tarcie. Tarcie zachodzi tutaj pomiędzy blokami a ich osiami a także w miejscach zginania sznura pomiędzy włóknami, z których go skręcono.

Przypuśćmy, że ciężar W ma być podniesiony w górę. Do tego ciężar P musi nietylko przezwyciężać siłę ciążenia, działającą na W, ale i siły tarcia, które zawsze przeciwdziałają ruchowi, a zatem musi on mieć znacznie więcej od jednego kilograma, może $1^1/_3$ albo nawet $1^1/_2$ kg.

Z tej przyczyny praca, wykonana przez ciężar P, będzie większa od pracy, wykonanej nad ciężarem W. Różnica przechodzi w ciepło w miejscach, gdzie występuje tarcie. Przy zastosowaniu wielokrążka zużyjemy na podniesienie ciężaru więcej pracy, niż byśmy zużyli, podnosząc ten ciężar bezpośrednio.

Przypuśćmy jeszcze, że chodzi tylko o to, aby ciężar W nie opadał. W takim razie ciężar P może być mniejszy od 1 kg, bo teraz siły tarcia zwrócą się przeciwko ciężarowi W i pomogą utrzymać go w spokoju.

Fig. 61.

Fig. 61 wyobraża inną postać wielokrążka, praktyczniejszą i częściej używaną.

§ 63. **Kołowrót**. Na fig. 62 widzimy inną prostą maszynę do podnoszenia ciężarów. Jest to tak zwany kołowrót, używany często do wyciągania wiadra ze studni.

Kołowrót składa się z wału A, osadzonego w łożyskach; można go obracać zapomocą korby M. Do wału jest przyczepiony koniec linki, na której wisi ciężar, np. wiadro F. Gdy wał się obraca, to linka się nawija, i ciężar idzie w górę. Pragniemy zbadać, w jakim stosunku powinna stać siła, działająca na korbę, do ciężaru P, aby zrównoważyć ten ciężar.

Możemy w tym celu uciec się do zasady dźwigni. Na fig. 63 widzimy tylko główne części mechanizmu. Kółko wyobraża tutaj przekrój wału; na wał działa pionowo ciężar wiadra czyli siła P. Odcinek OB oznacza korbę, na którą działa siła robotnika F prostopadle do ramienia OB. Widzimy teraz, że korba OB wraz z promieniem wału OA tworzą dźwignię łamaną, a zatem siła F powinna być tyle razy mniejsza od ciężaru P, ile razy ramię OA jest mniejsze od ramienia OB, lub innemi słowy, ile razy promień wału jest mniejszy od promienia koła, zataczanego przez rękojeść korby.


Fig. 62.

Tak np. jeżeli wiadro waży 12 kg, a OA jest 3 razy mniejsze od OB, to należy działać z siłą 4 kg.

Możemy dojść do tego samego, posługując się zasadą pracy. Przypuśćmy, jak poprzednio, że OB jest trzy razy dłuższe od OA, i że wiadro waży 12 kg, a prócz tego jeszcze, że obwód wału albo jeden zwój linki ma 1 m długości. Obwód koła, zataczanego przez rękojeść korby, jest trzy razy dłuższy, a więc ma 3 m długości. Dajmy na to, że wał zrobił jeden obrót, to oczywiście wiadro podniosło się o jeden metr, a więc została nad nim wykonana praca 12 kilogramometrów. Ponieważ na pracy nie zyskujemy nic, przeto i robotnik odbył pracę 12 kilogramome-

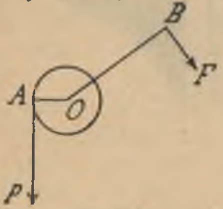

Fig. 63.

trów, a że ręka jego przebiegła drogę 3 metrów, zatem musiał on działać z siłą 4 kg.

W rachunku powyższym nie braliśmy pod uwagę tarcia, które zachodzi w łożyskach wału i pomiędzy włóknami liny. Robotnik nietylko podnosi wiadro, ale i przezwycięża tarcie, i z tego względu musi działać na korbę z siłą znacznie większą od 4 kg.

§ 64. **Kołowrót chiński.** Fig. 64 wyobraża dowcipną maszynę do podnoszenia ciężarów, zwaną kołowrotem chińskim. Różni się on tem od

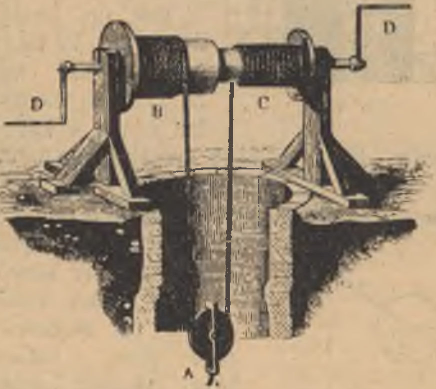

Fig. 64.

kołowrotu zwykłego, że wał składa się z dwóch części B i C, z których pierwsza jest grubsza od drugiej. Obydwa końce liny są przymocowane do wału, jeden w części B, drugi w — C, a lina jest nawinięta na te części w kierunkach odwrotnych, jak to wyraźnie widać na rysunku.

W pętlicy, utworzonej przez linę, mieści się blok A, — a na jego haku zawiesza się ciężar, który ma być podniesiony.

Gdy obracamy wał przy pomocy korby D we właściwym kierunku, to linka nawija się na część B i odwija z części C, ponieważ jednak pierwsza z tych części jest grubsza, przeto długość nawiniętej linki będzie zawsze nieco większa; stąd widać, że część linki, zwisająca pod wałem, skraca się, i blok A wraz z ciężarem zwolna wznosi się w górę.

Wypada zbadać, z jak siłą należy działać na korbę, aby podnieść dany ciężar; zastosujemy w tym celu zasadę pracy.

Przypuśćmy, że długość okręgu koła, które zatacza rękojeść korby, wynosi 2 m, zaś wał ma w części B 70, a w części C 60 cm w obwodzie. Gdy wał zrobi jeden obrót, to nawinie się 70, a odwinie 60 cm liny, a zatem jej część zwisająca skróci się o 10 cm. Skrócenie to rozkłada się jednakowo na obydwie pionowe części liny, zawarte pomiędzy wałem i blokiem, a zatem każda skróci się o 5 cm, i o tyle też ciężar zostanie uniesiony w górę. Jednocześnie ręka robotnika (przypuszczamy, że pracuje tylko jeden) przebiegnie 2 m czyli 200 cm; jest to droga 40 razy dłuższa od drogi, którą odbywa ciężar, a więc siła robotnika powinna być 40 razy mniejsza od podnoszonego ciężaru, aby nie było ani straty ani zysku na pracy.

Aby podnieść np. 400 kg trzeba działać na korbę z siłą 10 kg. Tak byłoby przynajmniej, gdyby nie przeszkadzało tarcie. Na przezwyciężenie tarcia będzie potrzeba jeszcze kilku kilogramów, a zatem wypadnie w rzeczywistości działać na korbę z siłą kilkunastu kg.

Kołowrót chiński pozwala małemi siłami przezwyciężać siły bardzo wielkie, i oczywiście skuteczność jego jest pod tym względem tem większa, im mniejsza jest różnica pomiędzy średnicami (lub obwodami) obydwóch części wału; za to, im mniejsza jest ta różnica, tem wolniej podnosi się ciężar. Gdyby średnice obydwóch części były jednakowe, to ciężar nie mógłby się wcale podnosić.

§ 65. **Blok różnicowy.** Duże podobieństwo do kołowrotu chińskiego posiada inna maszyna, zajmująca mniej miejsca i dogodniejsza w użyciu, a mianowicie tak zw. blok różnicowy, którego widok mamy na fig. 65. Działanie tej maszyny wyjaśnimy na fig. 66, która ją wyobraża w zarysach ogólnych.

Maszyna składa się z dwóch bloków; jeden z nich, górny, — oznaczono go literą A — jest osadzony w nieruchomej ramce, zawieszonej u sufitu, drugi, dolny, B dźwiga podnoszony ciężar P. Blok górny składa się z dwóch krążków, zrobionych z jednej sztuki surowca; jeden z nich (na rysunku zwrócony ku widzowi) posiada średnicę mniejszą, drugi — większą.

Bieg łańcucha widać jasno na fig. 66. Końce jego są połączone ze sobą, albo, krótko mówiąc, jest to łańcuch bez końca. Wyjdźmy z punktu F, w którym jest przyłożona siła poruszająca, w którym np. ujmuje łańcuch ręka robotnika.

Od tego punktu F łańcuch idzie w górę, przechodzi przez większy krążek górnego bloku, dalej idzie na dół i obiega blok dolny, znowu idzie w górę, przechodzi przez mniejszy krążek górnego bloku,

Fig. 65.

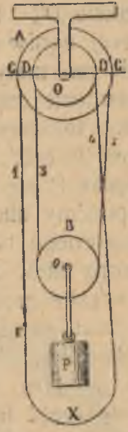

Fig. 66.

jeszcze raz na dół, aż do punktu F, z którego wyszliśmy. Cyfry 1, 2, 3 i 4 wskazują jasno przebieg łańcucha.

Przypuśćmy teraz, że robotnik ujął za łańcuch w punkcie F i ciągnie na dół; jeżeli wywiera on siłę dostateczną, to oczywiście blok górny zacznie się obracać w kierunku odwrotnym do ruchu wskazówki zegara. Aby zdać sobie sprawę z tego, co się dzieje z ciężarem P, zwrócimy szczególną uwagę na swobodnie zwisającą część łańcucha CXD′. Część ta się wydłuża, gdyż coraz nowe ogniwa schodzą z większego krążka w punkcie C, i jednocześnie się skraca, gdyż coraz nowe ogniwa wchodzą na mniejszy krążek w punkcie D′. Lecz oczywiście w pewnym czasie więcej ogniw zejdzie z większego krążka, niż wejdzie na mały, a więc wydłużenie przeważa, i w rezultacie część zwisająca się wydłuży. Stąd wynika, że część łańcucha, zawarta pomiędzy punktami D i C′, na której wisi blok B, się skróci, i ciężar P się podniesie.

Przypuśćmy dla przykładu, że obwód większego krążka górnego bloku ma 36 a mniejszego 30 cm. Gdy górny blok odbędzie jeden obrót, to z większego krążka zejdzie w punkcie C 36 cm łańcucha, i taką samą drogę przebiegnie podczas tego ręka robotnika. Zobaczmy, o ile wzniesie się ciężar P; w tym celu znajdziemy naprzód, o ile skróci się część łańcucha, dźwigająca blok B.

Podczas jednego obrotu górnego bloka z małego krążka w punkcie D zejdzie 30 cm łańcucha, a na duży krążek w punkcie C′ wejdzie 36 cm; zatem część łańcucha, o którą chodzi, skróci się o różnicę, czyli o 6 cm; oczywistą jest rzeczą, że ciężar P pójdzie w górę o połowę tej różnicy czyli o 3 cm.

Tak więc ręka robotnika przebiegła 36 cm, a ciężar 3 cm. Pierwsza z tych dróg jest 12 razy dłuższa od drugiej. Gdyby nie było tarcia, to praca, wykonana przez robotnika, byłaby równa pracy, wykonanej nad ciężarem P, do tego zaś siła robotnika powinna być 12 razy mniejsza od ciężaru P. Jeżeli np. podnoszony przedmiot waży 120 kg, to robotnik powinien ciągnąć z siłą 10 kg.

Siły tarcia, występujące w bloku różnicowym, są bardzo duże, a skutkiem tego do podniesienia ciężaru będzie potrzebna siła znacznie większa, jakie 20 kg lub więcej.

§ 66. **Koła zębate.** Często wypada w technice przenosić ruch obrotowy z jednej osi na inną oś równoległą. Służą do tego różne sposoby; o jednym z nich, a mianowicie o pasie bez końca, była mowa w § 51, o innym pomówimy teraz.

Na fig. 67 widzimy dwa koła A i B, osadzone na dwóch równoległych wałach; każde z kół po-

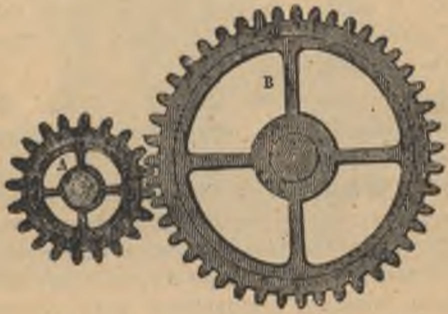

Fig. 67.

siada na obwodzie wystające zęby, które wchodzą w przerwy pomiędzy zębami drugiego koła. Gdy jedno z tych kół się obraca, to musi obracać się i drugie. W każdej chwili przynajmniej jeden ząb jednego koła pozostaje w zetknięciu z zębem drugiego; oczywiście obydwa takie zęby poruszają się z jednakową szybkością. Jeżeli, dajmy na to, 10 zębów koła A przechodzi w pewnym czasie przez linię, łączącą środki obydwóch kół, to również 10 zębów koła B musi przejść w tym samym czasie przez ową linię.

Przypuśćmy, że koło A posiada 20, a koło B 40 zębów. W ciągu jednego obrotu koła A 20 jego zębów przejdzie przez linię środków, a zatem tyleż zębów koła B musi w tymże czasie przejść przez tę samą linię, czyli, innemi słowy, koło B wykona pół obrotu. Aby koło B wykonało cały obrót, to koło A musi obrócić się dwa razy. Jeżeli koło B robi na minutę 30 obrotów, to koło A robi w tymże czasie 60 obrotów. Gdyby koło B miało trzy razy więcej zębów od koła A, to pierwsze robiłoby na minutę trzy razy mniej obrotów od drugiego.

Możemy powiedzieć krótko, że *ilości obrotów kół na minutę są odwrotnie proporcyonalne do ilości zębów.*

§ 67. **Winda.** Fig. 68 wyobraża bardzo użyteczną maszynę, a mianowicie windę ręczną. Służy ona do podnoszenia ciężarów, a szczególnie różnych materyałów budowlanych na budowie. Działanie maszyny wyjaśnimy przy pomocy fig. 69, na której wyrysowano jedynie części zasadnicze. Widzimy tam przedewszystkiem małe kółko zębate t, które można wprawiać w ruch przy pomocy korby i rękojeści M. Kółko t porusza duże koło T, na którego osi jest osadzony bęben C. Do bębna jest przymocowany jeden koniec linki, lub łańcucha; do drugiego końca przyczepia się podnoszony ciężar P.

W windzie, wyobrażonej na fig. 68, małe kółko jest osadzone nad dużem, a nie z boku, (jak na fig. 69); prócz tego oś małego kółka została

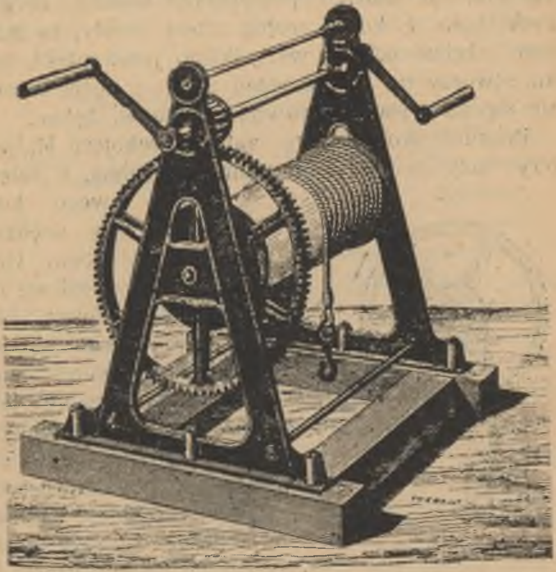

Fig. 68.

zaopatrzona w dwie rękojeście, aby dwóch robotników mogło pracować razem; szczegóły te jednak nie wpływają zasadniczo na działanie windy. Gdy robotnik działa na rękojeść z odpowiednią siłą F, to kółko t wprawia w ruch koło T w kierunku strzałki, lina nawija się na bęben C, i ciężar idzie do góry.

Przypuśćmy, dla przykładu, że duże koło posiada 88 zębów, a małe 22 zęby, i że korba M ma na długość 30 cm, a promień bębna wynosi 10 cm. Z danych powyższych wynika, że gdy małe koło i korba zrobią cztery obroty, to duże koło i bęben odbędą wszystkiego jeden obrót, linka utworzy na bębnie jeden zwój, i ciężar wzniesie się na wysokość równą obwodowi bębna.

Promień koła, które zatacza rękojeść M, jest trzy razy większy od promienia bębna, a zatem i obwód owego koła jest trzy razy większy od obwodu bębna. Gdy ciężar P wzniósł się na wysokość równą obwodowi bębna, to jednocześnie rękojeść obiegła cztery razy swe koło, a ponieważ obwód koła jest trzy razy dłuższy od obwodu bębna, zatem rękojeść odbyła drogę 12 razy dłuższą od drogi ciężaru.

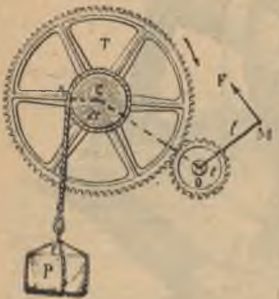

Fig. 69.

Stąd widać, że siła, z którą robotnik działa na rękojeść, powinna być 12 razy mniejsza od ciężaru P. Jeżeli np. ciężar P waży 120 kg, to robotnik powinien działać na rękojeść z siłą 10 kg. Tak przynajmniej byłoby, gdyby nie zachodziło tarcie pomiędzy zębami kół, w łożyskach wałów i w samej lince. W rzeczywistości robotnik ma nietylko podnosić ciężar P, ale i pokonywać siły tarcia, które zawsze przeciwdziałają ruchowi. Skutkiem tego siła, którą wywiera robotnik, powinna być większa od 10 kg. Wyniesie ona jakie 13 lub 14 kg.

§ 68. **Śruba.** Zasadę śruby uwidocznia w prosty sposób fig. 70. Widzimy tam śrubę, osadzoną na pionowej osi AB. Należy uważać, że śruba ta nie może się przesuwać wzdłuż osi, ani w górę, ani na dół, jakkolwiek łożyska, zapobiegające temu ruchowi, zostały opuszczone

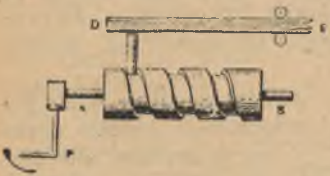

Fig. 70.

na rysunku; natomiast można nadać śrubie ruch obrotowy zapomocą rękojeści P. Widzimy dalej na fig. sztabę DE, która może się poruszać w górę i nadół; ruch ten otrzymuje sztaba za pośrednictwem wystającego czopa ktory wchodzi w nacięcia śruby. Gdy śruba się obraca, to gwint jej popycha przed sobą czop, i w czasie jednego obrotu sztaba odbędzie drogę równą odległości pomiędzy następującemi po sobie nacięciami, czyli równą krokowi śruby.

Przypuśćmy, że do sztaby DE jest przyczepiony ciężar, który mam podnieść przy pomocy opisanego urządzenia. Gdy obrócę raz korbę, to ręka moja obiegnie drogę, równą obwodowi koła, które zatacza rękojeść P, a jednocześnie ciężar wzniesie się na wysokość, równą krokowi śruby. Wynika stąd, że siła, z którą działam na korbę, powinna być tyle razy mniejsza od podnoszonego ciężaru, ile razy krok śruby jest mniejszy od obwodu owego koła.

Urządzenie to działałoby oczywiście zupełnie tak samo, gdyby sztaba DE była połączona nie z czopem lecz z mutrą, obejmującą śrubę i zaopatrzoną w gwint, wchodzący w nacięcia śruby.

Przy pomocy śruby można wywierać na dany przedmiot bardzo wielką siłę, działając z małą siłą na odpowiednią korbę lub dźwignię. Za przykład może służyć prasa introligatorska, wyobrażona na fig. 71.

Prasa składa się z dwóch mocnych ścian pionowych albo boków, połączonych dwiema poziomemi deskami, albo dnami, górnem i dolnem. Pomiędzy bokami może się przesuwać, lecz nie obracać, płyta B, połączona ze śrubą S; tym sposobem ruch obrotowy śruby jest również niemożliwy. Śruba posiada ruchomą mutrę N, którą można obracać przy pomocy drążka P. Książki, które mają być sprasowane, wkładają się pomiędzy płytę B i dno górne.

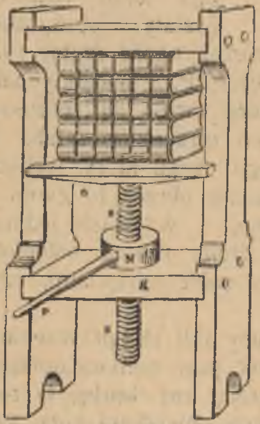

Fig. 71.

W położeniu, wyobrażonem na rysunku, mutra N oparła się o dolne dno K. Jeżeli teraz obracamy mutrę w odpowiednim kierunku, to usiłuje ona schodzić po śrubie na dół; ponieważ jednak ruchowi temu stoi na przeszkodzie dolne dno K, przeto śruba wraz z płytą B musi wznosić się do góry, ściskając książki.

Przypuśćmy dla przykładu, że krok śruby wynosi 1 cm, a obwód koła, które zatacza koniec drążka P, ma 2 m czyli 200 cm długości. W takim razie siła, z którą płyta B ciśnie na książki, będzie 200 razy większa od siły, którą wywieramy na drążek. Jeżeli np. działamy na drążek z siłą 25 kg, to płyta B ciśnie z siłą 5000 kg.

Trzeba jednak zauważyć, że i tutaj tarcie zmniejsza w znacznym stopniu skuteczność całego urządzenia. W przykładzie powyższym siła, działająca na książki, wyniesie w rzeczywistości nie 5000, lecz wszystkiego 3000, lub 4500 kg, a pragnąc wywrzeć istotnie siłę 5000 kg, należałoby działać na drążek z siłą 40 lub 50 kg.

ZAGADNIENIA.

1) Korba kołowrotu (fig. 62) jest 5 razy dłuższa od promienia wału, na który nawija się lina. Z jaką siłą należy działać na rękojeść korby, aby podnieść ciężar 85 kg?

Odp. 17 kg.

2) Na korbę kołowrotu (fig. 62) działa dwóch ludzi, każdy z siłą 9 kg. Jaką siłę wywiera linka na ciężar, jeżeli promień wału jest 4 razy mniejszy od długości korby?

Odp. 72 kg.

3) Wielokrążek (fig. 61) posiada z każdej strony po 4 bloki. Z jaką siłą trzeba działać na sznur, aby podnieść 1248 kg?

Odp 156 kg.

4) W kołowrocie chińskim (fig. 64) korba jest 3 razy dłuższa od promienia wału w części B, a promień części B jest dwa razy większy od promienia części C. Z jaką siłą należy działać na korbę, aby podnieść 180 kg?

Odp. 30 kg.

5) Koło A (fig. 67) ma 20 zębów, a koło B 45. Ile obrotów powinno odbyć pierwsze, aby drugie obróciło się 16 razy?

Odp. 36.

6) W windzie, wyobrażonej na fig. 68, korba jest trzy razy dłuższa od promienia bębna, a małe koło ma 7 razy mniej zębów niż duże. Podnoszony przedmiot waży 1050 kg, a windę wprawia w ruch dwóch robotników. Z jaką siłą powinien działać każdy?

Odp. 25 kg.

ROZDZIAŁ IX.

RUCH CIAŁA SPADAJĄCEGO.

§ 69. **Doświadczenia.** Wyda się to może niejednemu rzeczą dziwną, gdy powiemy, że ciała ciężkie i lekkie, spadając z jednakowej wysokości, dochodzą do ziemi w jednakowym czasie. Można jednak sprawdzić to w sposób bardzo prosty. Biorę w jedną rękę korek, a w drugą — kulę ołowianą, podnoszę obydwie ręce na jednakową wysokość i wypuszczam obydwa ciała jednocześnie; nie trudno będzie spostrzedz, że obydwa przedmioty, jednocześnie uderzą o podłogę.

Gdybym zamiast korka wziął piórko ptasie, to niewątpliwie doszłoby ono do podłogi znacznie później od kuli, ale przyczyna tego opóźnienia tkwi nie w zjawiskach ciążenia, lecz w oporze powietrza, które hamuje i opóźnia ruch pióra. Wprawdzie powietrze opóźnia i kulę, ale w stopniu znacznie mniejszym, gdyż powierzchnia pióra w stosunku do jego wagi jest bez porównania większa. Gdybyśmy usunęli ten wpływ powietrza, to kula i pióro doszłyby do ziemi w jednej i tej samej chwili. Można istotnie to sprawdzić, robiąc takie doświadczenia w przestrzeni, z której wypompowano powietrze.

Toż samo daje się okazać w sposób prostszy. Kładziemy płaskie piórko na jakiej dużej monecie (miedzianej dziesiątce lub rublu srebrnym) i trzymamy monetę poziomo piórkiem do góry. Gdy teraz wypuścimy monetę, to przekonamy się, że podczas całego spadania piórko pozostaje z nią w zetknięciu. Takie samo doświadczenie można robić z monetą i z kawałkiem papieru. W tem doświadczeniu moneta ochrania piórko lub papier przed opóźniającem działaniem powietrza, i dzięki temu obydwa ciała w tym samym czasie przechodzą jedną i tę samą drogę.

Opierając się na tego rodzaju doświadczeniach, możemy powiedzieć, że: *czas spadania ciała z pewnej wysokości na ziemię nie zależy ani od wagi ciała ani od materyałów, z których to ciało się składa.*

Istnieją wprawdzie od tego prawa pewne wyjątki lecz tylko pozorne. Do wyjątków takich należy np. balon, aeroplan, żywy wróbel i t. d. W tych razach powietrze wywiera siłę, która przezwycięża siłę ciężenia; gdyby nie było powietrza, to tak dobrze balon, jak i wróbel, spadałyby na ziemię równie szybko, jak kawał ołowiu. W dalszym ciągu nie będziemy się rachowali z oporem powietrza, a zjawiska spadania ciał będziemy rozważali w taki sposób, jak gdyby powietrze zostało całkowicie usunięte.

Weźmy jakiekolwiek ciało, podnieśmy je na jakąś znaczną wysokość i wypuśćmy z ręki, nie nadając mu żadnej początkowej szybkości. Ciało zacznie spadać pionowo na dół i w pewnym określonym czasie, np. w ciągu jednej sekundy, przejdzie pewną określoną drogę; długość tej drogi jest, jak wiemy, jednakowa dla wszystkich ciał. Taką samą drogę przejdzie w ciągu pierwszej sekundy spadania kamień, co i kula żelazna lub kawałek drzewa. Drogę tę zmierzono wiele razy z całą możliwą dokładnością i znaleziono, że jest ona nie zupełnie jednakowa w różnych okolicach kuli ziemskiej. Tak np. pod równikiem spadanie odbywa się nieco wolniej, niż w okolicach bieguna. W naszym kraju ciało przechodzi w ciągu pierwszej sekundy spadania 4,9 metra, czyli blizko 5 m. Aby ułatwić sobie rachunki, będziemy posługiwali się tą ostatnią liczbą; błąd, który przytem popełnimy, będzie nieznaczny.

§ 70. **Szybkość ciała spadającego.** W rozważaniach dotychczasowych przyjmowaliśmy, że ciało pozostawało w spoczynku przed rozpoczęciem spadania; opiszemy teraz doświadczenie, w którem warunek ten nie jest spełniony.

Wyobraźmy sobie klatkę windy schodowej, jakie spotykamy często w hotelach i wysokich domach mieszkalnych. Przypuśćmy, że klatka taka ma 5 m wysokości od podłogi do sufitu. Gdy klatka pozostaje w spokoju, to kamień w ciągu sekundy spadnie właśnie od sufitu klatki do jej podłogi. Zróbmy doświadczenie takie, gdy klatka jedzie w górę lub na dół, przyczem ruch jej jest jednostajny, a dojdziemy do bardzo interesującego wyniku. Znajdziemy, że czy klatka jedzie w górę czy na dół, czy szybkość jest duża czy mała (byleby była stała), to zawsze kamień spadający dojdzie od sufitu do podłogi dokładnie w ciągu sekundy.

Nad tem doświadczeniem warto jest zastanowić się gruntowniej. Przypuśćmy, że klatka jedzie na dół z szybkością 1 m na sekundę. Kamień spada od sufitu do podłogi w ciągu sekundy; oczywiście musi on w ciągu tego czasu przebiedz całą wysokość klatki, czyli 5 m, a do tego jeszcze drogę, którą podłoga przeszła w ciągu tegoż samego czasu, czyli 1 m. Razem więc kamień przejdzie $5+1=6$ m.

Wynik taki daje się łatwo wyjaśnić. Zanim kamień oderwał się od sufitu i zaczął spadać, to zjeżdżał on już razem z całą klatką na dół z szybkością 1 m na sekundę. Szybkość tę kamień zatrzymał i po oderwaniu od sufitu w czasie owej sekundy spadania, a jednocześnie działała nań siła ciążenia, wywierając swój zwykły skutek, t. j. ściągając kamień o 5 m niżej. Tak więc dzięki początkowej szybkości kamień przebiegł 1 m, a prócz tego dzięki sile ciążenia jeszcze 5 m, czyli razem 6 m.

Przypuśćmy teraz, że klatka jedzie w górę z szykością jednego metra. Kamień, spadając od sufitu, przebiegnie w ciągu sekundy mniej od wysokości klatki, gdyż podłoga idzie mu na spotkanie i w ciągu sekundy zbliży się o 1 m. Tak więc droga kamienia wyniesie wszystkiego $5 - 1 = 4$ m. Wyjaśnimy to sobie łatwo, mając na uwadze, że kamień w chwili odrywania się od sufitu jechał razem z klatką w górę, t. j. posiadał szybkość, skierowaną do góry. Gdyby siła ciążenia nie działała, to kamień w ciągu następnej sekundy wzniósłby się o 1 m w górę. Lecz w rzeczywistości siła ciążenia działa w ciągu owej sekundy i wywiera zwykły skutek, t. j. ściąga kamień o 5 m ku dołowi. Możemy powiedzieć, że kamień jednocześnie przebiega 1 m w górę i 5 m na dół, czyli koniec końców przebiega 4 m na dół.

Należy dobrze utrwalić sobie w pamięci twierdzenie, do którego doszliśmy w rozważaniach poprzedzających. Gdy ciało spada, to w każdym razie siła ciążenia ściągnie je w ciągu sekundy o 5 m niżej bez względu na to, czy w początku owej sekundy pozostawało ono w spokoju, czy w ruchu.

Przy pomocy odpowiednich doświadczeń można sprawdzić, że ciało, które rozpoczęło spadanie od stanu spoczynku, przebiega w dwie sekundy 20 m; lecz droga, odbyta w ciągu pierwszej sekundy, wynosi, jak wiemy, 5 m, a zatem w ciągu drugiej sekundy ciało przechodzi 20 — 5 = 15 m, czyli trzy razy więcej niż w ciągu pierwszej. Jak mamy to sobie tłomaczyć?

W początku pierwszej sekundy spadania ciało było w spokoju, lecz w początku drugiej było już ono w ruchu, a mianowicie posiadało szybkość, nabytą w ciągu pierwszej. Możemy teraz obliczyć, jaka to jest ta szybkość nabyta, czyli z jaką szybkością ciało rozpoczyna drugą sekundę spadania.

W ciągu drugiej sekundy, tak jak i w ciągu pierwszej, na ciało działa siła ciążenia, i pod jej działaniem ciało schodzi o 5 m niżej, bo, jak widzieliśmy, siła ta wywiera zawsze taki skutek. Wszystkiego ciało przebiegło w ciągu drugiej sekundy 15 m; z tego tylko 5 m można przypisać działaniu siły ciążenia, a więc reszta, czyli 10 m, jest następstwem szybkości, którą ciało nabyło w ciągu pierwszej sekundy i posiadało w początku drugiej.

Doszliśmy do bardzo ważnego wyniku, że siła ciążenia nadaje ciału w ciągu sekundy spadania szybkość 10 m na sekundę. Gdyby z końcem pierwszej sekundy siła ciążenia przestała działać, to ciało poruszałoby się dalej jednostajnie z szybkością 10 m na sekundę. W rzeczywistości siła ciążenia działa w dalszym ciągu, skutkiem czego droga przebyta w ciągu drugiej sekundy wzrośnie o 5 m, czyli wyniesie razem 15 m.

Może się wydać nieprawdopodobnem, aby szybkość w końcu pierwszej sekundy (lub początku drugiej) wynosiła aż 10 m na sek., gdy w ciągu tej sekundy ciało przebiegło wszystkiego 5 m, ale chwila zastanowienia przekona, że tak być musi. Ciało przebiegłoby w ciągu pierwszej sekundy 10 m, gdyby szybkość jego przez cały ten czas była taka, jak w samym końcu. Ale tak nie jest. Ciało wyrusza ze stanu spoczynku i biegnie z początku wolno, a potem coraz prędzej. Skutkiem tego przebiegnie ono np. w ciągu pierwszej połowy sekundy daleko krótszą drogę niż w ciągu drugiej połowy, a droga odbyta przez całą sekundę musi być mniejsza od 10 m.

Wypada teraz zastanowić się nad tem, jaką drogę przebiegnie ciało w ciągu trzeciej sekundy spadania. Byłoby niełatwo wyznaczyć tę drogę zapomocą doświadczenia bezpośredniego, ale doprowadzi nas do prawdy proste rozumowanie, oparte na twierdzeniach poprzedzających. Przedewszystkiem potrzeba znaleźć, jaką szybkość nabywa ciało w ciągu dwóch pierwszych sekund spadania, bo z taką właśnie szybkością rozpoczyna ono sekundę trzecią.

Dajmy na to, że klatka windy, z którą mieliśmy przed chwilą do czynienia, zjeżdża na dół, przyczem ruch jej jest jednostajny, i szybkość wynosi 10 m na sekundę. Kamień, który oderwał się od sufitu klatki, dojdzie do jej podłogi, jak wiemy, w ciągusekundy. *Względem klatki* w chwili uderzenia o podłogę będzie on posiadał szybkość 10 m na sekundę. Lecz sama klatka zjeżdża z szybkością 10, a więc kamień posiadał w początku szybkość 10 i w ciągu spadania nabył nowe 10; stądwynika, że z końcem sekundy szybkość jego wynosiła $10+10=20$ m na sekundę.

Ciało, spadające swobodnie, posiada z końcem pierwszej sekundy szybkość 10, t. j. taką samą, jak kamień z poprzedzającego przykładu w chwili oderwania się od sufitu klatki, a zatem, podobnie jak ów kamień, nabędzie ono w ciągu następnej sekundy nowe 10 i rozpocznie trzecią sekundę spadania z szybkością 20 m na sekundę. Dzięki tej szybkości ciało przebiegnie w ciągu trzeciej sekundy 20 m, a prócz tego jeszcze, jak zwykle, 5 m skutkiem działania siły ciążenia, wszystkiego $20+5=25$ m.

W ciągu trzeciej sekundy szybkość ciała znowu wzrośnie o 10, wyniesie zatem na początku czwartej sekundy 30. Dzięki temu ciało przejdzie w ciągu czwartej sekundy 30 m i jeszcze 5 m skutkiem działania siły ciążenia, czyli razem 35 m.

Streśćmy wyniki tych wszystkich rozważań.

Szybkość wynosi w końcu

1-ej	sekundy	$10\times1=10$	m	na	sekundę
2-ej	„	$10\times2=20$	„	„	„
3-ej	„	$10\times3=30$	„	„	„
4-ej	„	$10\times4=40$	„	„	„

i t d.

Jeżeli ciało rozpoczęło spadanie od stanu spoczynku, to szybkość jego otrzymamy, mnożąc 10 przez liczbę sekund spadania.

Można również wypowiedzieć krótką regułę co do drogi, odbytej w pewnym czasie.

Widzieliśmy, że ciało przebiega w ciągu pierwszej sekundy spadania 5 m, w ciągu drugiej 15, czyli 5×3, w ciągu trzeciej 25, czyli 5×5 i t. d. Zestawiając te wyniki, otrzymamy tabelkę następującą.

Droga odbyta w ciągu

1-ej	sekundy	$5 \times 1 = 5$ m
2-ej	„	$5 \times 3 = 15$ „
3-ej	„	$5 \times 5 = 25$ „
4-ej	„	$5 \times 7 = 35$ „

i t. d.

Z tabelki tej widać, w jaki sposób można wyznaczyć drogę, odbytą w ciągu którejkolwiek sekundy następnej. Tak np. znajdziemy drogę, odbytą w ciągu 6-ej sekundy, mnożąc 5 przez szóstą od początku liczbę nieparzystą, t. j. przez 11. Wypadnie zatem $5 \times 11 = 55$ m.

Posługując się tabelką powyższą, możemy wyznaczyć drogę, odbytą w dowolnym czasie. Tak więc w dwie sekundy ciało przebiegnie $5 + 15 = 20$ m. Możemy tę liczbę napisać tak 5×4, albo 5×2^2, gdzie 2^2 oznacza 2×2 i czyta się «dwa w kwadracie.» W trzy sekundy ciało przebiegnie $5 + 15 + 25 = 45$, czyli 5×9, lub wreszcie 5×3^2 i t. d. Zestawiając te rezultaty, otrzymamy tabelkę następującą:

Droga odbyta w ciągu

1-ej	sekundy	$5 \times 1^2 = 5 \times 1 = 5$ m
2-ch	sekund	$5 \times 2^2 = 5 \times 4 = 20$ „
3-ch	„	$5 \times 3^2 = 5 \times 9 = 45$ „
4-ch	„	$5 \times 4^2 = 5 \times 16 = 80$ „

i t. d.

Jeżeli ciało rozpoczęło spadanie od stanu spoczynku, to wyznaczymy odbytą drogę, mnożąc 5 przez kwadrat liczby sekund spadania.

§ 71. **Wpływ szybkości początkowej.** Dotychczas rozważaliśmy spadanie kamienia, lub innego ciała, wypuszczonego swobodnie z ręki lecz nie rzuconego; ale i w wypadku, gdy kamień został rzucony w kierunku pionowym, można bez trudności wyrachować drogę, odbytą w pewnym określonym czasie, a także szybkość, zyskaną w tym czasie. Rzucając kamień, poruszamy z pewną szybkością rękę i zawarty w niej kamień; z taką właśnie szybkością kamień wyrusza w dalszą drogę, gdy go wyswobodzimy. Rzucić kamień, znaczy udzielić mu pewnej początkowej szybkości.

Dajmy na to, że kamień został rzucony pionowo na dół z szybkością 3 m na sekundę. Gdyby nie działała siła ciążenia, to kamień przebiegłby w ciągu pierwszej sekundy 3 m, lecz obok tego ciążenie wywiera zwykły skutek, a mianowicie ściąga kamień o 5 m niżej, razem więc kamień przebiegnie $3+5=8$ m

Początkowa szybkość kamienia wynosiła 3 m na sekundę, w ciągu sekundy nabył on, jak wiemy, szybkość 10, a zatem w początku drugiej sekundy szybkość jego będzie równa $3+10=13$ m na sekundę. Dzięki tej szybkości przebiegnie on w ciągu drugiej sekundy 13 m, a prócz tego pod działaniem siły ciążenia jeszcze 5 m, czyli razem $13+5=18$ m.

Z rachunków tych wynika, że w dwie sekundy kamień przejdzie $8+18=26$ m.

Do tego samego wyniku moglibyśmy dojść nieco krótszą drogą. Gdyby kamień nie otrzymał szybkości początkowej, to przebiegłby, jak wiadomo, $5 \times 2^2 = 20$ m; lecz miał on początkową szybkość 3, a więc przejdzie jeszcze prócz tego $3 \times 2 = 6$ m. Czyni to razem $20 + 6 = 26$ m, czyli to samo co poprzednio.

Tak samo znajdziemy, że w ciągu trzech sekund kamień przebiegnie $5 \times 3^2 = 45$ i prócz tego $3 \times 3 = 9$ m, co czyni razem $45 + 9 = 54$ m i t. d.

Weźmy inny przykład. Dajmy na to, że kamień został rzucony pionowo *w górę* z szybkością 12 m na sekundę; pragniemy wyznaczyć, jak wysoko znajdzie się on po upływie dwóch sekund.

Gdyby nie działała siła ciążenia, to w ciągu dwóch sekund kamień wzniósłby się o $12 \times 2 = 24$ m w górę. Lecz siła ciążenia wywiera zawsze jednakowy skutek, i dzięki jej działaniu kamień spadnie jednocześnie o $5 \times 2^2 = 20$ m niżej, a zatem znajdzie się na wysokości $24 - 20 = 4$ m.

§ 72. **Spadanie po linii nie pionowej.** Dotychczas była mowa jedynie o ruchu ciała, spadającego po linii pionowej; rozważymy teraz parę wypadków, w których ruch ciała spadającego odbywa się inaczej.

Przypuśćmy, że z punktu A na maszcie statku parowego (fig. 72) wypuszczono swobodnie kamień. Jeżeli wysokość punktu A ponad pokładem wynosi 5 m, i statek stoi nieruchomo, to kamień będzie spadał po linii pionowej i po upływie sekundy spadnie na punkt B u podnóża masztu.

Zróbmy takie same doświadczenie podczas jazdy, przyczem jednak ruch statku powinien być jednostajny. Przekonamy się, że i w tym razie kamień po upływie sekundy spadnie na ten sam punkt pokładu B. Pasażer, przypatrujący się tym doświadczeniom z pokładu, nie dostrzeże żadnej różnicy w ruchach kamienia. Dla niego kamień w każdym razie spada wzdłuż masztu bez względu na to, czy statek stoi czy płynie z szybkością stałą. Dla tego też podczas jazdy można na pokładzie statku lub w kajucie równie dobrze grać w piłkę, jak na lądzie stałym.

Fig. 72.

Zupełnie inne wrażenie będzie miał człowiek, obserwujący *z brzegu* ruch kamienia w doświadczeniu drugiem. Zobaczy on, że kamień spada nie po linii pionowej, lecz obiega linię krzywą AM, i oczywiście tak być musi. Zanim kamień dojdzie do podnoża masztu, to już maszt skutkiem ruchu statku zajmie położenie MN, a zatem kamień przebiegnie nie od A do B, lecz od A do M.

W chwili, gdy kamień zaczynał spadać, poruszał się on już w kierunku poziomym wraz z całym statkiem, innemi słowy posiadał szybkość poziomą równą szybkości statku. Gdyby siła ciążenia nie działała, to kamień biegłby dalej w kierunku poziomym i w ciągu sekundy doszedłby do punktu N. Lecz siła ciążenia nie przestaje działać, a zatem kamień musi spadać podczas owej sekundy. Można powiedzieć, że kamień biegnie w kierunku poziomym dzięki szybkości początkowej i jednocześnie spada w kierunku pionowym pod wpływem ciążenia.

Z rysunku widać, że punkt M leży o 5 m niżej od punktu N albo od punktu A, a więc i tutaj ciążenie wywarło zwykły swój skutek, a mianowicie ściągnęło ciało w ciągu sekundy o 5 m niżej.

Z tego wszystkiego wynika, że ciało, rzucone w kierunku poziomym, spada tak samo, jak ciało, wypuszczone swobodnie z ręki. Po upływie sekundy znajdzie się ono o 5 m niżej od punktu wyjścia, po upływie dwóch sekund o $5 \times 2^2 = 20$ m niżej i t. d. aż do upadku na ziemię.

§ 73. **Ruch pocisku.** Wiemy już teraz, jaki wpływ wywiera siła ciążenia na ruch ciała, rzuconego w kierunku pionowym lub poziomym. W każdym z tych wypadków siła ta ściąga ciało o 5 m niżej podczas pierwszej sekundy, o 5×2^2 w ciągu dwuch sekund i t. d. Każdemu nasunie się teraz domysł, że taki sam będzie skutek ciążenia, gdy rzucimy ciało w jakimkolwiek innym kierunku. Domysł ten stwierdzono rozmaitymi sposobami, i niema najmniejszej wątpliwości, że jest on całkowicie słuszny.

Przypuśćmy dla przykładu, że kula karabinowa została wystrzelona z punktu O (fig. 73) w kierunku OP_1. Gdyby nie było ciążenia, to ruch tej kuli byłby jednostajny, a mianowicie biegłaby

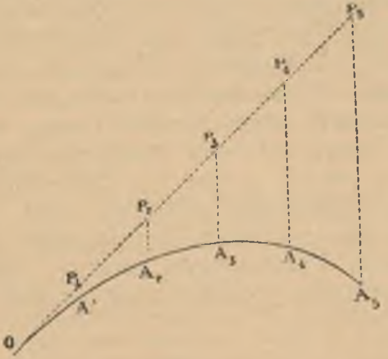

Fig. 73.

ona wciąż z szybkością, którą otrzymała w chwili wystrzału, w jednym i tym samym kierunku. Tak np. po upływie pierwszej sekundy znalazłaby się ona w P_1, po dwóch sekundach w P_2, po trzech sekundach w P_3 i t. d., przyczem drogi OP_1, P_1P_2, P_2P_3 i t. d. są równe. Chodzi teraz o to, jak w rzeczywistości porusza się kula. Zasada, którą tylko co poznaliśmy, da na to pytanie odpowiedź.

Tak więc w ciągu pierwszej sekundy siła ciążenia ściągnie kulę o 5 m na dół, a zatem w końcu pierwszej sekundy kula znajdzie się nie w P_1 lecz o 5 m niżej, t. j. w punkcie A_1, położonym pionowo pod punktem P_1. W ciągu dwóch sekund pod działaniem ciążenia kula spada o $5 \times 2^2 = 20$ m, a więc znajdzie się nie w punkcie P_2, lecz pionowo pod nim w A_2, tak że $P_2 A_2 = 20$ m. Po upływie trzech sekund kula dojdzie do punktu A_3, położonego pionowo pod P_3, a odległość $P_3 A_3 = 5 \times 3^2 = 45$ m i t. d. Widać stąd, że drogą kuli będzie linia krzywa $O A_1 A_2 A_3 \ldots$ Matematycy nazywają taką linię *parabolą*. O kształcie jej każdy ma wyobrażenie, bo każdy widział strumień wody, wytryskujący z sikawki lub węża gumowego do polewania ulic. Można uważać, że taki strumień składa się z oddzielnych kropelek wody, a każda kropla jest pociskiem, wyrzuconym z pewną szybkością, i zataczającym parabolę. Stąd wynika, że strumień posiada kształt paraboli.

ZAGADNIENIA.

1) Aby wyznaczyć głębokość studni wrzucono w nią kamień i zmierzono na sekundniku, że kamień po 4 sekundach uderzył o wodę. Jaka była głębokość studni?
Odp. 80 m.

2) Balon leci na wysokości 405 m. Po ilu sekundach dojdzie do ziemi ciężki przedmiot, wyrzucony z balonu?
Odp. Dzieląc 405 przez 5, otrzymamy liczbę sekund w kwadracie i znajdziemy łatwo, że ta liczba $= 9$.

3) Po jakim czasie spadnie na ziemię kula ołowiana, wyrzucona z balonu na wysokości 845 m?
Odp. Po 13 sek.

4) Z łódki balonu, wznoszącego się w górę z szybkością 8 m na sekundę, wypadł ciężki przedmiot i spadł

na ziemię po upływie 10 sek. Na jakiej wysokości był balon w chwili, gdy przedmiot wypadał?

Odp. 420 m.

5) Kula wybiegła ze strzelby pionowo w górę z szybkością 40 m na sek. Jak wysoko wzniesie się kula i po jakim czasie spadnie na ziemię?

Odp. Kula będzie się wznosiła dopóty, dopóki nie wyczerpie się jej szybkość, a szybkość zmniejsza się co sekundę o 10. Stąd widać, że wnoszenie trwa 4 sek.; teraz już łatwo znajdziemy, że kula dojdzie do wysokości 80 m. i spadnie po 8 sek. od chwili wystrzału.

6) Ciało spadło z wysokości 45 m; z jaką szybkością doszło ono do ziemi?

Odp. 30 m na sek.

7) Ze szczytu 80-metrowej wieży wyrzucono kamień w kierunku poziomym z szybkością 23 m na sekundę; w jakiej odległości od podnoża wieży kamień spadnie na ziemię?

Odp. 92 m.

8) Z dachu domu wysokości 20 m chłopiec rzucił kamieniem w kierunku poziomym i trafił w przechodnia w odległości 45 m od domu. Wyznaczyć początkową szybkość kamienia.

Odp. $22\frac{1}{2}$ m.

ROZDZIAŁ X.

SIŁA i MASA.

§ 74. **Masa.** Wyraz kilogram jest używany w dwóch różnych znaczeniach; dwuznaczność ta nie pociąga za sobą niedogodności w mowie potocznej, ale w nauce mechaniki może być źródłem ważnych nieporozumień. Niekiedy wyraz kilogram oznacza pewną ilość materyi, w innych razach oznacza pewną siłę. Mówimy np. «pięć kilogramów żelaza», aby dać wyobrażenie, ile żelaza zawiera pewien przedmiot żelazny, w innych razach mówimy, «ten przedmiot waży pięć kg», wyrażając przez to, że na ów przedmiot działa siła ciążenia pięciu kilogramów.

Aby uniknąć nieporozumień, będziemy mówili w pierwszym wypadku: «*masa* tego kawałka żelaza (lub wogóle jakiegoś ciała) wynosi pięć kilogramów», w drugim zaś wypadku będziemy wskazywali wyraźnie, że chodzi o siłę, działającą na masę.

Następująca prosta uwaga wykaże dobitnie, jak niezbędną jest rzeczą odróżniać masę ciała, czyli ilość materyi w niem zawartej, od ciężaru, czyli siły ciążenia, na nie działającej. Masa pewnego kawałka żelaza pozostaje zawsze jedna i ta sama, gdziekolwiek ten kawałek się znajdzie, gdy tymczasem działająca nań siła ciążenia zależy nietylko od niego, ale i od kuli ziemskiej, której przyciąganie właśnie siłę ową stanowi. Wiadomo też (§ 69), że ciężar ciała podlega pewnym drobnym zmianom, gdy przenosimy je z jednej miejscowości do innej.

Tak więc masa ciała i jego ciężar, czyli siła ciążenia nań działająca, są to dwie rzeczy różne, ale tak przywykliśmy mierzyć masę ciężarem, że różnica pomiędzy temi pojęciami stała się dla wielu niewyraźną.

Rozważania dalsze oprzemy na zasadzie dla każdego oczywistej: w jednej i tej samej miejscowości na jednakowe masy działają jednakowe siły ciążenia, innemi słowy, *jednakowe masy posiadają jednakowe ciężary.*

§ 75. **Działanie siły na masę.** Weźmy *masę* jednego kilograma i pozwólmy jej swobodnie spadać. Na masę tę działa *siła* jednego kilograma, wytwarzając co sekundę szybkość 10 (metrów na sekundę). Wogóle siła 1 kg, działając na masę 1 kg, nadaje jej co sekundę szybkość 10. Sprawa ta jest już dla nas zupełnie jasna, ale wypada teraz roztrząsnąć inną kwestyę.

Na gładkiej poziomej płaszczyźnie, np. na gładkim lodzie, leży masa, dajmy na to, 5 kg. Gdybyśmy przyłożyli do niej siłę, wynoszącą 5 kg, to masa owa poruszałaby się zupełnie tak samo, jak podczas spadania, tj. szybkość jej wzrastałaby co sekundę o 10. W rzeczywistości przyrost ten byłby nieco mniejszy skutkiem tarcia, które zawsze istnieje, jakkolwiek na lodzie jest bardzo małe, oraz skutkiem oporu powietrza. Pominiemy jednak te wpływy uboczne, aby nie utrudniać sprawy.

Weźmy teraz inny wypadek. Przypuśćmy, że ta sama masa 5 kg leży na tej samej płaszczyźnie poziomej, lecz działa na nią siła pozioma nie 5 kg lecz 1 kg. Masa owa i teraz zacznie się poruszać, i teraz szybkość jej będzie co sekundę otrzymywała pewien przyrost, ale zachodzi pytanie, jaki będzie ten przyrost?

Z góry można przewidzieć, że działanie siły 1 kg będzie 5 razy słabsze, niż działanie siły 5 kg; skoro zatem ta druga siła zwiększa szybkość ciała, co sekundę o 10, to pierwsza wywoła wzrost szybkości pięć razy mniejszy czyli równy 2. Doświadczenie całkowicie wynik ten potwierdza.

Możemy teraz łatwo wyrachować, jaką np. szybkość będzie nadawała na sekundę siła 6 kg, działająca na masę 2 kg. Gdyby na tę masę działała siła 2 kg, to nadawała by jej na sekundę szybkość 10; siła 1 kg nada szybkość dwa razy mniejszą, czyli 5, a siła 6 kg — szybkość 6 razy większą czyli $5 \times 6 = 30$ m na sekundę.

Z rachunku tego widać, że *aby wyznaczyć szybkość w metrach na sekundę, którą pewna siła nadaje na sekundę pewnej masie, trzeba podzielić 10 przez liczbę, wyrażającą masę, i to, co wypadnie, pomnożyć przez liczbę, wyrażającą siłę,* krócej mówiąc, owa szybkość jest odwrotnie proporcyonalna do masy i wprost proporcyonalna do siły.

Zastanowimy się teraz, jaką drogę przebiegnie w ciągu pewnego czasu ciało o danej masie, jeżeli ruszyło ono pod działaniem danej siły ze stanu spoczynku. Powróćmy w tym celu do jednego z przykładów poprzedzających. Na płaszczyźnie poziomej leży ciało o masie 5 kg, i w pewnej chwili zaczyna nań działać siła 1 kg. Gdyby ta siła była równa 5 kg, to ruch ciała byłby zupełnie taki sam, jak podczas spadania, a zatem przeszłoby ono podczas pierwszej sekundy 5 m; w danym razie siła jest 5 razy mniejsza, a więc można oczekiwać, że i droga odbyta będzie 5 razy mniejsza, czyli że ciało przebiegnie podczas pierwszej sekundy wszystkiego 1 m, i doświadczenie całkowicie domysł ten potwierdza.

Tak więc siła 1 kg, działając na masę 5 kg w ciągu jednej sekundy, przesuwa tę masę w swym kierunku o 1 m. Łatwo teraz będzie wyrachować, jaką drogę przejdzie owo ciało pod działaniem tejże siły w ciągu drugiej sekundy, trzeciej sekundy i t. d.

Wiemy, że masa 5 kg pod działaniem siły 1 kg nabywa co sekundę szybkość 2 m na sekundę, a zatem w początku drugiej sekundy szybkość wyniesie 2. Gdyby siła w ciągu drugiej sekundy nie działała, to ciało przebiegłoby w ciągu tego czasu 2 m, lecz siła działa w dalszym ciągu, dzięki czemu ciało przejdzie jeszcze 1 metr, a zatem cała droga, odbyta w ciągu drugiej sekundy wyniesie $2+1=3$ m. W ciągu drugiej sekundy szybkość wzrośnie o 2, a zatem w początku trzeciej będzie równa 4; dzięki tej szybkości ciało przebiegnie w ciągu trzeciej sekundy 4 m, a skutkiem działania siły jeszcze 1 m, czyli razem $4+1=5$ m. Tak samo znajdziemy, że w ciągu czwartej sekundy ciało przebiegnie 7 m, w ciągu piątej 9 m i t. d. Zestawiając te wyniki, otrzymamy tabelkę następującą.

Droga odbyta w ciągu

1-ej	sekundy	wynosi	1 m
2-ej	„	„	3 „
3-ej	„	„	5 „
4-ej	„	„	7 „
5-ej	„	„	9 „

i t. d.

Na podstawie tej tabelki można już łatwo ułożyć inną, dotyczącą drogi, którą ciało przejdzie w ciągu jednej sekundy, dwóch sekund, trzech sekund i t. d.

Droga odbyta w ciągu

1-ej	sekundy	jest	równa	1 m
2-ch	sekund	„	„	4 „
3-ch	„	„	„	9 „
4-ch	„	„	„	16 „
5-ciu	„	„	„	25 „

i t. d.

Weźmy drugi z wyżej podanych przykładów. Masa ciała wynosi 2 kg, a siła 6 kg. Gdyby na to ciało działała siła 2 kg, to w ciągu pierwszej sekundy przeszłoby ono 5 m, jeżeli zaś siła wynosi 1 kg, to droga będzie dwa razy mniejsza, czyli równa $\frac{5}{2}$, a przy sile 6 kg ciało przejdzie 6 razy większą drogę, t. j. $\frac{5}{2} \times 6 = \frac{30}{2} = 15$ m.

Biorąc pod uwagę, że ciało to, jak widzieliśmy poprzednio, nabywa co sekundę szybkość 30, znajdziemy łatwo, że w ciągu drugiej sekundy przejdzie ono 45 m, w ciągu trzeciej 75, w ciągu czwartej 105 i t. d. Z tego wynika, że ciało to przebiegnie w dwie sekundy $15 + 45 = 60$ m, w trzy sekundy $60 + 75 = 135$, w cztery sekundy $135 + 105 = 240$ i t. d.

Podamy teraz prawidło, przy pomocy którego można prędko wyznaczyć drogę, odbytą w pewnym czasie pod działaniem siły, jeżeli wyruszyło ono ze stanu spoczynku. W tym celu *należy pomnożyć 5 przez liczbę wyrażającą siłę, to, co wypadnie, pomnożyć raz jeszcze przez liczbę sekund w kwadracie i wreszcie to, co wypadnie, podzielić przez liczbę, wyrażającą masę ciała.* Tak np. masa 5 kg pod działaniem siły 1 kg przebiegnie w ciągu 5 sekund $\frac{5 \times 1 \times 5^2}{5} = \frac{5 \times 1 \times 25}{5} = 25$ m. Tak samo znajdziemy, że masa 2 kg pod działaniem siły 6 kg przebiegnie w 4 sekundy $\frac{5 \times 6 \times 4^2}{2} = 240$ m. Wyniki te, jak widzimy, są zgodne z poprzedzającymi.

Podług tego samego prawidła można wyznaczyć również drogę, odbytą w pewnym czasie przez ciało spadające. Dajmy na to np., że ciało, którego masa wynosi 3 kg, zaczęło spadać ze stanu spoczynku; wyznaczymy drogę, odbytą w ciągu 4 sekund. Ponieważ w tym razie na ciało działa siła ciążenia równa 3 kg, przeto szukana droga wyniesie $\frac{5 \times 3 \times 4^2}{3}$; łatwo widzieć, że to jest równe $5 \times 4^2 = 80$. Dla tego też w § 70 podaliśmy krótsze prawidło do wyznaczania drogi ciała spadającego: jeżeli ciało rozpoczęło spadanie od stanu spoczynku, to wyznaczymy odbytą drogę, *mnożąc 5 przez kwadrat liczby sekund spadania.* Z ostatniego rachunku wynika, że obydwa prawidła są w zgodzie.

Wyniki, do których doszliśmy w § niniejszym, są tak ważne, że warto jest bliżej poznać doświadczenia, które je pozwalają sprawdzić.

§ 76. **Doświadczenia z równią pochyłą.** Do celu, który wskazaliśmy w końcu § poprzedzającego, bywa niekiedy używana równia pochyła, urządzona w taki sposób, aby nachylenie jej można było zmieniać dowolnie; potrzebny jest prócz tego wózek, osadzony na kółkach, odrobionych bardzo dokładnie, aby tarcie pomiędzy kółkami i osiami było niedostrzegalne. Gdy wózek taki zjeżdża z równi, to możemy uważać, że siły tarcia wcale nań nie działają.

Ustawiamy równię pod takim kątem do poziomu, aby, dajmy na to, wysokość była 10 razy mniejsza od długości, a wózek obciążamy tak, aby masa jego (wraz z ładunkiem) była równa np 5 kg, a zatem działa nań w kierunku pionowym siła ciążenia, wynosząca 5 kg. Gdy postawimy wózek na równi, to, jak wiemy z § 45, ta siła ciążenia rozłoży się na dwie składowe, z których jedna, prostopadła do równi, równoważy się z reakcyą tejże, a druga, równoległa do równi, wprawi wózek w ruch; ta druga jest 10 razy mniejsza od 5 kg, gdyż wysokość równi jest tyle razy mniejsza od długości, a zatem gdy wózek zjeżdża na dół, to mamy masę 5 kg, poruszającą się pod działaniem siły 5 : 10 czyli $^1/_2$ kg.

Według prawidła, które poznaliśmy w § poprzedzającym, wózek, ruszając ze stanu spoczynku, powinien przebiedz w ciągu sekundy $\frac{5 \times {}^1/_2 \times 1^2}{5} = \frac{1}{2}$ m, w ciągu dwóch sekund $\frac{5 \times {}^1/_2 \times 2^2}{5} = 2$ m, i t. d.

Mierząc drogi, które w rzeczywistości przebiega wózek w różnych czasach, znajdziemy, że istotnie przejdzie on $^1/_2$ m w ciągu sekundy, 2 m w dwie sekundy i t. d. Zgodność ta wskazuje, że wspomniane prawidło jest słuszne.

W doświadczeniu tem można wprowadzać rozmaite zmiany. Tak np. możemy zmienić nachylenie równi do poziomu, skutkiem czego zmieni się siła, działająca na masę 5 kg, można również zmienić obciążenie wózka, czyli masę, poruszającą się pod działaniem siły. Przy wszystkich tych zmianach, mierząc drogę, którą przebiega wózek w ciągu pewnego czasu, stwierdzimy zgodność podanego prawidła z doświadczeniem.

§ 77. **Maszyna Atwooda.** Wyniki, do których doprowadziły rozważania nasze w § 75, dają się sprawdzić ze szczególną dokładnością przy pomocy przyrządu, zwanego maszyną Atwooda. Urządzenie tego przyrządu w ogólnych zarysach jest następujące.

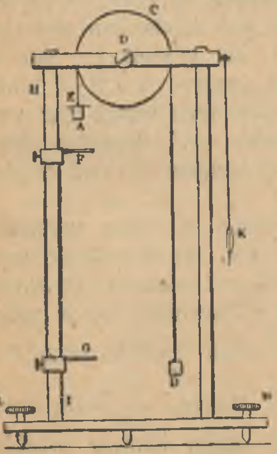

Fig. 74.

Okrągła tarcza C (fig. 74) może się obracać około osi D. Dzięki szczególnemu urządzeniu łożysk, którego opisywać nie będziemy, siły tarcia, hamujące ten ruch obrotowy, są bardzo małe i nie wywierają na działanie przyrządu dostrzegalnego wpływu. Na tarczę jest zarzucony bardzo wiotki sznur jedwabny, na którego końcach wiszą ciężary A i B. Słupki boczne, podtrzymujące tarczę, są zaopatrzone w odpowiednie skale; na tych skalach można odczytać drogi, które przebiegają ciężary w pewnym czasie.

Jeżeli ciężary A i B są jednakowe, to oczywiście pomiędzy działającemi na nie siłami ciążenia zachodzi równowaga, i wszystko pozostaje w spokoju, dopóki jakaś przyczyna spokoju tego nie zakłóci.

Dajmy na to, że każdy z ciężarów A i B posiada masę 140 gramów. Nałóżmy teraz na ciężar A mały krążek mosiężny E, ważący 20 gr. Skutkiem tego równowaga zostaje zachwiana, ciężarek A z krążkiem E zacznie schodzić na dół, a ciężar B będzie się wznosił do góry. Oczywiście ruch ten odbywa się pod działaniem siły ciążenia 20 gr, działającej na krążek E; siła ta wprawia w ruch obydwa ciężary A i B a także krążek E. Całkowita masa tych trzech ciał wynosi $140+140+20=300$ gr. Możemy więc uważać, że masa 300 gr porusza się pod działaniem siły 20 gr. *)

Możemy teraz zastosować do tego wypadku prawidło, podane w § 75. Stosownie do tego prawidła, ciężar A w ciągu sekundy powinien zejść na dół (lub ciążar B wznieść się w górę) o $\frac{5\times20\times1^2}{300}=1/3$ m, w ciągu dwóch sekund o $\frac{5\times20\times2^2}{300}=1\,1/3$ m i t. d. Mierząc na skali, urządzonej na słupku, drogę, którą istotnie przebie-

*) W rzeczywistości siła 20 gr wprawia prócz tego jeszcze w ruch tarczę C, i okoliczność tę należałoby uwzględnić w rachunku. Uważamy tutaj, że masa (właściwie moment bezwładności) tarczy jest bardzo mała i pomijamy ją, aby nie gmatwać sprawy.

gnie jeden z ciężarów w ciągu jednej sekundy, dwóch sekund i t. d., znajdziemy znowu, że doświadczenie jest w zgodzie z rachunkami powyższymi, co stwierdza słuszność wspomnianego prawidła.

W § 75 poznaliśmy prócz tego prawidło wyznaczania szybkości, którą pewna siła nadaje na sekundę pewnej masie. Przy pomocy maszyny Atwooda i to prawidło daje się łatwo sprawdzić. W tym celu do lewego słupka jest przymocowany śrubą pierścień poziomy F. Na rysunku pierścień ten widać z boku, skutkiem czego wygląda on jak płytka. Średnica pierścienia jest większa od średnicy ciężaru A, lecz mniejsza od średnicy dodatkowego ciężarka E. Dzięki takiemu urządzeniu, gdy ciężar A wraz z ciężarkiem E, schodząc na dół, dojdą do pierścienia E, to pierwszy z nich przejdzie swobodnie, a drugi zostanie zatrzymany.

Pierścień F można przesuwać wzdłuż słupka i osadzać w rozmaitych położeniach.

Dajmy na to, że każdy z ciężarów A i B posiada masę 190 gr, a ciężarek dodatkowy E masę 20 gr. W tym razie siła 20 gr wprawia w ruch masę $190 + 190 + 20 = 400$ gr. Stosownie do prawidła, podanego w § 75, ta masa powinna zyskać w ciągu sekundy szybkość $\frac{10 \times 20}{400} = \frac{1}{2}$ m na sekundę. Mamy teraz sprawdzić, czy tak się dzieje w rzeczywistości.

Po upływie pewnego czasu od chwili, gdy ciężary zostały wprawione w ruch, ciężarek E dojdzie do pierścienia F; czas ten można zmierzyć, rachując wahania wahadła K. Możemy ustawić pierścień F w takiem położeniu, aby ciężarek E doszedł doń dokładnie po upływie sekundy od początku ruchu.

Na pierścieniu F zatrzyma się tylko ciężarek E, zaś ciężar A przejdzie przez pierścień i podąży dalej. W chwili, gdy ciężarek E zatrzyma się na pierścieniu, przestaje działać owa siła 20 gr, która poprzednio wprawiała w ruch ciężary A i B, a zatem te ostatnie poruszają się w dalszym ciągu tak, jak gdyby żadne siły na nie nie działały; ruch ich jest jednostajny i odbywa się z taką szybkością, jaką miały w chwili, gdy ciężarek E dochodził do pierścienia, czyli z szybkością, którą siła 20 gr nadała w ciągu sekundy masie 400 gr. Szybkość ta daje się łatwo zmierzyć.

Do celu tego służy podstawka G, którą, podobnie jak pierścień F, można osadzać na lewym słupku w położeniu dowolnem. Rachując wahania wahadła K, zmierzymy czas, który upłynął od chwili, gdy ciężarek E spoczął na pierścieniu, do chwili, gdy ciężar A doszedł do podstawki G, a odległość podstawki od pierścienia odczytamy na skali lewego słupka. Znając drogę odbytą i czas, wyrachujemy już łatwo szybkość, jaką miał w tym czasie ciężar A. Wypadnie zgodnie z rachunkiem poprzedzającym, że szybkość ta wynosiła $^1/_2$ m na sekundę.

Można tak ustawić pierścień F, aby ciężarek E doszedł doń po dwóch sekundach od początku ruchu; znajdziemy wówczas, że szybkość nabyta w ciągu tego czasu, wynosi 1 m na sek.; w ciągu trzech sekund ciężary nabędą szybkość $1^1/_2$ it.d.

Wszystko to jest w zgodzie z prawidłem, które poznaliśmy w § 75.

§ 78. **Wpływ szybkości początkowej.** Uważaliśmy dotychczas, że ciało było w spokoju w chwili, gdy zaczęła nań działać siła, i wiemy już, jak wyznaczyć drogę, odbytą w pewnym czasie, poczynając właśnie od tej chwili. Zobaczymy teraz, jak stoi sprawa w tych wypadkach, w których warunek powyższy nie jest spełniony.

Dajmy na to, że masa 10 kg posiada w pewnej chwili szybkość 3 m na sek. i pozostaje pod działaniem siły 2 kg, przyczem siła ta działa właśnie w tym kierunku, w którym biegnie masa lub, mówiąc inaczej, siła działa w kierunku szybkości ciała.

Tę szybkość 3 m na sek. mogła ciału nadać poprzednio ta sama siła, działając przez czas odpowiedni; mogło być i tak, że na ciało dotychczas żadne siły nie działały, przeto ruch jego był jednostajny i odbywał się z szybkością 3 m na sek., a dopiero teraz zaczęła działać siła 2 kg. Dla rachunków dalszych jest to rzecz obojętna; dość, że w pewnej chwili masa 10 kg posiadała szybkość 3 i podlegała działaniu siły 2 kg. Pragniemy wyznaczyć drogę, którą ciało odbędzie w ciągu, dajmy na to, sześciu sekund najbliższych.

Gdyby na ciało żadna siła nie działała, to biegłoby ono dalej ze stałą szybkością 3, a zatem w ciągu 6-ciu sekund przeszłoby $3 \times 6 = 18$ m. Gdyby natomiast ciało wyruszyło w drogę ze stanu spoczynku, to pod działaniem siły 2 kg przeszłoby w ciągu tego samego czasu $\frac{5 \times 2 \times 6^2}{10} = 36$ m.

Lecz w rzeczywistości ciało posiadało początkową szybkość i podlega podczas dalszego biegu działaniu siły, a zatem przejdzie razem $18 + 36 = 54$ m.

Rozwiążemy także bez trudności zadanie takie: ciało o masie 2 kg posiadało w pewnej chwili szybkość 5 m na sekundę, a o sekundę później — szybkość 40; wiadomo, że w ciągu tej sekundy na ciało działała stała siła, skierowana zgodnie z szybkością ciała. Pragniemy wyznaczyć tę siłę.

Gdyby na to samo ciało działała w ciągu sekundy siła 1 kg, to przyrost szybkości byłby równy $\frac{10 \times 1}{2} = 5$; w rzeczywistości przyrost szybkości wyniósł $40 - 5 = 35$ czyli 7 razy więcej, a zatem i siła musiała być 7 razy większa, była więc równa 7 kg.

Przypuśćmy teraz, że na ciało, które biegło w pewnym kierunku, zaczęła działać siła w jakimś innym kierunku. Wypadki podobne spotykaliśmy już poprzednio, a mianowicie w § 72 i 73, w których rozważaliśmy ruch ciała, rzuconego w kierunku nie pionowym. Widzieliśmy wówczas, że ciało takie obiega linię krzywą. Tak dzieje się zawsze, jeżeli tylko na ciało działa siła w kierunku odmiennym od kierunku ruchu. Gdyby w pewnej chwili siła przestała działać, to ciało podążyłoby natychmiast dalej po linii prostej, stanowiącej jakby przedłużenie owej krzywej, czyli *stycznej* do niej. Ten ruch dalszy byłby jednostajny, a szybkość byłaby taka, jaką miało ciało w chwili, w której siła przestała działać.

Jeżeli znana jest szybkość ciała w pewnej chwili, a także siła, działająca na ciało od tej chwili, to można wyrachować, jaki będzie dalszy ruch ciała; można również wyznaczyć siłę, którą należałoby przyłożyć do danego ciała, posiadającego pewną szybkość, aby ciało to poruszało się w dalszym ciągu w pewien określony sposób; są to jednak już kwestje zawilsze i przekraczające zakres niniejszego dziełka. Rozważymy tylko w ogólnych zarysach ruch ciała na okręgu koła, gdyż z tego rodzaju ruchem szczególnie często miewamy do czynienia.

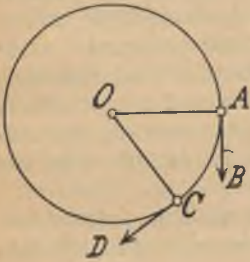

Fig. 75.

Wyobraźmy sobie, że na zupełnie gładkiej płaszczyźnie poziomej w punkcie A (fig. 75) leży jakieś ciało. Moglibyśmy mu nadać pewną **szybkość** zapomocą **uderzenia**, skierowanego np. według prostej A B. Ciało pobiegłoby po prostej A B, i ruch jego byłby jednostajny.

Zmieńmy teraz doświadczenie w sposób następujący. Przywiążmy naprzód ciało sznurkiem do kołka, wbitego w płaszczyznę w punkcie O. Przypuśćmy, że gdy ciało leży w punkcie A, to sznur jest już zupełnie wyciągnięty. Możemy i teraz nadać ciału szybkość zapomocą uderzenia. Wymierzmy to uderzenie w kierunku A B prostopadle do O A.

Ciało dąży i teraz w kierunku A B, ale trwa to tylko chwilę. Musi ono zboczyć z linii A B, gdyż inaczej oddalałoby się od punktu O, na co nie pozwala sznur. Ciało nie może oddalać się od punktu O, ale z drugiej strony niema przyczyny, dla której by miało się doń zbliżać, a stąd widać, że będzie ono się trzymać w stałej odległości od O, t. j. będzie biegło po okręgu koła, którego środek leży w O.

Możemy powiedzieć, że ciało w każdej chwili usiłuje biedz dalej po linii prostej, a mianowicie po stycznej do koła. Tak np. gdy ciało znalazło się w punkcie C, to biegnie ono w tej chwili w kierunku CD i usiłuje biedz dalej po prostej CD. Ale sznur działa na ciało z pewną siłą, skierowaną zawsze do środka; dzięki działaniu tej siły kierunek ruchu (albo kierunek szybkości) zmienia się co moment, i ciało pozostaje na kole. Gdyby sznur się zerwał np. w chwili, gdy ciało znalazło się w C, to owa siła przestałaby działać, i ciało poszłoby istotnie dalej po prostej CD.

Siła, z którą sznur działa na ciało, równa naprężeniu sznura, nazywa się *siłą dośrodkową*. Siła dośrodkowa działa wciąż prostopadle do kierunku ruchu ciała, albo do kierunku szybkości. Tak np. w chwili, gdy ciało znalazło się w C, dąży ono w kierunku CD, a siła dośrodkowa działa w prostopadłym kierunku CO. Skutkiem tego siła ta zmienia tylko ustawicznie kierunek ruchu ciała (czyli kierunek szybkości) ale nie zmienia szybkości, z jaką ciało krąży po kole. Jeżeli np. nadaliśmy ciału szybkość początkową 2 m na sekundę, to będzie ono ustawicznie z taką szybkością obiegało swą drogę, jeżeli tylko, jakieś inne siły, np. tarcie lub opór powietrza, szybkości tej nie zmniejszą.

Wielkość siły dośrodkowej może oczywiście zależeć tylko od trzech okoliczności a mianowicie: 1) od masy ciała, 2) od długości sznura czyli od promienia obieganego koła i 3) od szybkości, którą nadaliśmy ciału. Nie wdając się w długie rozważania, powiemy krótko, w jakim stopniu każda z tych trzech okoliczności wpływa na siłę dośrodkową.

Przedewszystkiem siła dośrodkowa jest wprost proporcyonalna do masy ciała. Gdybyśmy zamiast ciała danego wzięli do doświadczenia ciało o masie dwa razy większej, pozostawiając bez zmiany długość sznura i szybkość, to siła dośrodkowa stałaby się dwa razy większa. Było to do przewidzenia. Działanie siły dośrodkowej polega na ustawicznem zwracaniu kierunku ruchu ciała, lecz oczywiście tem trudniej jest zmienić kierunek ruchu, im masa ciała jest większa.

Powtóre siła dośrodkowa jest odwrotnie proporcyonalna do długości sznura, czyli do promienia zataczanego koła. Gdybyśmy dane ciało uwiązali do sznura dwa razy dłuższego, i nadali mu taką samą szybkość, jak poprzednio, to siła dośrodkowa stałaby się dwa razy mniejsza. Gdybyśmy wzięli sznur trzy razy dłuższy, to siła dośrodkowa zmniejszyłaby się trzy razy.

I ta zależność była do przewidzenia. Można wyobrazić sobie, że koło powstało skutkiem odpowiedniego skrzywienia linii prostej. Im większy jest promień koła, tem słabsze było owo skrzywienie, i tem mniej okręg koła różni się od linii prostej. Lecz im mniej linia kołowa różni się od liniii prostej, tem łatwiej jest utrzymać na kole ciało, które samo przez się usiłuje biedz dalej po linii prostej, i tem mniejszej potrzeba siły dośrodkowej.

Pozostaje jeszcze wyjaśnić zależność siły dośrodkowej od szybkości ciała. Zrozumiałą jest rzeczą, że tem trudniej jest zmienić kierunek biegu ciała, im większa jest jego szybkość; istotnie też ze wzrostem szybkości wzrasta siła dośrodkowa i wzrasta naprężenie sznura, ale zależność jest w tym razie nie tak prosta. Siła dośrodkowa jest proporcyonalna do kwadratu szybkości. Jeżeli szybkość się podwoi, to siła dośrodkowa stanie się cztery razy większa, jeżeli szybkość się potroi, to siła wzrośnie dziewięć razy i t. d.

Należy zapamiętać, że na masę 1 kilograma, obiegającą koło o promieniu 1 m z szybkością 1 metra na sekundę, działa siła dośrodkowa, wynosząca $^1/_{10}$ kilograma. Wiedząc to, możemy już bez trudności wyznaczyć siłę dośrodkową w każdym wypadku.

Przypuśćmy dla przykładu, że ciało, którego masa wynosi 5 kg, obiega koło o promieniu 3 m z szybkością 6 m na sekundę. Aby wyznaczyć siłę dośrodkową należy $^1/_{10}$ pomnożyć przez 5, to, co wypadnie, podzielić przez 3, i wreszcie to, co wypadnie pomnożyć przez 6^2, a więc siła dośrodkowa jest równa $\frac{5 \times 6^2}{10 \times 3} = 6$ kg.

ZAGADNIENIA.

1) Wózek zjeżdża na dół z płaszczyzny pochyłej, ktorej wysokość wynosi $^1/_{20}$ część długości; jaką szybkość osiągnie wózek w ciągu sekundy?

Odp. $^1/_2$ m na sek.

2) Jaką drogę przebiegnie wózek (zag. poprzedzające) w ciągu 6 sekund?

Odp. 9 m.

3) Jaką szybkość nada siła 1 kg masie 20 kg w ciągu 3 sekund?

Odp. $1^1/_2$ m na sek.

4) Mamy dwie masy; pewna siła mogłaby udzielić pierwszej z nich w ciągu sekundy szybkość dwa razy większą niż drugiej. Która masa jest większa i ile razy?

Odp. Druga masa jest dwa razy większa.

5) Wiotka linka jest przerzucona przez blok, który może obracać się bez tarcia. Na jednym końcu linki wisi ciężar 5 kg, a na drugim 4 kg. Jaką drogę przebiegnie każdy ciężar w ciągu 6 sekund od chwili, w której ruch się rozpocznie?

Odp. 20 m.

6) Jaką szybkość osiągną ciężary (zag. popoızedzające) w końcu szóstej sekundy?

Odp. $6^2/_3$ m na sek.

7) Na masę 5 kg, biegnącą z szybkością 3 m na sekundę, zaczyna w pewnej chwili działać siła 2 kg w kierunku ruchu. Jaką szybkość osiągnie ciało po upływie 4 sek. od owej chwili?

Odp. 19.

8) Jaką drogę przebiegnie ta masa (zag. poprzedzające), w ciągu owych 4 sek.?

Odp. 44 m.

9) Ciało, ważące 10 kg i biegnące w linii prostej, powiększyło w ciągu sekundy swą szybkość z 3 na

11 m na sek. pod działaniem pewnej siły, skierowanej zgodnie z szybkością ciała. Wyznaczyć tę siłę.

Odp. 8 kg.

10) Na ciało, ważące 6 kg i pozostające w spokoju, zaczyna działać siła 9 kg pionowo w górę. Na jaką wysokość wzniesie się ciało w ciągu 4 sek.?

Odp. 6 kg równoważy się z siłą ciążenia, a zatem na masę 6 kg działa siła 3 kg. Szukana wysokość wynosi 40 m.

11) Siła wznoszenia balonu wynosi 410 kg, a ciężar jego wraz z łódką 400 kg. Na jaką wysokość wzbije się balon w ciągu minuty.

Odp. 450 m.

12) Ciało, ważące 4 kg, obiega koło o promieniu 20 m z szybkością 5 m na sek. Wyznaczyć siłę dośrodkową.

Odp. $^1/_2$ kg.

13) Wagon kolejowy, ważący 8 tonn, biegnie z szybkością 36 kilometrów na godzinę na łuku, którego promień jest równy 400 m. Jaką siłę muszą wywierać szyny zewnętrzne na koła wagonu?

Odp. W tym razie potrzebną siłę dośrodkową wywierają szyny zewnętrzne. Siła ta wynosi 200 kg.

SPIS RZECZY.

Rozdział I. Wstępne wiadomości o ruchu.

Rozdział II. Wstępne wiadomości o sile.

Rozdział III. Zasada dźwigni.

Rozdział IV. Równoległobok sił.

Rozdział V. Ciążenie.

Rozdział VI. Tarcie.

Rozdział VII. Praca i energia.

Rozdział VIII. Maszyny proste.

Rozdział IX. Ruch ciała spadającego.

Rozdział X. Siła i masa.

UWAGA: Figura 70 (na str. 123), wyobrażająca śrubę, została przez pomyłkę odbita w niewłaściwem położeniu. Oś śruby AB powinna stać pionowo z rękojeścią P u góry.

151-

N

Spółki Wyda

Bronisław Chlebowski. **Pisma** (z portretem autora) . . . . Cena rb. 5.—

Tom I. **Studja historyczno krytyczne** z zakresu dziejów literatury, oświaty i sztuki polskiej.

Tom II. **Studja nad literaturą polską wieku XVI** (Rej — Kochanowski).

R. P. Porter. **Niebezpieczeństwo przedsiębiorstw miejskich** (tłómaczenie z angielskiego) . . . „ kop. — 80

Wydawnictwa Wydziału Kółek Rolniczych
CENTRALNEGO TOWARZYSTWA ROLNICZEGO:

A. Piątkowski. **Żywienie krów mlecz nyc**

Ks. I. **w C**

J. Radw **prz**

St. Jani

A. Wie **plo**

A. Piąt

J. Puru

Skład Główny w księgarni E. WENDEGO i S-ki (T. Hiża i A. Turkuła). Warszawa, Krak.-Przedm. № 9.

Druk. „ZORZA", Warszawa, Warecka 12.