BIBLIOTEKA PRZEMYSŁOWA.

MECHANIKA DOŚWIADCZALNA

WYKŁAD

Roberta S. Balla,

astronoma królewskiego, dawnego profesora matematyki stosowanej i mechaniki w irlandzkiem kolegium naukowem.

Z DRUGIEGO WYDANIA ANGIELSKIEGO PRZEŁOŻYŁ

Stanisław Kramsztyk.

Ze stu przeszło rysunkami.

Cena rs. 1.

WARSZAWA
NAKŁADEM HIPOLITA WAWELBERGA
1893

Skład główny w księgarni Gebethnera i Wolffa.

BIBLIOTEKA PRZEMYSŁOWA.

Mechanika

DOŚWIADCZALNA.

WYKŁAD

ROBERTA S. BALLA

astronoma królewskiego, dawnego profesora matematyki stosowanej i mechaniki w irlandzkiem kolegium naukowem.

Z DRUGIEGO WYDANIA ANGIELSKIEGO PRZEŁOŻYŁ

Stanisław Kramsztyk.

ze stu przeszło rysunkami.

WARSZAWA
DRUK JANA COTTY
29 Senatorska 29

1884

Дозволено Цензурою.
Варшава, 1 Іюля 1894 года.

SPIS RZECZY.

WYKŁAD I.

Skład sił.

str.

Wstęp. — Określenie siły. — Mierzenie siły. — Równowaga dwu sił. — Równowaga trzech sił. — Siła mniejsza może niekiedy równoważyć dwie większe siły 7

WYKŁAD II.

Rozkład sił.

Wstęp. — Rozkład jednej siły na dwie siły. — Dowody doświadczalne. — Żeglowanie. — Rozkład jednej siły na trzy siły nieprzypadające na tej samej płaszczyźnie . 26

WYKŁAD III.

Siły równoległe.

Wstęp. — Ciśnienie belki obciążonej na jej podpory. — Równowaga pręta opartego na nożu. — Skład sił równoległych. — Siły równoległe działające w kierunkach przeciwnych. — Para sił. — Waga 48

WYKŁAD IV.

Siła ciężkości.

Wstęp. — Ciężar właściwy. — Libela. — Środek ciężkości. — Równowaga stała i niestała. — Własność środka ciężkości w kole wirującem 67

WYKŁAD V.

Siła tarcia.

str.

Natura tarcia. — Metoda doświadczeń, — Tarcie jest proporcyonalne do ciśnienia. — Ściślejsze wyrażenie tego prawa. — Spółczynnik zmienia się wraz z użytemi ciężarami. — Kąt tarcia. — Drugie prawo tarcia. — Uwagi ogólne 86

WYKŁAD VI.

Blok.

Wstęp. — Tarcie sznura o pręt żelazny. — Pożytek bloka. — Blok wielki i mały. — Prawo tarcia w bloku.—Koła.— Energia 111

WYKŁAD VII.

Blok złożony.

Wstęp. — Blok ruchomy pojedyńczy. — Blok złożony z trzech krążków. — Blok różnicowy. — Blok epicykloidalny . 127

WYKŁAD VIII.

Drążek czyli dźwignia.

Drążek pierwszego rodzaju. — Drążek drugiego rodzaju. — Nożyce. — Drążek trzeciego rodzaju 151

WYKŁAD IX.

Równia pochyła i szruba.

Równia pochyła bez tarcia. — Równia pochyła z tarciem. — Szruba. — Zastosowanie szruby do prasy. — Szruba do spajania 165

WYKŁAD X.

Kołowrót.

Wstęp. — Doświadczenia z kołowrotem. — Tarcie na oś. — Kołowrót na wale. — Kołowrót z trybem zębatym. — Kran czyli żóraw. — Uwagi ogólne 186

WYKŁAD XI.

Własności mechaniczne drzewa budulcowego.

str.

Wstęp. — Ogólne własności drzewa budulcowego. — Opór przeciw rozciąganiu. — Opór przeciw ściskaniu. — Zachowanie się belki wyprężonej przez siłę poprzeczną. 210

WYKŁAD XII.

Wytrzymałość belki.

Belka swobodna na końcach a obciążona w środku. — Belka jednostajnie obciążona. — Belka obciążona w środku, gdy końce jej są przytwierdzone. — Belka oparta na jednym a obciążona na drugim końcu 232

WYKŁAD XIII.

Zasady budowy mostów.

Wstęp. — Ciężar utrzymywany przez zawieszenie i podporę. — Most o dwu podporach. — Most o czterech podporach. — Most o dwu zawieszeniach. — Prosta forma mostu kratowego 250

WYKŁAD XIV.

Mechanika mostu.

Wstęp. — Belki żelazne. — Most rurowy. — Most wiszący . 268

WYKŁAD XV.

Bieg ciała spadającego.

Wstęp. — Pierwsze prawo ruchu. — Doświadczenie Galileusza na wieży Pizańskiej. — Droga jest proporcyonalna do kwadratu z czasu. — Ciało przebiega 5 m. w ciągu pierwszej sekundy. — Działanie ciężkości jest niezależne od ruchu ciała. — Jak się oznacza siła ciężkości. — Drogą pocisku jest parabola 283

WYKŁAD XVI.

Bezwładność.

str.

Bezwładność. — Młot. — Gromadzenie energii. — Koło rozpędowe. — Maszyna do przebijania metali 305

WYKŁAD XVII.

Ruch obrotowy.

Natura ruchu obrotowego. — Ruch obrotowy w cieczach. — Zastosowania ruchu obrotowego. — Osie trwałe . . 326

WYKŁAD XVIII.

Wahadło proste.

Wstęp. — Wahadło kołowe. — Zależność trwania wachnięcia od długości. — Oznaczenie siły ciężkości za pomocą wahadła. — Cykloida 345

WYKŁAD XIX.

Wahadło złożone i składanie drgań.

Wahadło złożone. — Środek wachnięć. — Środek uderzenia. — Wahadło stożkowe. — Składanie drgań . . . 362

WYKŁAD XX.

Zasady mechaniczne zegara.

Wstęp. — Wahadło kompensacyjne. — Wychwyt. — Układ kół. — Skazówki. — Mechanizm bijący godziny . . . 385

DODATEK.

Metoda konstrukcyi graficznej. — Metoda najmniejszych kwadratów 409

PRZEDMOWA TŁOMACZA

„*Mechanika doświadczalna*" profesora Balla złożyła się z odczytów, które autor w r. 1870 prowadził w kolegium naukowem w Dublinie (Royal college of science). Były to odczyty wieczorne, przeznaczone dla słuchaczy, posiadających początkową jedynie znajomość matematyki, dla rzemieślników głównie; książka wszakże niemniej użyteczną być może i dla czytelników, którzy przeszli zwykły kurs mechaniki szkolnej, zobaczą bowiem, jak znane im prawa, z rozważań teoretycznych wysnute, dają się też wyprowadzić drogą czysto doświadczalną, a zarazem nauczą się, jak oderwane zasady naukowe stosują się do potrzeb praktycznych.

Gdyby czytelnicy, nieznający najprostszych zasad mechanicznych, napotykali pewną w książce tej trudność, tłomacz pozwala sobie wskazać im, jako odpowiednie przygotowanie, swoje „Wiadomości początkowe z fizyki" (część I, wydanie drugie, 1887), gdzie użytą jest taż sama metoda wykładu, w sposób wszakże prostszy i bardziej elementarny.

Przyrządy, któremi się posługuje profesor Ball w wykładach swoich, są pomysłu profesora Willisa z Cambridge i opisane przezeń zostały w dziele „*System of Apparatus for the use of Lecturers and Experimenters in Mechanical Philosophy*" (1851). Mają one te zaletę, że dają się składać z części prostych, jak belek, prętów, podpórek i szrub, które po rozłożeniu nadają się znów do budowy innych maszyn i aparatów.

W oryginale użyte są miary angielskie, które na nieszczęście nie dały się w przekładzie zastąpić wszędzie miarami metrycznemi; rezultaty bowiem liczebne, z doświadczeń otrzymywane, wiążą się ściśle z wymiarami przyrządów i z wielkością użytych ciężarów. Nie sprowadza to wszakże zawikłania, gdy liczby otrzymane stanowią tylko przykłady służące do wydobycia praw ogólnych. — W drugiej wszakże części, począwszy od wykładu XVI, która obejmuje dynamikę i gdzie mamy już do czynienia z natężeniem siły ciężkości, z wielkością zatem w naturze istniejącą, tłomacz zastąpił miary angielskie metrycznemi, jako wyłącznie już używanemi w nauce poza granicami Anglii.

Niejednolitość zresztą miar, w książce wprowadzonych, usprawiedliwić możemy tem jeszcze, że w technice u nas istnieje obecnie jakby okres przejściowy, używa się bowiem stóp i funtów obok metrów i kilogramów; zapoznanie się przeto z jedną i drugą kategoryą jednostek przedstawiać może istotną dla czytelnika korzyść.

Pamiętać tylko należy, że funt angielski (=453,592645 grama) jest większy, aniżeli funt obecnie u nas obowiązujący (=409,51156 grama) i poprzednio używany funt warszawski (=405,504 grama). Co się zaś tyczy miar długości, to żadna zgoła nie nastręcza się trudność, stopa bowiem u nas obecnie obowiązująca jestto właśnie stopa angielska (*foot* = 0,304797 metra = 30,4797 centymetra); poprzednia stopa warszawska jest krótsza, =0,288 metra czyli 288 milimetrów dokładnie. Stosunki te wystarczą do zamiany miar jednych na drugie.

WYKŁAD I.

S k ł a d s i ł.

Wstęp. — Określenie siły. — Mierzenie siły. — Równowaga dwu sił. — Równowaga trzech sił. — Siła mniejsza może niekiedy równoważyć dwie większe siły.

WSTĘP.

W tym ciągu wykładów zamierzam wyjaśnić zasadnicze prawa mechaniki za pomocą doświadczeń. Dla zrozumienia przedmiotu w ten sposób traktowanego wystarczy wam znajomość matematyki, ograniczająca się do początków algebry, oraz do niewielu terminów i zasad geometryi. Ale i dla tych nawet, co posiadają rozleglejsze wiadomości matematyczne i przy ich pomocy zdobyli naukę mechaniki, wyjaśnienia doświadczalne mogą być również użyteczne. Gdy bowiem naocznie przekonają się o rzetelności wywodów, z któremi oswojeni są teoretycznie, nabrać będą o nich mogli pojęć jaśniejszych, a może i nowe odsłonią się im poglądy. Nadto, niejedna zasada mechaniczna, która właściwie przechodzi już zakres książek elementarnych, przedmiotowi temu poświęconych, daje się przedstawić doświadczalnie, a słuszność tej uwagi okaże się w niejednym z następnych wykładów.

Nieraz też objaśnienia nasze czerpać będziemy z objawów zupełnie powszednich; drogą tą chciałbym was przekonać, że mechanika nie jest nauką w książkach wyłącznie istniejącą, ale jest badaniem zasad, bezustannie dokoła nas działających. Własne nasze ciało, nasze domy, nasze wozy, narzędzia wszystkie i przyrządy, które w codziennym mamy użytku — wszystkie w ogólności przedmioty, naturalne i sztuczne, służyć mogą jako wyjaśnienie zasad mechanicznych. Powinniście się nazwyczaić do starannego rozpatrywania wszelkich urządzeń mechanicznych, które się oczom waszym nastręczają. Zbadaj działanie żórawia podnoszącego ciężary, albo statku przesuwającego się przez szluzę kanału. Zastanów się, w jaki sposób jest dach zrobiony, lub jak to się dzieje, że most utrzymywać może swoje obciążenie. Nawet wrota dobrze zbudowane, ze swemi czopami i zawiasami, dają nam wyborne przykłady stosowania zasad mechanicznych do robót ciesielskich. Korzystaj ze sposobności rozpatrzenia części zegara, maszyny do szycia, lub też zamku i klucza; gdy zwiedzisz tartak, wyprobuj działanie wszystkich maszyn, które tam zobaczysz; staraj się sam oswoić z zasadami przyrządów, które napotkać można w każdym warsztacie. Drogą tą zdobyć można rozległy obszar wiedzy zajmującej i pożytecznej.

Określenie siły.

2. Przedewszystkiem potrzeba nam znać odpowiedź na pytanie: — co to jest siła? Ci, co się mechaniki nie uczyli, odpowiedzą zapewne, że uderzenie jest siłą, maszyna parowa jest siłą, koń, który ciągnie wóz, jest siłą, ciężkość jest siłą, ruch jest siłą i t. d. Według należytego wszakże określenia siłą jest to, *co dąży do wywołania lub do zniszczenia ruchu.* Dokładnie tego prawdopodobnie zrozumieć nie możecie, bez bliższych wyjaśnień, które w dalszym ciągu podane będą; w każdym jednak razie, wszelkie inne pojęcie siły winniście z umysłu swego usunąć. Ilekroć użyję wyrazu „siła,” przypomnijcie sobie wyrazy: „to, co dąży do wywołania lub zniszczenia ruchu,” a spodziewam się, że zanim wykład obecny ukończę, zrozumiecie, jak wybornie określenie to podaje, czem rzeczywiście jest siła.

3. Jeżeli do tego drobnego ciężaru przywiązana jest nitka, pociągając nią, posuwać mogę ciężar po stole. W tym razie tedy przenosi się coś od mojej ręki wzdłuż nitki do ciężaru, wskutek czego ciężar się porusza, a to właśnie, co się tak przenosi, jest siłą.

Mogę również wprawiać w ruch ciężar, popychając go prętem, a w tym razie siła przenosi się za pośrednictwem pręta i ujawnia się sama wywoływaniem ruchu. Tu znów łucznik zakrzywił swój łuk, a trzymając strzałę między wskazującym i wielkim swym palcem, naciska nią cięciwę, dopóki strzała niecierpliwa nie zostanie daleko odrzuconą. Ruch jej wywołany został siłą sprężystości łuku skrzywionego. Dopóki łucznik strzały nie wypuścił, ruchu nie było, łuk wszakże wciąż rozwijał siłę i *dążył* do wywołania ruchu. Dlatego przy określaniu siły należy mówić: „to co *dąży* do wywołania ruchu," zarówno, czy to ruch nastąpi istotnie, czy też nie nastąpi.

4. Ale siły mogą być również rozpoznane ze swej zdolności czyli dążności do powstrzymywania albo niszczenia ruchu. Zanim wypuszczam strzałę, czuję, że wywieram na nią siłę, która ma na celu przeciwdziałanie wyprostowaniu się cięciwy. Tu zatem siła moja ujawnia się jedynie *niszczeniem ruchu,* któryby został przez łuk wywołany, gdyby ona obecną nie była. Tak też, gdy trzymam ciężar w swej ręce, siła przez nią wywarta niszczy ruch, któryby ciężar zyskał, gdybym na spadek jego zezwolił; gdyby zaś na ręce mej umieszczony został ciężar większy, aniżeli go powstrzymać mogę, wysiłek mój, by go utrzymać, może być także słusznie nazwany siłą, ponieważ *dąży* do zniszczenia ruchu, jakkolwiek bezskutecznie. Z prostych tych przykładów widzimy, że siła rozpoznaną być może, bądź to przez wywołanie ruchu lub dążność do jego wywołania, bądź to przez niszczenie ruchu lub dążność do jego niszczenia; dlatego też uznać musimy słuszność powyższego określenia siły.

Mierzenie siły.

5. Ponieważ siły różnią się wielkością, zachodzi przeto konieczność obmyślenia odpowiednich sposobów do przeprowadzenia ich pomiarów. Ciśnienie wywarte przez jeden funt ciężaru w Warszawie, może być jednostką miary, z którą porównywać będziemy inne siły. Ka-

wał stali lub innej substancyi, który z siłą tą przyciągany jest do ziemi w Warszawie, przyciągany jest do ziemi z większą siłą na biegunie, a z mniejszą siłą na równiku; dlatego też, by należycie określić jednostkę siły, dodaliśmy wzmiankę o miejscowości, w której ciężar ciśnienie swe wywiera.

Łatwo pojąć możemy, dlaczego to wielkość siły ciągnącej lub cisnącej podaną być może, jako równoważna danej ilości funtów. Siła, jaką mięśnie ramienia ludzkiego wywierać mogą, mierzy się ciężarem, jaki dźwignąć mamy. Gdy ciężar zawieszony jest na sprężynie kauczukowej, sprężyna wydłuża się widocznie, ciężar więc ciągnie sprężynę, a sprężyna ciągnie ciężar; dlatego też liczba funtów ciężaru tego jest miarą siły przez sprężynę wywartej. W każdym w ogólności przypadku wielkość siły podana być może przez liczbę funtów, wyrażającą ciężar, jakiemu jest równoważną. Oprócz tego, jest inny jeszcze, ale znacznie trudniejszy sposób mierzenia siły, używany niekiedy w wyższych działach mechaniki (ust. 497), ale prostsza ta metoda odpowiedniejsza jest dla obecnych naszych celów.

6. Linia prosta, po której siła do ciała przyczepiona usiluje je poruszać, nazywa się kierunkiem siły. Dajmy, naprzykład, że do punktu A (fig. 1) przyczepiona jest siła 3 funtów, dążąca do poruszenia tego punktu w kierunku AB. Linię C pewnej długości przyjmijmy za jednostkę, rozumiejąc, że linia tej długości przedstawia si-

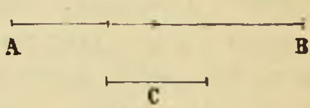

Fig. 1.

lę 1 funta. Linia *AB* została tak odmierzona, by wyrównywała trzy razy wziętej długości linii *C*, strzałka zaś na niej oznaczona ostrzem swojem wskazuje kierunek, w jakim siła działa. Tak więc, za pomocą linii oznaczonej długości i kierunku, z dodatkiem strzałki, mamy możność zupełnego przedstawiania siły.

Równowaga dwu sił.

7. Fig. 2 przedstawia dwa ciężary równe, do których przyczepione są nici, przesunięte przez bloki i utrzymujące się węzłem *C*. Węzeł ten pociągany jest siłami równemi i wręcz przeciwnemi. Odcinam dalej długości *CD*, *CE*, oznaczające siły; a ponieważ tu nie ma powodu, dla któregoby punkt *C* posuwał się w jednę stronę raczej aniżeli w drugą, pozostaje tedy w spoczynku. Ztąd więc wnosimy, że dwie siły równe i wręcz przeciwne przeciwdziałają sobie nawzajem, tak, jakby każda z nich niszczyła ruch, który druga wywołać usiłuje. Jeżeli zaś ciężary uczynię nierównemi, przez pewien dodatek do jednego z nich, węzeł

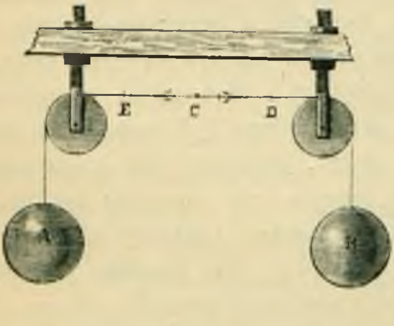

Fig. 2.

nie pozostaje już w spoczynku; zaczyna się natychmiast poruszać w kierunku siły większej.

Jeżeli dwie równe i przeciwne co do kierunku siły działają na punkt, mówimy, że pozostają w *równowadze*. W większej ogólności używamy tego wyrazu w odniesieniu do układu sił, z których każda przeciwdziała innym. Jeżeli siła działa na ciało, jedna co najmniej jeszcze siła obecną być musi, by ciało pozostać mogło w spoczynku. Jeżeli dwie siły działające na punkt nie mają kierunków wręcz przeciwnych, nie pozostają w równowadze; łatwo to dostrzedz możemy, naciskając ku dołowi węzeł *C* fig. 2. Skoro go opuścimy, cofa się natychmiast. To dowodzi, że gdy dwie siły są w równowadze, kierunki ich muszą być wręcz przeciwne, inaczej bowiem powodują ruch. Widzieliśmy zaś już poprzednio, że dwie te siły muszą być równe.

Książka, leżąca na stole, pozostaje w spoczynku. Książka ta poddana jest działaniu dwu sił, które, ponieważ są równe i przeciwne, nawzajem się znoszą. Jedną z tych sił jest przyciąganie ziemi, które dąży do poruszenia książki ku dołowi i któreby rzeczywiście spadek tej książki spowodowała, gdyby nie było podtrzymywane siłą przeciwną. Ciśnienie książki na stół nazywa się często *akcyą* t. j. *działaniem*, gdy opór, przedstawiony przez stół, jest siłą *reakcyi* t. j. *oddziaływania*. Mamy tu przykład ważnej zasady przyrody, która orzeka, że *akcya i reakcya* czyli *działanie i oddziaływanie są równe i wręcz przeciwne.*

Równowaga trzech sił.

9. Bierzemy teraz pod uwagę ważny przypadek, w którym trzy siły działają na punkty, co zbadać będziemy mogli za pomocą przyrządu przedstawionego na fig. 3. Przyrząd ten składa się z dwu bloków, mających

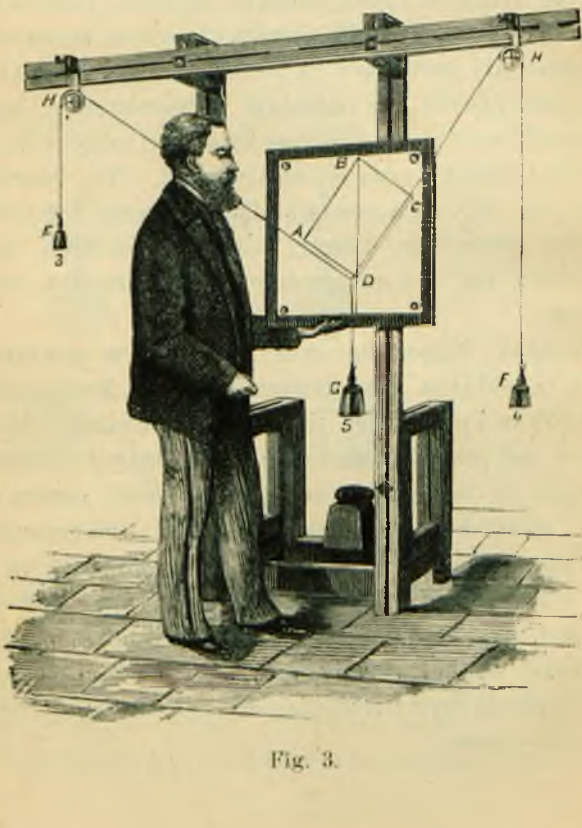

Fig. 3.

około 2" w średnicy [1]) i mogących się bardzo swobodnie obracać na swych osiach; odległość między blokami wynosi około 5', zawieszone są zaś w wysokości 6' na belce, jak to łatwo zrozumieć można z ryciny. Przez bloki przesunięty jest cienki sznurek, na 9' lub 10' długi, a zaopatrzony w lekkie haczyki *E*, *F*, na każdym ze swych końców. Do sznurka *D* uwiązany jest nadto w środku jego krótki sznurek, który na swobodnym swym końcu *F* również dźwiga haczyk. Posiadamy nadto pewną ilość ciężarków żelaznych, 0,5 funta, 1 f.; 2 f. i t. d., zakończonych w górze obrączkami, by je można było łatwo, pojedynczo lub po kilka, zawieszać w razie potrzeby na haczykach.

10. Rozpoczynamy od zawieszenia po jednym funcie na każdym z haczyków. Sznurki ulegają najpierw niejakim wahaniom, a wreszcie przyjmują stanowcze położenie. Jeżeli usiłujemy zakłócić to położenie sznurków i próbujemy im nadać inne kierunki, nie utrzymują się w nich bynajmniej, a gdy je puszczamy, wracają do miejsc, które pierwotnie zajęły. Zwróćmy więc uwagę na punkt środkowy *D*, na który trzy siły działają.

---

[1]). W wykładach naszych często oznaczać będziemy stopy i cale sposobem w technice używanym: 1' oznacza jednę stopę, 1" jeden cal. Tak np. 3' 4" czyta się: „trzy stopy cztery cale." Gdy zachodzić będzie potrzeba użycia ułamków, posługiwać się zawsze będziemy ułamkami dziesiętnemi. Tak np. 0,5" wyraża nam długość połowy cala, a 3' 1,9" czytać należy: „trzy stopy jeden cal i dziewięć dziesiątych cala."

Przestawiamy go teraz przez punkt O na fig. 4, a linie OP, OQ i OS są to kierunki trzech sznurków.

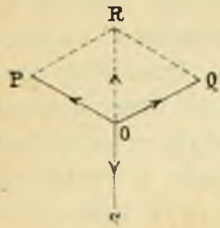

Fig. 4.

Rozpatrując ich położenie, dostrzegamy, że trzy kąty POS, QOS, POQ są między sobą równe. Można to bardzo łatwo sprawdzić, trzymając poza sznurkami kartę papieru, na której nakreślone są trzy linie, schodzące się w jednym punkcie, zawierające między sobą kąty równe; zobaczymy wtedy, że sznurki zbiegają się z liniami na papierze nakreślonemi.

11. Przy pobieżnej nawet rozwadze, rezultat taki przewidzieć mogliśmy. Skoro każdy z trzech sznurków wyprężony jest natężeniem jednego funta, jest rzeczą widoczną, że trzy siły ciągnące punkt O są równe. Gdy punkt O jest w spoczynku, również jest widoczna, że trzy siły tworzyć muszą kąty równe; przypuśćmy bowiem, że jeden z tych kątów, POQ dajmy, jest mniejszym od każdego z dwu pozostałych, w takim razie doświadczenie okazuje, że do zrównoważenia sił OP i OQ siła OS nie wystarczy. Trzy tedy kąty muszą być równe, czyli, co toż samo znaczy, trzy siły rozłożone są symetrycznie.

12. Ponieważ każda z sił wynosi 1 funt, odetnijmy na trzech liniach fig. 4, które wskazują ich kierunki, trzy równe długości OP, OQ, OS, i oznaczmy strzałki, by uwidocznić kierunek, w którym siła każda działa; siły są więc zupełnie przedstawione zarówno co do swego kierunku jak i co do swej wielkości.

Jeżeli siły te pozostają w równowadze, rozumieć można, że każda z nich znosi się działaniem dwu pozostałych. Tak w szczególności siłę $O\ S$ unicestwiają siły $O\ Q$ i $O\ P$. Ale siłę $O\ S$ może też zrównoważyć równa jej i wręcz przeciwna siła $O\ R$. Wypada ztąd, że siła $O\ R$ sama jest w stanie sprowadzić takiż sam skutek, jaki sprawiają razem siły $O\ P$ i $O\ Q$. A zatem siła $O\ R$ równoważną jest siłom $O\ P$ i $O\ Q$. Poznajemy ztąd doniosłego znaczenia zasadę, że dwie siły nieprzypadające w jednym kierunku zastąpione być mogą przez jednę tylko siłę. Działanie to nazywa się *składaniem sił*, a ta jedna siła *wypadkową* dwu sił. Siła $O\ R$ wynosi tylko jeden funt, a jednak równoważną jest dwu siłom $O\ P$ i $O\ Q$ razem, z których każda również jest funtem; pochodzi to ztąd, że siły $O\ P$ i $O\ Q$ częściowo sobie przeciwdziałają.

13. Poprowadźmy linie $P\ R$ i $Q\ R$ i uważmy, że kąty $P\ O\ R$ i $Q\ O\ R$ są równe, jako dopełnienia równych kątów $P\ O\ S$ i $Q\ O\ S$, a że każdy z tych kątów $P\ O\ R$ i $Q\ O\ R$ dopełnia trzecią część czterech kątów prostych, każdy z nich przeto czyni dwie trzecie części kąta prostego, a zatem wyrównywa kątowi trójkąta równobocznego. Ponieważ zaś nadto linie $O\ P$, $O\ Q$ i $O\ R$ są równe, trójkąty $O\ P\ R$ i $O\ Q\ R$ są równoboczne. Wypada ztąd, że kąt $P\ R\ O$ jest równy kątowi $R\ O\ Q$, jest przeto bok $P\ R$ równoległy do $O\ Q$ a podobnież i bok $Q\ R$ jest równoległy do $O\ P$, co znaczy, że czworokąt $O\ P\ R\ Q$ jest równoległobokiem. Poraz pierwszy odsłania się tu nam wielkie prawo, że wypadkowa dwu sił działających na

punkt jest przekątnią równoległoboku, którego siły te są dwoma bokami.

14. Ważna ta figura geometryczna nazywa się *równoległobokiem sił*. Wyrażona w sposób ogólny, zasada, którąśmy tu wykryli, podaje, że dwie siły działające na punkt mają wypadkową, i że wypadkowa ta, zarówno co do swej wielkości jak i co do swego kierunku, daje się przedstawić przez przekątnię równoległoboku, którego dwa boki przyległe są liniami, przedstawiającemi siły.

15. Zasada równoległoboku sił daje się wykazać w różny sposób za pomocą przyrządu fig. 3. Zawieśmy, naprzykład, na środkowym haczyku *G* 1,5 f., a na każdym z pozostałych haczyków *E* i *F* po 1 funcie. W tym razie trzy ciężary nie są już równe, nie zachodzi przeto, jak w przypadku poprzednim, symetrya, któraby nam dozwoliła przewidzieć warunki, jakim sznurki poddane będą; dostrzegamy wszakże, że sznurki przyjmują stanowcze położenie, do którego wracają niezmiennie, gdy usiłujemy je z niego wyprowadzać. Niech *O P*, *O Q* (fig. 5) oznaczają kierunki sznurków, przyczem nadto każda z linii *O P* i *O Q* posiada długość, odpowiadającą 1 funtowi, gdy *O S* odpowiada 1,5 funta. Jak poprzednio, tak i w tym razie przyjąć można, że obie siły *O P* i *O Q* znoszą się działaniem siły *O S*. Siłę tę wszakże *O S*

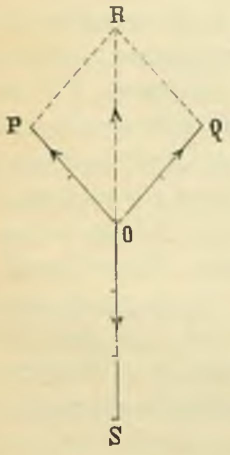

Fig. 5.

równoważy także równa jej i wręcz przeciwna siła *O R*. Wypada ztąd przeto, że jedna ta siła *O R* zastępuje działanie sił *O P* i *O Q*, co znaczy, że jest ich wypadkową, a to stanowi dowód doświadczalny, że siły te posiadają wypadkową.

Możemy nadto sprawdzić, że wypadkowa ta jest przekątnią równoległoboku, którego bokami są obie siły równe. Nakreślmy mianowicie na papierze równoległobok, mający cztery boki równe, a jedne z przekątnich półtora raza dłuższą, aniżeli każdy z tych boków. Wykonać to można bardzo łatwo, jeżeli najpierw narysujemy jeden z dwu trójkątów, na które przekątnia ta dzieli równoległobok. Przekątnią przedłużmy poniżej równoległoboku w kierunku *O S*, a jeżeli kartkę umieścimy tuż naprzeciwko sznurów, oba sznury przypadać będą w kierunku *O P* i *O Q*, gdy przekątnia przedłużona schodzi się z pionową *O S*. Tym więc sposobem zasada równoległoboku sił jest sprawdzoną.

16. Toż samo doświadczenie wskazuje, że i dwie siły nierówne złożone być mogą w jedne wypadkową. Uważać mianowicie można, że dwie siły *O P* i *O S*, fig. 5, są zrównoważone przez siłę *O Q*, co innemi słowy znaczy, że siła *O Q* musi być równą i wręcz przeciwną sile, która jest wypadkową sił *O P* i *O S*.

17. Zawieśmy teraz na środkowym haczyku *G* ciężar 5 funtów, na haczyku *E* 3 f. a na *G* 4 f. To właśnie ma miejsce w przypadku, przedstawionym na fig. 3. Ponieważ ciężary są nierówne, nie możemy bezpośrednio wnieść, jak się sznury ułożą; przekonywamy się wszakże, jak poprzednio, że przyjmują one położenie stanowcze,

do którego wracają, gdy je z nich na chwilę usuwamy. Położenie to sznurów przedstawia fig. 6, która uczy, że wszystkie trzy kąty są w tym razie różne między sobą. Każda wszakże siła jest zrównoważona przez dwie pozostałe, każda przeto jest równa i wręcz przeciwna wypadkowej dwu pozostałych. Nakreślmy znowu równoległobok na kartce papieru, co łatwo wykonać można, rysując najpierw trójkąt *O P R*, którego boki czynią 3, 4 i 5, a następnie prowadząc linie *O Q* i *R Q*; równoległe do *R P* i *O P*. Przedłużmy przekątnią *O R* do *S*, a umieściwszy równoległobok ten poza sznurami, zobaczymy, że kierunki tych sznurów schodzą się z bokami i przekątnią, co potwierdza zasadę równoległoboku sił i w tym przypadku, gdy wszystkie siły mają wielkość różną.

Fig. 6

18. Łatwo też przekonać się możemy, przykładając dokładną ekierkę, że w tym razie sznury, dźwigające ciężary 3 f. i 4 f., zawierają między sobą kąt prosty. Mogliśmy też z zasady równoległoboku sił wnieść, że musi to właśnie mieć miejsce w przypadku, gdy boki trójkąta posiadają długości 3, 4 i 5; kwadrat bowiem 5 czyni 25, a kwadraty 3 i 4 wynoszą 9 i 16, kwadrat zatem jednego boku trójkąta równa się sumie kwadratów boków po-

zostałych, co wskazuje, że trójkąt ten jest prostokątny. Ztąd więc, ponieważ linia *O P* jest równoległa do *Q R*, kąt *P O Q* musi być prostym.

Siła mniejsza może niekiedy równoważyć dwie większe siły.

19. Przypadki składu sił mnożyć możemy w sposób nieograniczony, umieszczając na haczykach ciężary różnej wielkości, kreśląc równoległoboki na papierze i porównywając je ze sznurami, jak poprzednio. Ograniczymy się tu wszakże do jednego jeszcze tylko doświadczenia, które prowadzi do ważnych bardzo zastosowań. Przyczepmy po 1 f. do każdego z haczyków *E* i *F*; łączący je sznur pozostanie prostym, dopóki nie zostanie z położenia tego wyprowadzony przez umieszczenie ciężaru na haczyku środkowym, do wywołania zaś tego wystarczyć może ciężarek bardzo drobny. Dajmy, że wynosi on pół funta, — położenie jakie wtedy zajmą sznury, wskazane jest na fig. 7. Jak poprzednio, każda siła równa jest i wręcz przeciwna wypadkowej dwu innych. Siła przeto wynosząca pół funta jest wypadkową dwu sił, z których każda czyni 1 funt. Pozorny ten paradoks wyjaśnimy sobie, gdy zważymy, że siły 1 f. mają kierunki prawie przeciwne, w znacznej tedy mierze przeciwdziałają sobie nawzajem. Nakreśliwszy równoległobok na papierze, łatwo możemy sprawdzić, że

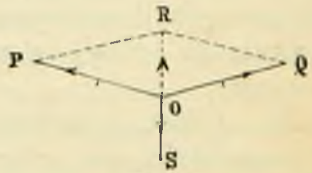

Fig. 7

zasada równoległoboku sił utrzymuje się i w tym przypadku.

20. Jakkolwiek drobnym byłby ciężarek zawieszony na środku sznura poziomego, zobaczymy zawsze, że sznur ten będzie zgiętym; a jakkolwiek silnie usiłowalibyśmy go wyprężyć, niepodobna nam go będzie wyprostować. Sznur może się przerwać, ale nie zdołamy doprowadzić go do położenia poziomego. Spójrzmy na drut telegraficzny, — nie utrzymuje się on nigdy w linii prostej między dwoma następującemi po sobie biegunami, a skrzywiona jego postać tem jest widoczniejsza, im większą jest odległość wzajemna biegunów. Przy rozprowadzaniu drutu telegraficznego stosuje się znaczna siła wyprężająca, za pomocą odpowiedniej maszyny, a pomimo to druty nie mogą być zupełnie wyprężone, własny bowiem ciężar drutu działa jako siła pociągająca go ku dołowi. Zupełnie tak samo, jak sznur w naszych doświadczeniach nie może pozostać prostym, gdy pewna siła, jakkolwiek drobna, ciągnie go wpośrodku ku dołowi, tak też niepodobna wyprostować długiego drutu przez stosowanie siły. Kilka dalszych dowodów tej zasady podamy w następnym wykładzie, obecny zaś zakończymy pewnem jej zastosowaniem.

21. Jednem z najważniejszych zadań praktycznych w mechanice, jest osiągnięcie tego, by mała siła pokonała większą. Stosownie do różnych celów, zadanie to rozwiązać można różnemi sposobami, a rzeczy tej poświęcimy kilka dalszych wykładów. Może jednak nie ma urządzenia prostszego nad sposób, jaki nam dają zasady, dopiero co wyłożone. Zastosujemy je do dźwignię-

cia ciężaru 28 f. za pomocą ciężaru 2 f. tylko. Nie chcę bynajmniej twierdzić, by szczególne to zastosowanie miało doniosłe znaczenie praktyczne; przedstawiam to raczej jako uderzający wniosek z zasady równoległoboku sił, aniżeli jaką maszynę praktyczną.

Sznur jednym swym końcem przywiązany jest do słupa *A* (fig. 8) i przechodzi przez blok *B* w tejże samej

Fig. 8.

pionowej wysokości, a w oddaleniu 16 stóp. Na swobodnym końcu sznura zawieszony jest ciężar 28 funtów, podpory zaś przyrządu powinny być należycie obciążone, albo też w inny sposób ochronione od poruszenia się. Sznur *A B* wydaje się prostym i poziomym, ciężar jego zatem uważany być może jako zupełnie nieznaczny w porównaniu z napięciem (28 f.), jakiemu jest poddany; położenie to wykazane jest na figurze linią kropkowaną *A B*. Zawieśmy teraz w punkcie *C*, na środku sznura, ciężar 2 funtów. Sznur przesuwa się natychmiast i przyjmuje położenie przedstawione na figurze. By wszakże to stać się mogło, ciężar 28 f. musi się w tejże samej chwili nieco podnieść; ponieważ bowiem dwa boki trójkąta *C B*, *C A* mają długość znaczniejszą aniżeli bok trzeci *A B*, większa przeto część sznura przypadać musi między podporami, gdy jest wysunięty ku dołowi działaniem 2 f., aniżeli poprzednio, gdy był prostym. To zaś stać się może jedynie przez skrócenie sznura między blokiem *B* a ciężarem 28 f., na drugim bowiem końcu sznur jest nieruchomo utwierdzony. Ruch wprawdzie ciężkiej tej bryły jest tak drobny, że z pewnej odległości trudno go dostrzedz, możemy za pomocą jednak urządzenia elektrycznego uwidocznić łatwo, że ciężar znaczny istotnie zostaje przez ciężar drobny uniesiony w górę.

22. Gdy prąd elektryczny przebiega przez przyrząd alarmujący, słyszymy brzmienie dzwonka, w chwili zaś, gdy prąd przerywam, dzwonek się zatrzymuje. Przytwierdziłem teraz płytkę miedzianą do bryły 28 funtowej, a inną podobnąż płytkę do podpory wyżej umieszczonej, tak, że obie te płytki mogą się ze sobą zetknąć dopiero, gdy ciężar nieco się podniesie. Prąd elektryczny usiłuje przejść od jednej z tych płytek miedzianych do drugiej, nie może jednak tego dokonać, dopóki nie nastąpi między niemi zetknięcie. Gdy sznur jest prosty, obie płytki miedziane są rozsunięte, prąd nie przebiega, a przyrząd nasz alarmujący milczy; w chwili wszakże, gdy zawieszam 2 funty na środku sznura, podnoszą one bryłę 28 funtową, co sprowadza zetknięcie płytek miedzianych, a teraz wszyscy głos dzwonka słyszymy. Za odjęciem 2 funtów prąd się przerywa, a dźwięk ustaje.

23. Dostrzegliście niewątpliwie wszyscy, że ciężar 2 f. obniżył się o długość kilku cali, łatwo to bowiem wi-

dzieć można i zdaleka, drobny więc ciężarek przesunął się o długość bardzo znaczną, a w przebiegu tym zdołał dźwignąć bryłę cięższą na wysokość bardzo małą. Jestto okoliczność jaknajwiększego znaczenia; — korzystam też z pierwszej sposobności, by na nią uwagę waszą zwrócić.

WYKŁAD II.

Rozkład sił.

Wstęp. — Rozkład jednej siły na dwie siły. — Dowody doświadczalne. — Żeglowanie. — Rozkład jednej siły na trzy siły nieprzypadające na tej samej płaszczyźnie.

WSTĘP.

24. Jak wykład poprzedni zajmował się głównie badaniem, czy jedna siła zastąpić może dwie siły, tak w wykładzie obecnym rozważymy pytanie odwrotne, czy mogą dwie siły zastąpić jednę siłę? Ponieważ przekątnia równoległoboku przedstawia siłę pojedyńczą, równoważną dwu siłom, przedstawionym przez jego boki, oczywista przeto, że jedna siła rozłożoną być może na dwie inne, jeżeli mianowicie przyjmiemy ją za przekątnię równoległoboku, przez nie utworzonego.

25. W wykładzie obecnym i w kilku następnych używać często będziemy wagi sprężynowej czyli dynamometru, przedstawionego na fig. 9 (str. 27); ciężar uczepiony jest na haku, a gdy waga zawieszoną jest górnym pierście-

niem, skazówka podaje liczbę funtów na podziałce. Waga ta jest bardzo przydatna do uwidocznienia napięcia, jakiemu sznur jest poddany; w tym celu wagę trzymać można za pierścień, gdy sznur przywiązany jest do haka. Widzimy nadto na figurze, że waga ta posiada dwa pierścienie i dwa odpowiednie haki. Hak i pierścień, osadzone na górze i dole, służą do ważenia ciężarów aż do 300 funtów, co odczytuje się na podziałce, widocznej na figurze. Hak zaś i pierścień, osadzone na boku przyrządu, odpowiadają innej podziałce na drugiej stronie płyty; ostatnia ta podziałka służy do ważenia ciężarów dochodzących do 50 mniej więcej funtów; dla ciężarów tedy mniejszych od 50 f. używamy bocznego tego haka i pierścienia, co wydaje rezultat dokładniejszy, aniżeliby otrzymać można za pomocą górnego pierścienia i dolnego haka, które przeznaczone są dla ciężarów większych. Dogodne i użyteczne te wagi są dostatecznie dokładne, łatwo zaś sprawdzić je można, zawieszając na nich ciężary znane. Oprócz przyrządu tu opisanego, posługiwać się też będzie-

Fig. 9

my niekiedy mniejszemi tego rodzaju dynamometrami, a za ich pośrednictwem będziemy mogli śledzić istnienie i wielkość sił w sposób bardzo dogodny.

Rozkład jednej siły na dwie siły.

26. Wykażemy przedewszystkiem, że istotnie siła pojedyncza rozłożoną być może na dwie siły, a do celu tego użyjemy urządzenia, wskazanego na fig. 10.

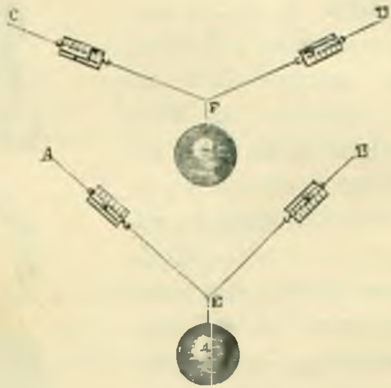

Fig. 10.

Końce sznura przyczepione są do dwu małych wag sprężynowych, do środka zaś *E* tego sznura przywiązany jest ciężar 4 funtów. Przy *A* i *B* są osady, do których wagi przywiązywać można. Dajmy, że każda z odległości *A E*, *B E*, wynosi 12", odległość zaś *A B* 16". Gdy sznur jest w ten sposób umieszczony, a ciężar zwiększa swobodnie, każdy ze sznurów *E A*, *E B* wyprężony jest siłą, której wielkość wynosi prawie 3 f., jak to wskazują wagi. Ale ciężar 4 funtów jest jedynym, działającym tu ciężarem, musi on przeto być równoważny dwu siłom, działającym w kierunkach *A E* i *B E*, z których każda jest bardzo bliską 3 funtom. W tym przeto razie każda z dwu sił, które równoważą się z 4 funtami, jest od 4 f. mniejsza, chociaż obie razem ciężar ten przewyższają.

27. Ale usuńmy teraz sznur z *A B* i zawieśmy go na *C D*, gdzie długość *C D* wynosi 1'10'', wtedy siły wykazane w kierunkach *F C* i *F D* czynią każda 5 funtów; tu więc jedna siła 4 funtów równoważna jest dwu siłom, z których każda wynosi 5 funtów. W wykładzie poprzednim widzieliśmy, że jedna siła równoważyć może dwie siły większe, tu poznajemy przypadek odpowiedni, że jedna siła zastąpioną być może przez dwie siły większe. Poznajemy nadto, że jedna siła rozłożoną być może na dwie siły nieograniczenie wielu sposobami, przy każdej bowiem zmianie odległości między punktami, w których wagi są zawieszone, odmienne siły są przez nie wykazane.

Ilekroć ciężar zawieszony jest w punkcie, położonym na połowie odległości między wagami, siły w kierunku sznurów są równe; ale gdy ciężar umieścimy bliżej jednej wagi aniżeli drugiej, siłę większą wskaże waga, względem której ciężar bliżej się znajduje.

Dowody doświadczalne.

28. Rozdział czyli rozkład jednej siły na dwie, z których każda jest od niej większą, wykazany być może różnemi sposobami, a dwa takie doświadczenia tu po-

damy. Na fig. 11 przedstawione jest jedno do tego celu urządzenie. Mocny sznur jedwabny, mogący utrzymać

Fig. 11.

20 do 30 funtów, przywiązany jest jednym końcem *A* do stałej podpory, drugim zaś *B* do kółka przyrządu, służącego do wyprężania drutów; przyrząd ten składa się z pręcika stalowego, który na jednym końcu posiada kółko, a na drugim szrubę i mutrę; używa się on zwykle do wyciągania drutów przy prowadzeniu ogrodzeń drucianych, w obecnym zaś przypadku służy nam do wyprężenia sznura. Przygotowawszy to, biorę kawałek zwykłej nitki do

szycia, która oczywiście słabszą jest aniżeli sznur jedwabny; przywiązuję ją do środka *C* sznura, a koniec jej drugi trzymam w palcach i ciągnę; coś przerwać się musi i coś przerwało się istotnie, — ale co to się przerwało? To nie wątła nitka — pozostała ona całą zupełnie, ale sznur nasz pękł na dwoje. Należy nam więc wyjaśnić teraz ten objaw uderzający. Siła, jaką wywierałem na nitkę, nie wystarczała do jej zerwania; nitka wszakże przeprowadziła siłę tę na sznur, a to w okolicznościach takich, że siła ta została znacznie powiększoną, tak dalece, że stała się zdolną do rozerwania sznura, zanim siła pierwotna rozedrzeć zdołała nitkę. Możemy też zrozumieć, dlaczego niezbędnem było wyprężenie sznura. Na fig. 10 napięcie sznurków jest większem, gdy są przywiązane do *C* i *D*, aniżeli gdy są przywiązane do *A* i *B*; znaczy to, że im bardziej zbliża się sznur do linii prostej, tem większe są siły, na które rozkłada się siła przyczepiona.

29. Podajemy teraz inny przykład, wykazujący tę samą zasadę.

Na fig. 12 (str. 32) widzimy łańcuch, mający 8' długości, którego jeden koniec uczepiony jest do szruby wyprężającej, drugi zaś przytwierdzony jest do niewielkiego pręta sosnowego, mającego w przecięciu kwadrat o boku 0,5", a 5" długości między dwoma słupkami stalowemi, na których jest oparty. Obracając mutrę *D* szruby wyprężam łańcuch, jakem to zrobił ze sznurkiem fig. 11 i dla tegoż samego powodu. Następnie owijam sznurek dokoła łańcucha i zwolna go ciągnę. Ciśnienie, jakie ztąd wywartem zostaje na pręcik drewniany, jest tak silne, że pęka on w poprzek. W tym razie, drobna siła kilku funtów, przeniesiona na łańcuch przez ciągnięcie sznurka, wzrosła do stu funtów z górą, gdyby bo-

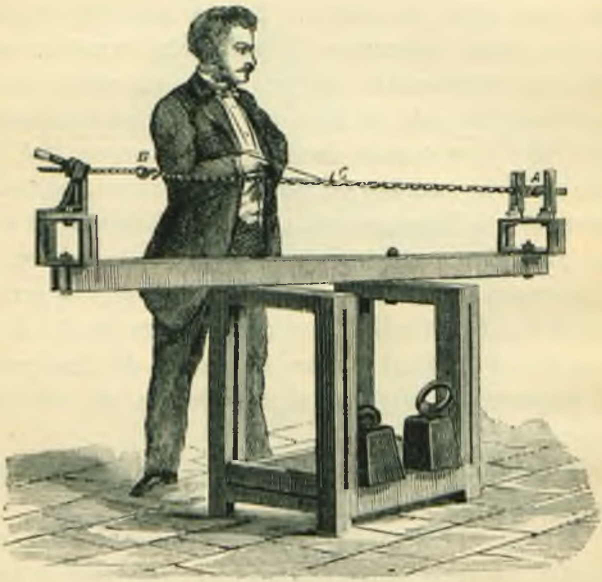

Fig. 12.

wiem była słabszą, nie zdołałaby przełamać drzewa. Tłomaczy się to zupełnie tak samo, jak w przykładzie poprzednim, gdy sznurek zerwany został nitką.

Żeglowanie.

30. Działanie wiatru na żagle statku daje nam nauczający bardzo i praktyczny przykład rozkładu sił. Za

pomocą równoległoboku sił wytłomaczyć jesteśmy w stanie, dlaczego statek płynąć może nawet przeciw wiatrowi. Siłą jest to, co dąży do wywołania ruchu, ruch zaś w ogólności ma miejsce w kierunku siły. W przypadku zaś, gdy wiatr działa na statek za pośrednictwem żagli, wywołuje on ruch, który niekoniecznie w kierunku wiatru przypada i do pewnego stopnia może być względem niego przeciwnym. Pozorny ten paradoks wymaga pewnych wyjaśnień.

31. Dajmy, w przypuszczeniu pierwszem, że wiatr

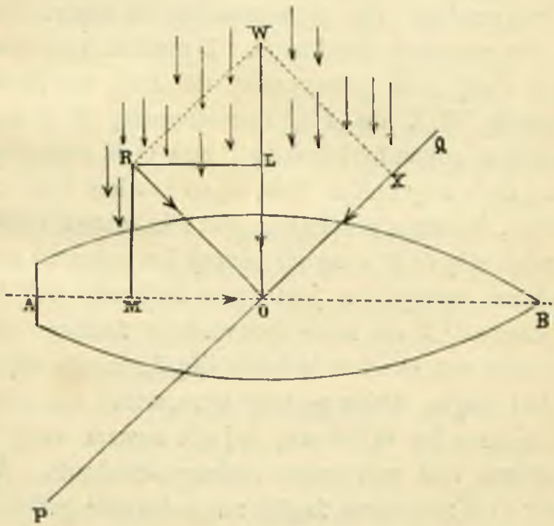

Fig. 13.

wieje w kierunku wskazanym strzałkami na fig. 13, prostopadle do linii *A B*, po której się statek posuwa.

W jakim kierunku winien być żagiel zwrócony? Widoczna, że żagiel nie może być rozwinięty wzdłuż linii *A B*, wtedy bowiem samo działanie wiatru pchnęłoby statek na bok; ani też nie może być żagiel umieszczony brzegiem ku wiatrowi, to jest wzdłuż linii *O W*, wtedy bowiem ślizgałby się jedynie wzdłuż żagla, nie wytwarzając zgoła siły popychającej. Dajmy tedy, że żagiel umieszczony jest w położeniu pośredniem między obu powyższemi kierunkami, a mianowicie w linii *P Q*. Linia *O W* niech przedstawia wielkość siły wiatru, cisnącą na żagiel.

Przypuśćmy, dla uproszczenia, że żagiel rozciąga się po obu stronach punktu *O*. Z punktu tego *O* wyprowadźmy linię *O R* prostopadłą do *P Q*, a z punktu *W* prostopadłą *W X* do *P Q* i prostopadłą *W R* do *O R*. Na zasadzie równoległoboku sił, siła *O W* rozłożoną być może na dwie siły *O X* i *O R*, są to bowiem boki równoległoboku, którego przekątnią jest siła wiatru *O W*. Możemy więc siłę *O W* z uwagi usunąć i wyobrazić sobie, że siła wiatru zastąpiona jest przez dwie siły *O X* i *O R*; siła wszakże *O X* nie może sprowadzać żadnego skutku, przedstawia ona bowiem jedynie siłę ślizgającą się po powierzchni żagla, która go tedy bynajmniej nie popycha; żagiel zwraca ku składowej tej sile zawsze swój brzeg, nie wywiera ona nań przeto żadnego działania. Względem siły *O R* natomiast żagiel ma położenie prostopadłe, ona jest tedy składową skuteczną.

Siła przeto wiatru oznaczona jest przez *O R*, zarówno co do swej wielkości, jak i swego kierunku; siła ta przedstawia istotne ciśnienie, wywarte na maszt przez żagiel, a które za pośrednictwem masztu udziela się statkowi. Siła wszakże *O R* nie przypada w kierunku, w którym statek płynie, musimy więc siłę tę dalej jeszcze rozłożyć, by wykryć jej skutek użyteczny. Otrzymamy to, prowadząc z punktu *R* linie *R L* i *R M*, równoległe do *O A* i *O W*, zkąd utworzy się równoległobok *O M R L*. Według zasady tedy równoległoboku sił, siła *O R* równoważną jest dwu siłom *O L* i *O M*.

Działanie siły *O L* na statek polega na popychaniu go w kierunku prostopadłym do kierunku, w którym on płynie. Dlatego też starać się należy, by działanie tej siły niweczyć, o ile to jest możebnem. Osiąga się to przez nadanie statkowi odpowiedniej postaci, która tak jest dobrana, by statek przedstawiał jak największy możebny opór przeciw usiłowaniu posunięcia go w bok przez wodę; im głębszy jest statek, tem dokładniej niszczy się wpływ siły *O L*. W każdym razie siła ta sprowadzałaby pewne zboczenie, gdyby nie ster, który, zwracając przód statku nieco w stronę wiatru, nastawia żagiel jego w kierunku dostatecznym przeciw wiatrowi, znosząc tym sposobem niewielki wpływ siły *O L*, która pędzi go w kierunku wiatru.

Skoro w ten sposób załatwiliśmy się z siłą *O L*, widzimy, że pozostaje jedynie siła *O M*, która bezpośrednio posuwa statek w kierunku żądanym. Poznajemy tedy, w jaki sposób wiatr, przy pomocy oporu wody, posuwać może okręt po linii prostopadłej do kierunku, w jakim wieje; widzieliśmy, że żagiel mieć musi pewne położenie pośrednie między kierunkiem wiatru a kierunkiem biegu statku. Dowieść też można, że gdy żagiel, w przypuszczeniu, że jest płaski i pionowy, przypada w kierunku dwójsiecznej kąta *W O B*, wielkość siły składowej *O M* jest znaczniejsza, aniżeli przy jakiemkolwiek innem położeniu żagla.

32. Też same zasady uczą, jak może statek płynąć przeciw wiatrowi; nie może on wprawdzie, oczywiście, płynąć wręcz przeciw wiatrowi, ale posuwać może w kierunku pochylonym względem wiatru o połowę kąta prostego, a być może nawet i o kąt mniejszy jeszcze. Poznać to możemy na fig. 14.

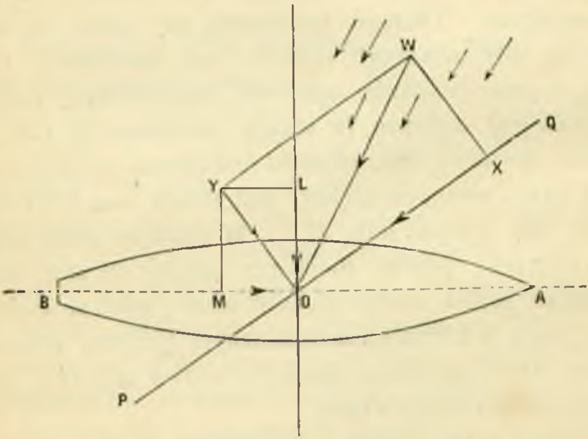

Fig. 14.

Strzałki, jak poprzednio, wskazują kierunek wiatru. Niech linia *O W*, do nich równoległa, oznacza siłę wiatru, żagiel zaś niech będzie umieszczony wzdłuż linii *P Q*. Siłę *O W* rozłóżmy na *O X* i *O Y*; siła *O X* ślizga się tylko po powierzchni żagla, *O Y* zaś jest siłą skuteczną.

Rozłóżmy ją dalej na *O L* i *O M*; siła *O L* znosi się w sposób wyżej już wyłożony, a *O M* jest siłą, która statek pędzi naprzód. Widzimy więc, że pod działaniem tej siły statek posuwa się naprzód, chociaż ruch ten jest zwrócony nawet po części przeciw wiatrowi.

Nadmienić należy, że w tym razie siła *O L*, usiłująca statek posuwać z wiatrem, przewyższa siłę *O M*, która go naprzód pędzi. Ztąd to pochodzi, że statek posiadający pudło bardzo głębokie, a tem samem stawiający opór bardzo znaczny sile, pędzącej go w bok, płynąć może w kierunku bardziej przeciw wiatrowi zwróconym, aniżeli statek nie tak zbudowany. Statek winien mieć postać taką, by poruszał się, o ile można, swobodnie w kierunku swej długości; z tego to powodu statek jest zaostrzony i w ogólności tak złożony, by łatwo po wodzie sunął; ma to na celu, by sile *O M* nastręczał się do pokonania opór tak mały, jak tylko być może. Gdyby żagiel był płaskim i pionowym, winienby dzielić kąt *A O W* na dwie równe części, wtedy bowiem wiatr działałby w sposób najskuteczniejszy. Ponieważ wtedy statek płynąć może prawie przeciw wiatrowi, wynika stąd, że, przebiegając drogę zygzakowatą, dotrzeć może od jednego portu do drugiego, chociaż nawet wiatr dmie od miejsca, do którego dąży, ku mieiscu, z którego przybywa.

Postępowanie takie dobrze jest znane i nazywa się „lawirowaniem.” Rozumiemy też, że w statku żaglowym ster posiada znaczenie ważniejsze, aniżeli w parowcu; w tym ostatnim bowiem służy on tylko do zmieniania kierunku biegu statku, gdy tymczasem w poprzednim jest on potrzebny nietylko do zmiany kierunku, ale używanym być musi także, gdy trzeba okręt uchronić od zboczenia z drogi pod wpływem bocznego nacisku wiatru.

Rozkład jednej siły na trzy siły, nieprzypadające na jednej płaszczyźnie.

33. Aż dotąd rozważaliśmy tylko siły, przypadające na jednej płaszczyźnie, w przyrodzie wszakże napotykamy też siły, działające w różnych kierunkach, nie możemy tedy badań naszych ograniczyć do przypadku prostszego. Rozpatrzymy więc, dwiema różnemi drogami, czy jedna siła rozłożoną być może na trzy siły, nieprzypadające na tej samej płaszczyźnie, chociaż przechodzące przez jeden i ten sam punkt.

Pierwsza metoda naszych poszukiwań jest następująca. Do trzech punktów A, B, C (fig. 15) przywiązane

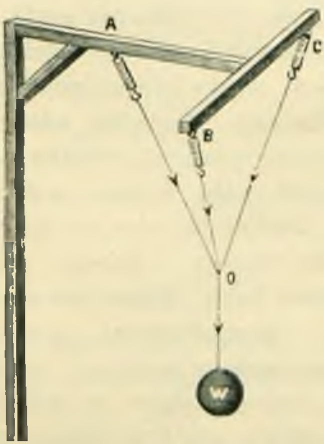

Fig. 15.

są trzy wagi sprężynowe. Punkty *A*, *B*, *C* nie znajdują się na jednej linii prostej, ale mieszczą się w jednakiej wysokości pionowej; do wag sprężynowych przyczepione są sznury, łączące się w punkcie *O*, do którego przywieszony jest ciężar *W*. Ciężar utrzymywany jest przez trzy sznury, a naprężenie tych sznurów, czyli ciśnienie, jakiemu ulegają, wskazane jest przez wagi sprężynowe. Naprężenie największe ma miejsce na sznurze najkrótszym, naprężenie zaś najmniejsze na najdłuższym. W tym razie siła *W* funtów, wywołuje trzy siły, które wzięte razem, przewyższają własną jego wielkość. Jeżeli do *W* dodamy równy mu ciężar, zobaczymy, cośmy i przewidzieć mogli, że naprężenia wskazane na podziałkach stały się dokładnie dwa razy większemi, aniżeli były poprzednio. Przekonywamy się tym sposobem, że stosunek siły do każdej ze składowych, na które się rozkłada, nie zależy od istotnej wielkości tej siły, ale od względnych kierunków siły i jej składowych.

34. Inny sposób uwidocznienia rozkładu jednej siły na trzy siły nieprzypadające na jednej płaszczyźnie, przedstawiony jest na fig. 16 (str. 40). Mamy tu trójnóg, złożony z trzech prętów sosnowych, o wymiarach 4' $\times$ 0,5" $\times$ 0,5", związanych drutem, owiniętym dokoła każdego z nich w górnym końcu. Drut jednym swym końcem zwiesza ku dołowi i dźwiga hak, na którym zawieszony jest ciężar 28 funtów. Ciężar ten utrzymywany jest przez drut, ciśnienie jednak wywarte stąd na drut, przenosi się na trzy pręty drewniane, mamy tu zatem siłę działającą ku dołowi za pośrednictwem prętów drewnianych. Nie możemy tego uwidocznić przy pomocy urzą-

dzenia, podobnego do wag sprężynowych, mamy tu bowiem ciśnienie ku dołowi zamiast ciągnięcia. W każdym razie, jeżeli s p r o b u j e m y unieść którąkolwiek nogę, doznamy odrazu wrażenia, że występuje tu siła działająca przez nią ku dołowi.

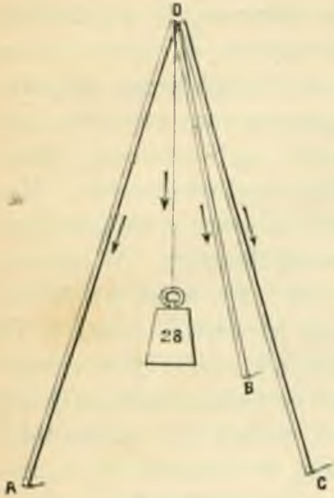

Fig. 16.

Ciężar jest tu zatem rozłożony na trzy siły, które działają ku dołowi za pośrednictwem nóg trójnoga; trzy te siły nie przypadają na jednej p ł a s z c z y ź n i e, a wzięte razem trzy te siły są większe aniżeli ciężar.

35. Trójnóg używany jest często do podtrzymania ciężarów; nadaje się do tego dobrze, dużo bowiem unieść może, a przytem stoi bardzo bezpiecznie. Ocenić możecie wytrzymałość jego z modelu, przedstawionego na figurze, chociaż bowiem nogi ma bardzo cienkie, zupełnie jednak bezpiecznie dźwiga znaczny ciężar. Bloki, służące do podnoszenia w górę olbrzymich ciężarów, zawieszane są często na kolosalnych trójnogach. Posiadają one stateczność i bezpieczeństwo przy wielkiej wytrzymałości.

36. Zestawienie urządzeń fig. 15 i 16 nasuwa nam ważną uwagę. W przypadku jednym użyte były trzy sznury, w drugim trzy pręty. Pręty mogłyby wystarczyć w obu razach, sznury wszakże nie byłyby w stanie zastą-

pić prętów. W przypadku pierwszym sznury są wyprężone, a wyprężenie to dąży do ich przerwania, ale w drugim razie natura siły działającej za pośrednictwem prętów ku dołowi jest zupełnie różną; nie dąży ona do rozerwania pręta na dwoje, ale go uciska, tak, że gdyby ciężar był dostatecznie wielki, pręty skrzywiłyby się i złamały. Trzymam końce ołówka w każdej ręce i usiłuję rozerwać go na dwoje, ołówek znajduje się więc w warunkach takich, jak sznury fig. 15; ale zamiast go rozrywać, opieram teraz na nim swoje ręce, a ołówek odpowiada prętom fig. 16.

37. Rozróżnienie to jest wielkiej wagi w mechanice. Pręt lub sznur w stanie wyprężenia stanowi „zawieszenie," pręt zaś w stanie ucisku nazywa się „podporą." Ponieważ pręt opierać się może zarówno wyprężeniu jak i uciskowi, użyty być może bądź do zawieszania, bądź też do podpory, sznur wszakże lub łańcuch służyć mogą jedynie do zawieszania. Kolumna jest zawsze podporą, spoczywający bowiem na niej ciężar wywołuje w niej stan ucisku. Do rozróżniania tego często odwoływać się będziemy w dalszym ciągu naszych wykładów, trzeba to zatem należycie rozumieć.

Kran czyli żóraw.

38. By wyjaśnić naturę „zawieszenia" i „podpory," a zarazem by dać przykład użyteczny rozkładu sił, użyjemy przyrządu fig. 17 (str. 42).

Przedstawia on zasadę, według której zbudowany jest żóraw czyli kran albo winda do podnoszenia ciężarów i ma liczne zastosowania w mechanice praktycznej. Pręt drewniany *B C*, mający 3'6" długości, a 1" × 1" w przecięciu, obrać się może dokoła swej podstawy na

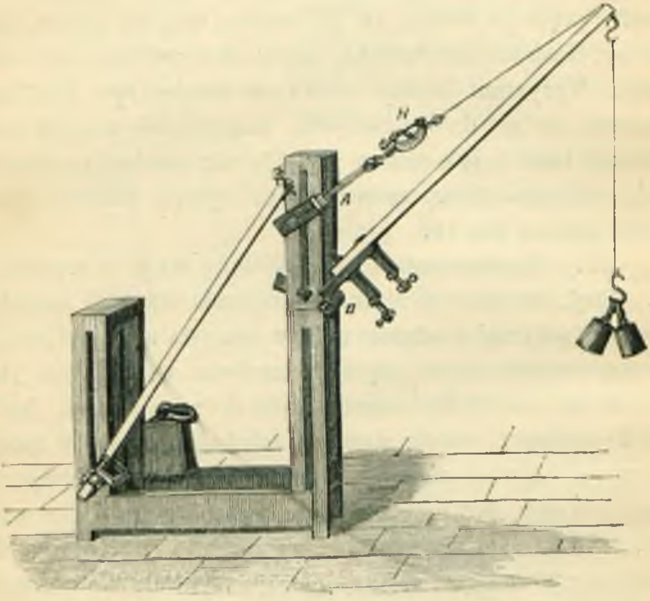

Fig. 17.

dolnym swym końcu *B*, za pomocą stawu lub zawiasy; pręt ten nadto na górnym swym końcu utrzymywany jest w zawieszeniu na drucie miedzianym *A C*, długości 3', który przywiązany jest do słupa powyżej zawiasy. Odległość *A B* ma jednę stopę długości. Od punktu *C* schodzi drut, zaopatrzony w końcu w hak, na którym zawieszany być może ciężar; drut zaś, utrzymujący koniec pręta C w zawieszeniu, przyczepiony jest do wagi sprężynowej, której skazówka podaje ciśnienie czyli naprężenie. Waga sprężynowa zabezpieczona jest za pomocą szruby wyprężającej tak, by przez obrót jej mutry można było długość drutu skracać lub powiększać, gdy tego zachodzi konieczność. Potrzebne to jest dlatego, że gdy różne ciężary są na haku zawieszone, sprężyna rozciąga się więcej lub mniej a szruba używa się wtedy do utrzymywania całkowitego zawieszenia $A\ C$ w stałecznej długości 3 stóp.

39. Dajmy, że na haku W zawieszony jest ciężar 20 funtów, który usiłuje tedy pociągnąć ku dołowi koniec górny pręta $B\ C$, ale pręt ten trzymany jest z drugiej strony przez drut $A\ C$, drut zatem wprowadzony jest w stan wyprężenia, co w ogólności ma miejsce przy każdem zawieszeniu, wielkość zaś tego wyprężenia wynosi 60 funtów, jak to wskazuje waga sprężynowa. Znajdujemy więc tu znowu, co już tak często zwracało uwagę naszą poprzednio; siła mianowicie dana wzbudza tu inną siłę, która jest od niej samej większą, wyprężenie bowiem zawieszenia $A\ C$ jest trzy razy większe, aniżeli wyprężenie drutu pionowego, które je wywołało.

40. Ale w jakich warunkach pozostaje pręt $B\ C$? Jest on oczywiście naciskany ku dołowi na połączeniu stawowem przy B, znajduje się przeto w stanie nacisku, czyli jest podporą. Okazuje się to wyraźnie, jeżeli przypuścimy na chwilę, że pręt ten zastąpić zamierzamy sznurem lub łańcuchem; pomysł taki jest oczywistą niedorzecznością, całe bowiem urządzenie zapadłoby się natychmiast. W warunkach obecnych ciężar 20 funtów

rozkłada się tedy na dwie inne siły, z których jednej przeciwdziała zawieszenie, drugiej zaś podpora.

41. Nie posiadamy sposobu uwidocznienia wielkości ciśnienia, jakie działa na podporę, okażemy jednak, że można je obliczyć za pomocą równoległoboku sił, a to nam wyjaśni, jak to się dzieje, że zawieszenie *A C* wyprężone jest siłą trzy razy większą, aniżeli ciężar użyty. Z punktu (fig. 18) poprowadźmy linię równoległą

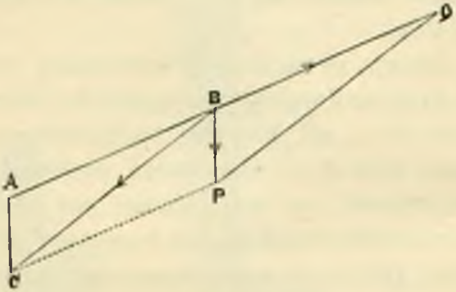

Fig. 18.

do zawieszenia *A C*, dalej linię *P Q* równoległą do podpory *B C*, a wtedy linia *B P* jest przekątnią równoległoboku, którego boki są równe liniom *B C* i *B Q*. Jeżeli więc przyjmiemy, że linia *B P* przedstawia nam siłę 20 funtów, wtedy dwie siły, na które jest rozłożona, uwidocznione są przez linie *B Q* i *B C*. Ale linia *A B* jest równa *B Q*, ponieważ każda z nich równa się linii *C P*, a podobnież linia *B P* równa się linii *A C*. Skoro więc ciężar 20 f. przedstawiony będzie przez linię *A C*, ciśnienie, jakiemu ulega zawieszenie przedstawione jest przez długość *A B*, a ciśnienie, jakiemu ulega podpora, przez długość *B C*. Ponieważ zaś, jak sobie przypominamy, *A B* ma 3' długości, *C B* 3'6", a *A C* 1', wypływa ztąd, że ciśnienie na zawieszenie wynosi 60 f., a na podporę 70 f., gdy ciężar 20 f. zawieszony jest na haku.

42. W każdym innym przypadku ciśnienia, wywarte na zawieszenie i na podporę, mogą być również oznaczone, gdy znamy wielkość ciężaru zawieszonego, a to dla proporcyonalności swej do trzech boków krójkąta, utworzonego z zawieszenia, z podpory i ze słupa pionowego.

43. Przyrząd ten przypomina nam budowę żórawia, najistotniejszej jednak części, w jaką zaopatrzony jest żóraw' do podnoszenia i opuszczania ładunków, tu nie widzimy. Wrócimy do niego znowu w jednym z następnych wykładów (us. 332). Poznaliście wszakże naocznie, że urządzenie, któreśmy tu rozważali, jest zgoła różne od łańcucha, służącego do podnoszenia ciężarów.

44. Pojmujemy łatwo jakiej wagi dla inżyniera są wskazówki, które za pomocą równoległoboku sil otrzymać może. Tak w szczególności, zatrzymując się na prostym przypadku, który nas dotąd zaprzątał, dajmy, że inżynier wystawić ma budowlę, która dźwigać winna 2240 f., i zobaczmy, w jaki sposób zdoła on oznaczyć ciśnienie na zawieszenie i na podporę. Jest bowiem rzeczą niezbędną przy projektowaniu jakiejkolwiek budowli, by żadna jej część nie była zbytecznie mocną, w tym bowiem razie zużytoby zbyt wiele materyału, co znów podniosłoby nadmiernie nakład, ale ważniejszą daleko jest rzeczą baczyć, by każda część była dostatecznie silną dla usunięcia możliwości wypadku, nietylko w warunkach

zwyczajnych, ale także przy wyjątkowo silnych uderzeniach i wstrząśnieniach, na które wystawioną jest każda maszyna.

45. Dajmy, że zatrzymujemy też same stosunki liczebne, jakie użyte były powyżej; ciśnienie więc wywarte na zawieszenie wynosić będzie 6720 f., gdy ciężar czyni 2240 f., zawieszenie zatem być musi co najmniej tak mocnem, by znosić mogło wstrząśnienie 6720 f.; zazwyczaj jednak w dobrych robotach inżynierskich buduje się maszynę dziesięć razy mniej więcej mocniejszą, aniżeliby wystarczyło do utrzymania zwykłego obciążenia. Belka zatem do zawieszenia służąca, powinna być tak wytrzymałą, aby się nie przełamała przy wyprężeniu dochodzącem do 67200 f., które ma miejsce, gdy żóraw' dźwiga 22400 f. Tak znaczny stopień bezpieczeństwa jest niezbędny, w przewidywaniu uderzeń lub innych gwałtownych wstrząśnień, jakie zachodzić mogą przy podnoszeniu lub opuszczaniu wielkich ciężarów. Jeżeli więc żóraw' służyć ma do podnoszenia 2400 f., inżynier winien zastosować zawieszenie, któreby się mogło rozerwać na dwoje dopiero działaniem ciężaru niemniejszego nad 72000 f. Próby rzeczywiście przeprowadzone wykazały, że pręt z żelaza kutego, wyborowego gatunku, mający cal kwadratowy w przecięciu, oprzeć się jeszcze może obciążeniu 4480 f. A zatem piętnaście takich prętów, lub też jeden pręt, mający w przecięciu piętnaście cali kwadratowych, będzie właśnie w stanie oprzeć się 72000 f.; taką przeto powierzchnię posiadać winno przecięcie pręta, który użytym być może jako zawieszenie dla rozważanego żórawia.

46. Podobnąż drogą oznaczymy nacisk, jaki podporę pochyła ku dołowi; wynosi on 84000 f., podpora ta zatem winna być dziesięć razy mocniejsza, aniżeli słup, załamujący się pod ciśnieniem 84000 f.

47. Łatwo widzieć możemy z figury, że pręt *A C*, stanowiący zawieszenie, ciągnie słup *A B*, a zatem dąży ostatecznie do przełemania jej w miejscu bliskiem punktu *B*. Jest przeto rzeczą niezbędną, by podpora pionowa była bardzo silnie zabezpieczona.

WYKŁAD III.

Siły równoległe.

Wstęp. — Ciśnienie belki obciążonej na jej podpory. — Równowaga pręta opartego na nożu. — Skład sił równoległych. — Siły równoległe działające w kierunkach przeciwnych, — Para sił. — Waga.

WSTĘP.

48. Równoległobok sił daje nam możność wynajdywania wypadkowej dwu sił, które się ze sobą przecinają; ale ponieważ siły równoległe ze sobą się nie przecinają, równoległobok sił nie prowadzi do oznaczenia wypadkowej dwu sił równoległych. Możemy wszakże wypadkową tę wynaleźć bardzo prosto innemi sposobami.

49. Fig. 19 przedstawia pręt drewniany, na 4' długi, podtrzymywany na dwu podporach *A* i *B* i podzielony

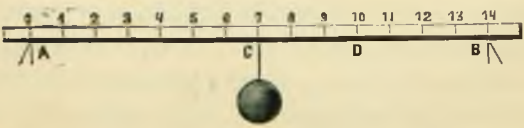

Fig. 19.

w odstępie *A B* na 14 równych części. Zawieśmy ciężar 14 f. na pręcie tym w środkowym jego punkcie *C;* ładunek ten musi być dźwigany przez podpory, a jest nadto rzeczą widoczną, że dźwigają go one w równych częściach, ciężar bowiem znajduje się w środku pręta, a nie ma powodu, dla którego jeden koniec pozostawałby w warunkach odmiennych, aniżeli koniec drugi. Ztąd więc całkowite ciśnienie na każdą podporę czyni 7 f., do czego dodać należy połowę ciężaru belki drewnianej.

50. Jeżeli ciężar 14 f. umieszczony jest, nie w połowie pręta, ale w którymkolwiek innym punkcie *D*, nie można już tak łatwo wnieść, w jakim stosunku ciężar rozkłada się na obie podpory. Pojąć możemy wprawdzie łatwo, że podpora bliższa ciężaru dźwigać musi więcej, aniżeli dalsza, ale ile więcej? Gdybyśmy mogli na pytanie to odpowiedzieć, pojmujemy, że doprowadziłoby nas to do znajomości rozkładu sił równoległych.

Ciśnienie belki obciążonej na jej podpory.

51. Do zbadania tej kwestyi użyjemy przyrządu, przedstawionego na fig. 20 (str. 50). Pręt żelazny, długości 5'6", a ważący 10 f., spoczywa na hakach wag sprężynowych *A*, *C*, w sposób wskazany na figurze. Haki przypadają dokładnie w odległości 5' między sobą, tak, że pręt wysunięty jest poza nie o 3" na każdym końcu. Odstęp między hakami podzielony jest na dwadzieścia równych części, ka da z nich przeto ma 3" długości. Pręt jest dosyć wytrzymały, by, bez dostrzegalnego zgięcia, dźwigać mógł ciężar *B* 20 f., zawieszony na nim,

za pomocą haka mającego postać *S*. Przed zawieszeniem ciężaru 20 f. każda waga sprężynowa wskazywała

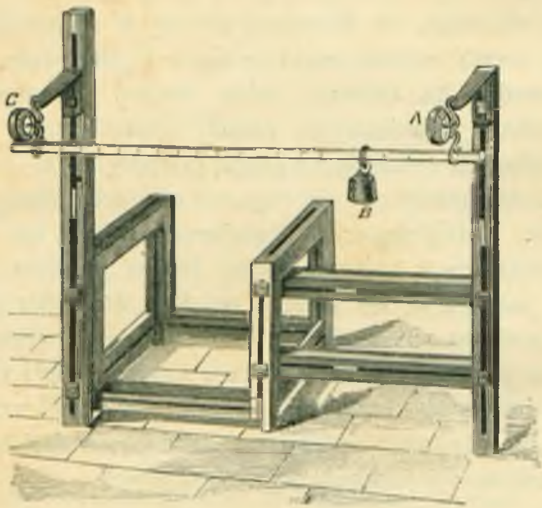

Fig. 20.

ciśnienie 5 f. Mogliśmy to przewidzieć, skoro bowiem pełny ciężar pręta wynosi 10 f., winien być podtrzymywany jednakowo przez obie podpory.

52. Gdy umieścimy ciężar w środku pręta, w odległości 10 podziałek od każdego końca, zobaczymy, że każda waga wskazuje 15 funtów. Ale 5 f. przypada na ciężar samegoż pręta, a zatem ciężar 20 f. dzieli się na części równe, co być powinno, jak to uzasadniliśmy już wyżej. Przesuńmy jednak te 20 f. do jakiegokolwiek innego punktu, dajmy na 4 podziałki od prawego, a 16

od lewego końca, a wtedy waga po prawej stronie wskaże nam 21 f., waga zaś po lewej stronie 9 f. Aby usunąć ciężar samego pręta, winniśmy od każdej z powyższych liczb odjąć 5 f. Dowiadujemy się więc stąd, że ciężar 20 f. wypręża wagę sprężynową po prawej stronie ciśnieniem 16 f., wagę zaś po stronie lewej ciśnieniem 4 f. Rozpatrzmy to bliżej. Dobraliśmy liczbę podziałek pręta tak, by wyrównywała liczbie funtów zawieszonego na nim ciężaru; przekonywamy się zaś, że gdy ciężar oddalony jest na 16 podziałek od końca lewego, ciśnienie 16 f. występuje na końcu prawym. Zarazem zaś ciężar oddalony jest o 4 podziałki od końca prawego, a na końcu lewym występuje ciśnienie 4 funtów.

53. Prawo rozkładu ciężaru wyrazimy nieco ogólniej, a przekonamy się za pomocą naszego pręta, że prawo to utrzymuje się we wszystkich przypadkach. *Podziel pręt na tyle równych części, ile funtów ma ciężar, a wtedy ciśnienie w funtach wywarte na jeden koniec, wyrównywa liczbie podziałek, o jaką ciężar oddalony jest od końca drugiego.*

54. Tak naprzykład, dajmy, że ciężar umieszczony jest o 2 podziałki od jednego końca, — waga sprężynowa na tym końcu wskazuje nam 23 f., co po odjęciu 5 f. na ciężar pręta, daje 18 f. jako ciśnienie zależne od ciężaru zawieszonego, a ciężar ten jest właśnie o 18 podziałek oddalony od końca drugiego. Podobnież sprawdzić możemy tę regułę, jakiekolwiek zajmowałby położenie ciężar.

55. Jeżeli ciężar umieszczony jest między dwiema kreskami, zamiast, jak to dotąd przyjmowaliśmy, dokła-

dnie na samejże kresce, rozkład ładunku zachodzi według tegoż samego prawa. Gdyby, dajmy, oddalony był o 3,5 podziałki od jednego końca, ciśnienie na końcu drugim czyniłoby 3,5 f., a podobnież i w każdym innym przypadku.

56. W taki sposób wykryliśmy drogą doświadczalną użyteczne to i nauczające prawo przyrody; tenże sam rezultat możnaby wyprowadzić rozumowaniem z zasady równoległoboku sił, dowód wszakże czysto doświadczalny metodzie naszej lepiej odpowiada. Nauka o składzie sił równoległych jest jedną z najbardziej zasadniczych części mechaniki i będziemy mieli nieraz sposobność stosowania jej, zarówno w obecnym jak i w następnych wykładach.

57. Wróćmy teraz do fig. 19, od której rozpoczęliśmy, a prawo przez nas poznane da nam możność wykrycia, jak ciężar jest rozłożony. Dzielimy długość pręta między podporami na 14 równych części, ciężar bowiem wynosi 14 f.; jeżeli zatem ciężar jest w punkcie *D*, w odległości 10 podziałak od jednego końca *A*, a 4 od drugiego *B*, ciśnienie na odpowiednich końcach wynosi 4 i 10. Gdyby ciężar przypadał w oddaleniu 2,5 podziałek od jednego końca, a zatem 11,5 od drugiego, części ładunku podtrzymywane na końcach wynosiłyby 11,5 f. i 2,5 f. Istotne ciśnienie, podtrzymywane na każdym końcu, jest jednakże o kilkanaście łutów większe, pod uwagę bowiem brać należy i ciężar samegoż pręta drewnianego.

58. Zawieśmy drugi ciężar w innym punkcie pręta. Należy nam teraz obliczyć ciśnienia, jakie każdy cię-

żar oddzielnie na końce wywiera, ciśnienia na ten sam koniec wywarte dodać do siebie, a sumy te, wraz z połową jeszcze ciężaru pręta, dadzą nam ciśnienia całkowite. Tak, dajmy, że jeden ciężar 20 f. znajduje się we środku, a drugi 14 f. w odległości 11 podziałek od jednego końca; w takim razie ciężar środkowy wytwarza 10 f. na każdym końcu, ciężar zaś 14 f. wytwarza 3 f. i 11 f.; biorąc więc pod uwagę i ciężar pręta, otrzymujemy całkowite ciśnienia na końce: 13 f. 16 łutów i 21 f. 16 łutów. Też same oczywiście zasady stosują się i w przypadku, gdy kilka działa ciężarów, a zastosowanie tej reguły jest zwłaszcza ułatwionem, gdy wszystkie ciężary są równe, wtedy bowiem jednakie podziały pręta służą do obliczania skutków każdego ciężaru.

59. Zasady rozwinięte w tych obliczeniach są tak znacznej wagi, że należy nam rozebrać je innemi jeszcze metodami, które prowadzą do wielu ważnych zastosowań.

Równowaga pręta opartego na ostrzu.

60. Ciężar pręta wikłał dotąd nieco nasze rachunki, rezultaty okazałyby się prościej, gdybyśmy ciężar jego usunęli; ponieważ jednak posługiwać się musimy prętem wytrzymałym, ciężar jego nie jest tak drobnym, by go zupełnie pominąć można było. Ale za pomocą urządzenia wskazanego na fig. 21 (str. 54) ciężar pręta zrównoważyć możemy. Do środka pręta przywiązany jest sznur, który przechodzi w górze przez blok nieruchomy i na drugim swym końcu opatrzony jest w hak. Dajmy, że pręt jest z drzewa sosnowego, ma 4' długości i 1 cal kwadratowy

w przecięciu, waży zaś około 28 łutów; jeżeli zatem zawiesimy na haku ciężar 28 łutów, pręt będzie zrównoważonym i utrzyma się, w jakiejkolwiek wysokości zostanie umieszczony.

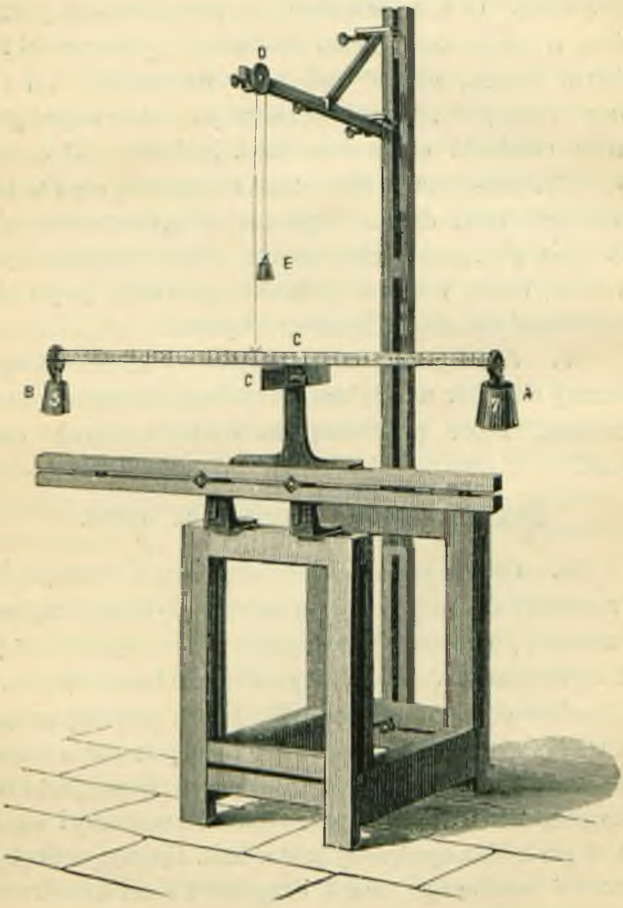

Fig. 21.

61. Pręt $A B$ podzielony jest kreskami, nakreślonemi na nim w odległości 1" jedna od drugiej, posiada tedy 48 podziałek. Ciężary, jakich używamy, opatrzone są w pierścienie dostatecznie wielkie, by można je było wzdłuż pręta przesuwać, a tem samem umieszczać w żądanem położeniu.

62. Poniżej pręta znajduje się ważna część urządzenia, a mianowicie *nóż C*. Jest to tępy nóż stalowy, silnie przytwierdzony do podpory, która go podtrzymuje. Podpora ta przesuwana być może poniżej pręta, tak, że ostrze noża może być umieszczonem pod którąkolwiek podziałkę żądaną. Gdy pręt jest zrównoważony, ale jeszcze nieobciążony, obniżamy go tak dalece, by właśnie noża dotykał; utrzyma się wtedy w położeniu poziomem i położenie to zachowa, czy to ostrze przypada pod którąkolwiek kreską, czy też w jakiemkolwiek położeniu pośredniem. Zawieszając teraz ciężary na końcach pręta, przekonamy się, że dla każdych dwu ciężarów istnieje jedno takie położenie, że gdy w niem ostrze jest umieszczone, utrzymuje ono pręt w położeniu poziomem. Rozbierzemy następnie, jaka zachodzi zależność między temi odległościami a ciężarami zawieszonemi i rozważymy związek rezultatów tej metody z rezultatami, osiągniętemi z urządzenia poprzedniego.

63. W przypuszczeniu, że na każdym końcu belki zawieszono 6 f., łatwo przewidzieć możemy, że ostrze umieszczone być winno we środku, a przewidywania nasze potwierdzają się rzeczywiście. Jeżeli ostrze przypada dokładnie we środku pręta, pozostaje on poziomym; ale gdy je przesuwamy, choćby o odległość nader drobną,

w którąkolwiek stronę, pręt pochyla się natychmiast po stronie przeciwnej. Ostrze odległe jest o 24 cale od każdego końca; pomnóżmy liczbę tę przez liczbę funtów ciężaru, w obecnym przeto przypadku przez 6, a otrzymamy na iloczyn 144, jednaki dla obu końców pręta. Doniosłość tej uwagi zaraz poznamy.

64. Usuwam jeden z ciężarów 6 funtowych i zastępuję go 2 funtami, pozostawiając zarówno drugi ciężar jak i ostrze nienaruszone, a pręt obniża się natychmiast po stronie ciężaru większego; przesuwając wszakże ostrze wzdłuż pręta, dostrzegamy, że gdy przypada ono w odległości 12 cali od 6 f., a zatem w odległości 36 cali od 2 f., pręt odzyskuje położenie poziome. Ostrze winno być umieszczone dokładnie w należytem miejscu; ćwierć cala w jednę lub drugą stronę sprowadzi już przechylenie pręta. Pełny ciężar, podtrzymywany przez ostrze, wynosi obecnie 8 f., co jest sumą obu ciężarów zawieszonych. Pomnóżmy 2, t. j. liczbę funtów na jednym końcu, przez 36, t. j. odległość końca tego od ostrza, a otrzymamy iloczyn 72; tenże sam zaś zupełnie iloczyn otrzymamy, mnożąc 6, t. j. liczbę funtów na drugim końcu, przez 12, t. j. odległość ich od ostrza. Aby rezultat ten wysłowić treściwie, wprowadzimy wyraz *moment*, który to termin często się w mechanice używa. Ciężar 2 f. stanowi siłę, usiłującą przechylić koniec pręta ku dołowi, wywołując obrót jego dokoła ostrza. *Iloczyn tej siły przez odległość jej od ostrza nazywa się momentem siły.* Osiągnięty tedy rezultat wyrazić możemy krótko, mówiąc, że gdy ostrze zostało umieszczone tak, by pręt utrzymywał się w położeniu poziomem, *momenty sił względem ostrza są równe.*

65. Wykazać możemy dalej to prawo, zawieszając ciężary 7 f. i 5 f. na końcach pręta; zobaczymy wtedy, że ostrze umieścić należy w odległości 20 cali od ciężaru większego, a zatem 28 cali od mniejszego, ale $5 \times 28 = 140$ i $7 \times 20 = 140$, co znów potwierdza prawo równości momentów.

Z zasady równości momentów możemy też wyprowadzić prawo rozkładu ciężarów, podane w ust. 53.

Tak mianowicie, przyjmując warunki powyższe, wskazane na fig. 21, mamy ciężary 7 f. i 5 f., które sprowadzają ciśnienie $7 + 5 = 12$ f. na ostrze. Ostrze to ciśnie na pręt z oddziaływaniem równem i wręcz przeciwnem. Aby ocenić rozkład ciśnienia tego na końce belki, dzielimy całą belkę na 12 równych części, każda po 4 cale, a ciężar 7 f. odległy jest od podpory o 5 takich części, t. j. o 20 cali. Ostrze przeto oddalone być winno o 20 cali od ciężaru większego, co właśnie jest warunkiem zawartym w zasadzie równości momentów.

Skład sił równoległych.

66. Poznawszy przedmiot doświadczalnie, rozpatrzymy teraz, czego się można nauczyć z osiągniętych rezultatów.

Ponieważ ciężar belki może być uwzględnionym w sposób wyżej podany, przez odjęcie połowy jego od każdego z ciśnień wskazanych przez wagi sprężynowe (fig. 20), możemy go tedy pominąć. Skoro wagi pociągane są ku dołowi przez belkę, gdy jest obciążoną, oddziaływają one przeto, pociągając belkę w górę. Staje się to oczywistem, jeżeli wyobrazimy sobie ciężar — dajmy 14 f. — zawieszony na takiej wadze; utrzymuje się on w spoczynku, a ponieważ wciąż jest pociągany ku dołowi, musi być przeto równoważony przez równą mu siłę, pociągającą go w górę. Waga wskazuje obecnie 14 f., sprężyna przeto wywiera siłę działającą w górę, a która jest zupełnie równa sile, z jaką jest sama ku dołowi pociąganą.

67. Sprężyny wywierają tedy na końce pręta siły, pociągające go w górę, a wielkości tych sił odczytujemy na podziałkach. Pręt jest zatem poddany trzem siłom, a mianowicie — zawieszonemu ciężarowi 20 f., który działa pionowo ku dołowi, jako też dwom innym siłom, działającym pionowo w górę, połączone zaś działanie wszystkich trzech sprowadza równowagę.

68. Nakreślmy linie, przedstawiające siły w sposób wyżej przyjęty. Mamy więc trzy siły równoległe, *AP*, *BQ*, *CR*, działające na pręt w równowadze (fig. 22). Dwie siły *AP* i *BQ* uważać możemy, jako zrównoważone przez siłę *CR* w położeniu wskazanem na figurze, ale siłę *CR* równoważy także równa jej i wręcz przeciwna siła *CS*, przedstawiona przez linię kropkowaną. Ostatnia ta zatem siła równoważna jest siłom *AP* i *BQ*, co innemi słowy znaczy, że jest ich wypadkową. Dowiadujemy się ztąd tedy, że dwie siły ró-

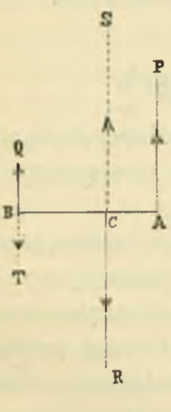

Fig. 22.

wnoległe, działające w tym samym kierunku, mogą być złożone w jednę siłę wypadkową.

69. Widzimy więc, że wielkość wypadkowej równa się sumie wielkości sił, dalej zaś oznaczyć możemy położenie według następującej reguły. Dodaj obie siły, a odległość między niemi podziel na tyle równych części, ile się jedności zawiera w sumie; poczynając zaś od większej z dwu tych sił, odetnij tyle tych części, ile funtów zawiera siła mniejsza, a to da położenie punktu szukanego. Reguła ta wyprowadzoną być może bardzo łatwo z reguły, której nas nauczyły doświadczenia ust. 51.

Siły równoległe działające w strony przeciwne.

70. Skoro siły $A P$, $B Q$, $C R$ (fig. 22) pozostają w równowadze, wypływa ztąd, że jednę z nich, $B Q$ dajmy, uważać możemy jako równoważącą, w położeniu przez nią zajętem, dwie siły $A P$ i $C R$ w ich położeniach. To nasuwa nam na myśl przykłady liczebne, które rozbieraliśmy poprzednio, a w których siła jedna równoważyła dwie siły większe; w przypadku obecnym siły $A P$ i $C R$ działają w strony przeciwne, a równoważąca je siła $B Q$ równa się ich różnicy. Siła $B T$, równa i wręcz przeciwna sile $B Q$, być musi tedy wypadkową sił $C R$ i $A P$, ponieważ zdatną jest do sprowadzenia tegoż samego skutku. Zwrócić winniśmy nadto uwagę, że w przypadku tym wypadkowa dwu sił nie znajduje się między niemi, ale przypada zewnątrz siły większej. Jeżeli siły działają w też samą stronę, wypadkowa jest zawsze pomiędzy niemi.

71. Właściwe położenie, jakie zajmuje wypadkowa dwu przeciwnych sił równoległych, wynajduje się za pomocą następującej reguły. Podziel odległość między siłami na tyle równych części, ile jedności zawiera się w ich różnicy, a następnie odetnij od punktu przyczepienia siły większej na zewnątrz tyle tych części, ile funtów ma siła mniejsza; punkt w ten sposób oznaczony wskazuje położenie wypadkowej. Tak np., jeżeli siły wynoszą 14 i 20, różnica między niemi czyni 6, odległość przeto między ich kierunkami dzielimy na sześć części; od punktu przyczepienia siły 20, odcinamy 14 części na zewnątrz, a tym sposobem oznaczone jest położenie wypadkowej. Posiadamy więc możność składania dwu sił równoległych w ogólności.

Para sił.

72. W jednym wszakże przypadku dwie siły równoległe wypadkowej nie mają; zachodzi to, gdy dwie takie siły są równe i działają w strony przeciwne. Dwie tego rodzaju siły nazywają się *parą sił*, a taka para sił nie może być zrównoważoną przez jednę siłę, — zrównoważyć ją może jedynie inna para sił, działająca w sposób przeciwny. Szczególny ten przypadek może być zbadany za pomocą urządzenia, wskazanego na fig. 23 (str. 61).

Do pręta drewnianego AB, mającego wymiary 48" × 0,5", × 0,5", przywiązane są sznury w punktach A i D, odległych między sobą na jednę stopę. Sznur przyczepiony w D przechodzi w górze przez blok nieruchomy E, na końcu zaś zaopatrzony jest w hak, by można było na nim umieszczać ciężary, a podobnyż hak zawieszony jest i na sznurze A; ciężar samego pręta, wynoszący zaledwie do dziesięciu łutów, może być pominięty, jest bowiem

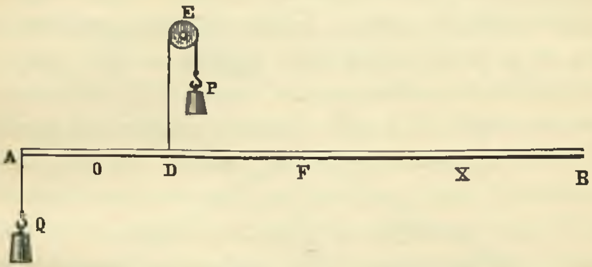

Fig. 23.

bardzo drobny w porównaniu z ciężarami, jakiemi posługiwać się będziemy.

73. Dajmy, że 2 f. zawieszone są na haku P, a 1 f. na haku Q; mamy tu tedy dwie siły równoległe, działające w strony przeciwne, a że różnica ich czyni 1 f., wypada przeto z poprzednio podanej reguły, że punkt F, jeżeli odległość $D\ F$ jest równa $A\ D$, jest punktem przyczepienia wypadkowej. Sprawdzić to możemy łatwo, jeżeli bowiem opieram palec swój na pręcie w punkcie F, utrzymuje się on w położeniu poziomem i pozostaje w równowadze; gdy tymczasem, jeżeli przesuwam palec swój w jednę lub drugą stronę, równowaga jest niemożebna. Gdy

przesuwam go ku końcowi B, koniec A wznosi się w górę; gdy go przesuwam ku A, podnosi się koniec B.

Aby rozpatrzeć przypadek, gdy obie siły są równe, umieśćmy ciężar 2 f. na każdym haku P i Q, a przekonamy się, że w żadnym punkcie pręta nie można palca umieścić tak, by równowagę tego pręta utrzymać. Wskazuje to, że siła pojedyncza nie może zrównoważyć dwu sił, stanowiących parę. Niech O będzie punktem położonym na połowie odległości między A i D. Siły dążą tu widocznie do podźwignięcia części $O\,B$ i do obrócenia ku dołowi części $O\,A$; gdy wszakże staram się powstrzymać $O\,B$, umieszczając palec ponad prętem, dajmy, w punkcie X, pręt zaczyna się natychmiast obracać dokoła X, tak, że część od A do X pochyla się ku dołowi. Również bezskutecznem jest usiłowanie powstrzymania ruchu, gdy palec umieszczamy poniżej pręta. Ale gdy współcześnie naciskam pręt ku dołowi w jednym punkcie, a ku górze w innym, odpowiednią siłą, udaje mi się sprowadzić równowagę; w przypadku tym oba ciśnienia stanowią parę sił, a ta właśnie para sił znosi parę utworzoną z ciężarów. Poznajemy ztąd ten ważny rezultat, że *para sił zrównoważoną być może przez parę sił*, i li tylko przez parę.

75. Momentem pary jest iloczyn jednej z dwu równych sił przez ich prostopadłą odległość. Dwie pary sił, zmierzające do obracania w *tęż samą* stronę ciała, na które działają, są równoważne, jeżeli momenty ich są równe. Dwie pary, zmierzające do obrócenia ciała w strony *przeciwne*, będą w równowadze, jeżeli momenty ich

są równe. Możemy przeto pary, działające w tęż samą lub w przeciwne strony, składać w jednę parę sił, której moment jest bądź sumą, bądź różnicą momentów pierwotnych.

Waga.

76. Inny jeszcze przyrząd, który nam daje sposobność rozpatrywania natury sił równoległych, wskazuje nam fig. 24. Przyrząd ten składa się z lekkiej ramy

Fig. 24.

drewnianej *A B C*, mającej 4' długości; przy *E* przymocowane są do tej ramy dwa ostrza stalowe, opierające się na dwu podporach stalowych, z których jednę *O F* widzimy na figurze. Gdy ostrza są należycie umieszczone; belka utrzymuje się w równowadze, tak, że niewielki skrawek papieru, umieszczony w A, sprowadza pochylenie tej strony.

77. W punktach A i B zawieszamy dwa małe haki, wyrobione z cienkiego drutu, by ciężar ich można było z uwagi usunąć. Za pomocą przyrządu tego sprawdzić możemy przedewszystkiem równość momentów; tak naprzykład, jeżeli haczyk A umieszczamy w odległości 9'' od środka O i obciążamy go 1 funtem, przekonywamy się, że gdy haczyk B dźwiga 0,5 funta, należy go osadzić w odległości 18'' od O, by zrównoważyć A; moment po jednej stronie czyni 9×1, po drugiej $18 \times 0,5$, są więc rzeczywiście równe.

78. Dajmy, że na każdym z obu haków zawieszony jest ciężar 1 f.; rama wtedy w tym tylko razie utrzymuje się w równowadze, gdy oba haki znajdują się dokładnie w jednakiej od środka odległości. Znane zastosowanie tej zasady przedstawia nam zwyczajna waga; rama, która w tym razie ma nazwę *belki*, podtrzymywana jest przez dwa ostrza, mniejsze wszakże aniżeli ostrza E, przedstawione na figurze. Szalki P P zawieszone są na końcach belki i winny przypadać w jednakich od jej środka odległościach. Szalki te posiadać muszą nadto równy cieżar, a wtedy, gdy umieszczamy na nich równe ciężary, belka pozostaje w położeniu poziomem. Jeżeli w jednej z nich ciężar choćby cokolwiek jest większy aniżeli w drugiej, szalka zawierająca ciężar znaczniejszy natychmiast się obniża.

Aby waga dawała rezultaty należyte, posiadać trzeba dokładne ciężarki czyli gwichty; ale przy dokładnych nawet ciężarkach rezultaty będą fałszywe jeżeli waga błędnie jest zbudowana. Błąd taki wypływa często ztąd, że ramiona belki są nieco nierówne. Jeżeli to ma miejsce, dwa rzeczywiście równoważące się ciężary nie są równe. Dajmy, naprzykład, że za pomocą wagi niedokładnej zamierzam zważyć funt szrutu. Jeżeli kładę gwichty po stronie krótszej, wtedy ilość odważonego szrutu jest mniejsza aniżeli 1 funt; jeżeli zaś gwicht jednofuntowy umieszczam po stronie dłuższej, trzeba będzie użyć więcej aniżeli 1 f. szrutu dla sprowadzenia równowagi. To daje nam łatwy sposób sprawdzania dokładności wagi. Na szalki kładziemy ciężary, które się nawzajem równoważą; jeżeli następnie ciężary te przełożymy, a waga pomimo to pozostaje poziomą, jest dokładną.

80. Dajmy, naprzykład, że z dwu ramion belki jedno ma 10 cali, a drugie 11 cali długości; w takim razie, jeżeli w szalce na stronie 10-o calowej umieścimy ciężar 1 funta, moment jego uczyni 10, a jeżeli w szalce, zawieszonej na ramieniu 11 calowem, umieścimy $^{10}/_{11}$ funta, moment uczyni tu również 10; 1 funt zatem na ramieniu krótszem równoważy $^{10}/_{11}$ funta na ramieniu dłuższem. Gdy tedy kupiec umieszcza gwichty swoje na ramieniu krótszem, nabywcy tracą $^{1}/_{11}$ część każdego funta, za który płacą. Gdy zaś natomiast kupiec umieści swój gwicht 1-funtowy na ramieniu dłuższem, nałożyć musi nie mniej nad $^{11}/_{10}$ funta na szalkę, zawieszoną na ramieniu krótszem; a zatem w tym razie nabywca otrzymywałby o $^{1}/_{10}$ funta zawiele. Wypada ztąd, że

gdyby kupiec umieszczał ciężary swe naprzemian na szali jednej i na drugiej, ponosiłby ostatecznie stratę; a to dlatego, że chociaż każdy drugi nabywca otrzymuje o $^1/_{11}$ funta mniej, aniżeli mu się należy, inni jednak dostają o $^1/_{10}$ funta więcej nad ilość, za jaką zapłacili.

WYKŁAD IV.

Siła ciężkości.

Wstęp. — Ciężar właściwy. — Libela. — Środek ciężkości. — Równowaga stała i niestała. — Własność środka ciężkości w kole wirującem.

WSTĘP.

81. W poprzednich trzech wykładach rozważaliśmy siły w ogólności; widzieliśmy, jak można je przedstawiać przez linie proste, jak się składają ze sobą i jak się rozkładają na inne; wyjaśniliśmy, co należy rozumieć przez siły pozostające w równowadze, poznaliśmy przykłady sił przypadających na jednej płaszczyźnie lub w płaszczyznach różnych, sił przecinających się i równoległych między sobą. Przedmioty te stanowią zasadnicze pojęcia mechaniki; tworzą one rusztowanie, które w tym i w następnych wykładach postaramy się przedstawić w sposób bardziej zajmujący. Przedewszystkiem zaś zajmiemy się badaniem najważniejszej siły przyrody, siły bezustannie działającej i której wszystkie ciała są podda-

ne, siły, której odległość unicestwić nie może, a której własności doprowadziły do najwspanialszych odkryć umysłu ludzkiego. Jestto siła ciężkości.

82. Gdy wypuszczam kamień z ręki, pada on na ziemię. To, co wywołuje ruch, jest siłą; kamień zatem musiał być poddany działaniu siły, która pociąga go na ziemię. W każdem miejscu na powierzchni ziemi doświadczenie uczy, że ciała dążą do spadku. Objawy te świadczą, że istnieje w ziemi siła przyciągająca, która dąży do poruszenia ku niej wszystkich ciał.

83. Niech *A B C D* (fig. 25) będą punkty, z których kamienie spadają, a koło niech przedstawia prze-

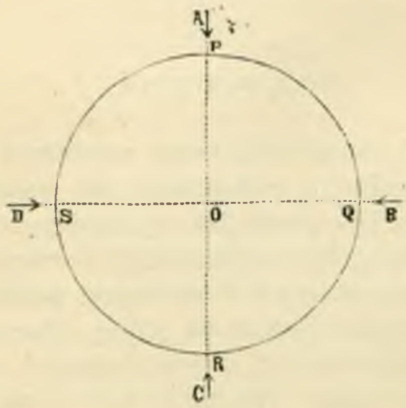

Fig. 25.

cięcie ziemi; niech *P Q R S* będą dalej punkty, na które kamienie spadną, jeżeli ruchowi temu uledz będą mogły. Cztery te kamienie poruszą się w kierunku strzałek; od

A do *P* kamień porusza się w kierunku przeciwnym ruchowi od *C* do *R*; od *B* do *Q* porusza się od strony prawej ku lewej, gdy tymczasem od *D* do *S* porusza się od lewej ku prawej. Ruchy zachodzą więc w różnych kierunkach; ale gdy kierunki te przedłużymy, jak to wskazują linie kropkowane, każdy z nich przechodzi przez środek *O*.

84. Każdy zatem kamień w spadku porusza się ku środkowi ziemi, co wskazuje, że taki jest kierunek siły. Przyjęliśmy poprzednio, że ziemia wywiera przyciąganie na kamień, wskutek czego stara się on jak najbardziej zbliżyć do środka ziemi, a przyciąganie to nazywa się siłą ciążenia.

85. Jesteśmy tak dalece oswojeni ze zjawiskiem spadku ciał, że nie wywołuje ono zgoła naszego zdziwienia, ani nie podsyca ciekawości naszej. Uderzenie piorunu, na które każdy z nas zwraca uwagę, dlatego, że jest zjawiskiem rzadkiem, w istocie rzeczy nie jest zgoła osobliwszem. Przyglądamy się często z zajęciem przyciąganiu bryłki żelaza przez magnes, i słusznie, zjawisko to bowiem jest bardzo ciekawe, a wszakże spadek kamienia powodowany jest przez siłę potężniejszą i daleko ważniejszą aniżeli siła magnetyzmu.

86. Siła ciężkości jest przyczyną ciężaru ciał. Trzymam w swej ręce kawałek ołowiu, — ciężkość dąży do posunięcia go ku dołowi, a to sprowadza na rękę mą ciśnienie, które nazywam *ciężarem*. Ciężkość działa ze zmiennem nieco natężeniem w różnych punktach powierzchni ziemi. Zależy to od dwu przyczyn, z których jednę tu wymienimy, gdy drugą zajmiemy się następnie.

Ziemia nie jest doskonale kulistą, ale jest nieco spłaszczoną pod biegunami; ciało zatem na biegunach jest bliższe względem ogólnej masy ziemi, aniżeli ciało na równiku, a stąd ciało na biegunie jest silniej przyciągane, tem samem tedy cięższe. Bryła, ważąca 200 f. na równiku, waży o jeden funt więcej na biegunie; trzecia część mniej więcej tego przyrostu zależy od przyczyny, o której teraz mówimy (Ob. wykład XVII).

87. Ciężkość jest siłą, która przyciąga każdą cząstkę materyi; działa ona nietylko na te części ciała, które przypadają na jego powierzchni, ale ulegają jej zarówno i części wewnętrzne. Dowodzi tego dostrzeżenie, że ciało zachowuje ciężar jednaki, chociaż się postać jego przeinacza; tak naprzykład dajmy, że mamy kulę z kitu szklarskiego, ważącą 1 funt, a przekonamy się, że ciężar jej pozostanie niezmiennym, gdy kulę spłaszczymy w cienki krążek, jakkolwiek w tym ostatnim razie powierzchnia jej, a tem i liczba wierzchnich cząstek znacznie jest większa, aniżeli poprzednio.

Ciężar właściwy.

88. Ciężkość wywiera wpływ niejednaki na różne substancye. Wyrażamy to zwykle, mówiąc, że jedne substancye są cięższe aniżeli inne; tak naprzykład, mam tu bryłę drzewa i bryłę ołowiu jednakiej objętości. Ołów pociągany jest ku ziemi siłą większą, aniżeli drzewo. Różne substancye nazywamy pospolicie ciężkiemi, gdy toną w wodzie, a lekkiemi gdy po niej pływają. Ale ciało tonie w wodzie, jeżeli ciężar jego jest większy, ani-

żeli równa objętość wody, pływa zaś, jeżeli waży mniej. Stąd jest rzeczą naturalną, że obieramy wodę za substancyę, z którą porównywamy ciężary wszelkich innych substancyj.

Biorę pewną objętość, niech będzie, cal sześcienny żelaza lanego, który został dokładnie do celu tego wyrobiony. Sześcian ten jest cięższy, aniżeli cal sześcienny wody, oczywiście jednak inna, większa objętość wody dorównywa mu swym ciężarem; znaczy to, że pewna liczba cali sześciennych wody, a może wraz z pewną ułamkową częścią cala sześciennego, posiada dokładnie tenże sam ciężar, co cal sześcienny żelaza. Liczba ta nazywa się ciężarem właściwym żelaza lanego.

90. Niepodobna jest zrównoważyć wody z żelazem, nie trzymając jej w naczyniu, ciężar naczynia musiałby więc oddzielnie być oznaczonym. Obieram tedy inny plan doświadczenia. Posiadam tu pewną ilość cali sześciennych drzewa fig. 26 (str. 72); każdy z nich lżejszy jest wprawdzie aniżeli cal sześcienny wody, ale obciążyłem te sześciany drewniane przez osadzenie ziarn szrutu w otworkach, w drzewie wywierconych. Ciężar każdego sześcianu został następnie dokładnie uregulowany, by zupełnie wyrównywał ciężarowi cala sześciennego wody, o czem przekonać się można przez zważenie.

91. Ale i prostszą metodą sprawdzić można, że sześciany te posiadają ciężar takiż sam, jak równa im objętość wody. Jeżeli mianowicie sześcian taki wprowadzimy do wody, nie będzie on miał dążności do opadania ku dołowi, nie jest bowiem od wody cięższy, ani też, z drugiej strony, nie będzie miał dążności do wypły-

wania, nie jest bowiem od niej lżejszy; pozostawać przeto będzie w wodzie w każdem położeniu, w jakiem go umieścimy. Trudno jest wszakże podobny sześcian przygoto-

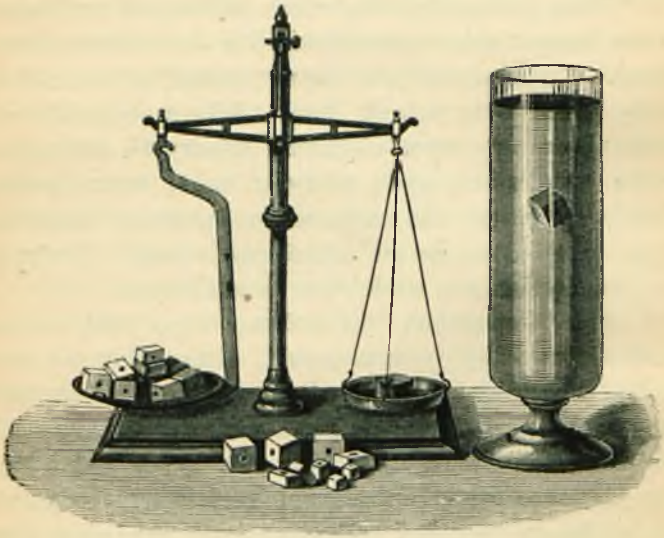

Fig. 26.

wać tak dokładnie, by celu tego dopiąć, a tem bardziej niepodobna utrzymać go w warunkach takich przez czas pewien, a to ze względu na zmiany temperatury i na pochłanianie wody przez drzewo. Wprowadzając jednak pewną zmianę, możemy sprawdzić, że w każdym razie sześciany nasze mają ciężar prawie równy ciężarowi takiejże samej objętości wody. Na fig. 26 widzimy wysoki słój szklany, napełniony cieczą z pozoru podobną do czystej wody, rzeczywiście wszakże złożoną w sposób następny. Najpierw wprowadziłem do słoju bardzo słaby roztwór soli w wodzie, który go w części zapełnił; następnie na roztwór ten nalałem ostrożnie pewną ilość czystej wody, a wreszcie górną część naczynia wypełniłem wodą, zawierającą nieco alkoholu, — roztwór soli jest cokolwiek cięższy od czystej wody, mieszanina zaś alkoholu z wodą cokolwiek lżejsza. Biorę teraz jeden z sześcianów drewnianych i opuszczam go ostrożnie do naczynia, — opada on przez mieszaninę alkoholu z wodą, a po kilku wachnięciach zatrzymuje się w warstwie pośredniej, jak to widzimy na figurze. Przekonywa nas to, że przygotowany nasz sześcian jest nieco cięższy aniżeli mieszanina alkoholu z wodą, a nieco lżejszy aniżeli roztwór soli w wodzie, co świadczy, że ciężar jego jest niewątpliwie nader bliski ciężaru wody czystej, która przypada między obu warstwami skrajnemi. — Posiadamy również pewną liczbę pół-sześcianów, ćwierć-sześcianów i ósmych części sześcianów, przygotowanych w tenże sam sposób, by ciężar ich wyrównywał ciężarowi jednakiej objętości wody.

92. Teraz mamy już tedy możność oznaczania ciężaru właściwego różnych ciał. Na jednę szalkę wagi kładziemy sześcian żelaza, a przekonywamy się, że dla zrównoważenia go użyć trzeba $7^1/_4$ sześcianów drewnianych, które nazwać można sześcianami wodnemi. Możemy tedy powiedzieć, że ciężar właściwy żelaza lanego wynosi $7^1/_4$. Liczba dokładniejsza, oznaczona metodami ściślejszemi, czyni 7,2.

93. Mam tu także podobne sześciany z mosiądzu, ołowiu i kości słoniowej, równoważąc je przeto z sześcianami wodnemi, możemy łatwo oznaczyć ich ciężary właściwe; zestawiamy je tu razem z ciężarem właściwym żelaza w następnej tabeli:

Substancya	*Ciężar właściwy*
Żelazo lane	7,2
Mosiądz	8,1
Ołów	11,3
Kość słoniowa	1,8

94. Użyty tu sposób oznaczania ciężarów właściwych różni się zupełnie od ściślejszych daleko metod, zwykle do celu tego stosowanych, wyjaśnienie ich wszakże wymaga pojęć trudniejszych aniżeli zasady, któreśmy tu rozważali. Metoda nasza służyć może raczej do wytłomaczenia pojęcia ciężaru właściwego, aniżeli jako należyty sposób jego oznaczania, chociaż, jak widzieliśmy, wydaje ona rezultaty dostatecznie bliskie prawdy, które do wielu celów wystarczają.

94*. Przy oznaczaniu i stosowaniu ciężarów właściwych korzystniej jest daleko posługiwać się miarami metrycznemi. Gdyby sześciany do powyższego doświadczenia przygotowane miały objętość nie cala sześciennego, ale centymetra sześciennego, to oczywiście dla zrównoważenia centymetra sześciennego żelaza trzebaby również użyć $7^1/_4$ sześcianów wodnych tejże wielkości, coby także wykazało, że ciężar właściwy żelaza wynosi $7^1/_4$; jeżeli wszakże pamiętamy, że ciężar centymetra sześciennego wody (dystylowanej, ważonej w temperaturze 4^0 C) jest jednostką ciężarów i nazywa się gramem, to otrzymany rezultat wskazuje zarazem, że centymetr sześcienny żelaza waży $7^1/_4$ grama. Do przeprowadzenia powyższych doświadczeń zbyteczne są nawet w takim razie sześciany drewniane, wystarczą bowiem zwykłe gwichty. Jeżeli, mianowicie, odważymy centymetry sześcienne, wyrobione z mosiądzu, ołowiu i kości słoniowej, przekonamy się, że ważą one kolejno 8,1 grama, 11,3 g., 1,8 g.; skoro zaś centymetr sześcienny wody waży 1 gram, rezultaty te wykazują, że ciężar właściwy mosiądzu wynosi 8,1, ołowiu 11,3, kości słoniowej 1,8.

W każdym innym układzie miar ciężar właściwy jest jedynie liczbą, która wskazuje, ile razy dana substancya cięższą jest, aniżeli takaż sama objętość wody; ale w układzie metrycznym liczba ta podaje zarazem ciężar centymetra sześciennego w gramach. Jeżeli pamiętamy, że ciężar właściwy żelaza wynosi 7,2, wiemy już tem samem, że centymetr sześcienny tego żelaza waży 7,2 grama. Ponieważ zaś, dalej, decymetr sześcienny zawiera 1000 centymetrów sześciennych, a kilogram jest-to 1000 gramów, decymetr przeto sześcienny żelaza waży 7,2 kilograma, a podobnież metr sześcienny żelaza waży 7200 kilogramów, metr bowiem sześcienny obejmuje 1000 decymetrów sześciennych. W ogólności przeto, w układzie miar metrycznych, ciężar właściwy danej substancyi wskazuje, ile gramów waży jej centymetr sześcienny, albo, ile kilogramów waży jej decymetr sześcienny, albo wreszcie, ile tysięcy kilogramów waży jej metr sześcienny. Centymetr sześcienny mosiądzu waży 8,1 grama, decymetr sześcienny 8,1 kilograma, metr sześcienny 8100 kilogramów.

Pożyteczną jest przytem rzeczą pamiętać, że centymetr sześcienny wody waży gram, decymetr sześcienny kilogram, a metr sześcienny tysiąc kilogramów.

Ołowianka i libela.

95. Dążność, jaką ma ziemia do pociągania ku sobie wszystkich ciał, ujawnia się wyraźnie za pomocą użytecznej *ołowianki* czyli *pionu*. Jestto jedynie tylko sznurek, który na jednym swym końcu dźwiga ciężarek ołowiany. Sznur, gdy pozostaje w spoczynku zwiesza pionowo; gdy ciężarek odchylimy na bok, a następnie go puścimy, będzie się on bujał w jednę i w drugą stronę, dopóki wreszcie nie zatrzyma się znowu w kierunku pionowym; pochodzi to ztąd, że ciężar stara się zbliżyć ku ziemi, o ile tylko może, a to się spełnia, gdy sznur zwiesza pionowo ku dołowi.

96. Powierzchnia wody pozostającej w równowadze jest płaszczyzną poziomą, co jest również następstwem ciężkości. Wszystkie cząstki wody usiłują zbliżyć się jaknajbardziej do ziemi, gdyby zatem pewna część wody znajdowała się wyżej, aniżeli część pozostała, rozlałaby się natychmiast, w taki bowiem sposób schodzi niżej.

97. Z tego powodu powierzchnia wody daje nam możność oznaczenia płaszczyzny doskonale poziomej, podobnie jak ołowianka daje nam linię doskonale pionową; oba te następstwa ciężkości przedstawiają nader ważne znaczenie praktyczne.

98. Libela jest niemniej pospolitem i również użytecznem narzędziem, polegającem na działaniu siły ciężkości. Składa się ona z rury szklanej, słabo zakrzywionej, zwróconej powierzchnią wypukłą ku górze i umieszczonej w osadzie o płaskiej podstawie. Rura jest prawie wypełniona alkoholem, umyślnie jednak pozostawiono pęcherzyk powietrzny. Rura jest dalej uregulowaną tak, że gdy płyta dolna umieszczona jest na powierzchni dokładnie poziomej, bańka powietrzna zatrzymuje się wpośrodku; położenie przeto bańki tej daje możność sprawdzenia, czy powierzchnia dana jest poziomą.

Środek ciężkości.

99. Zajmiemy się teraz doświadczeniem, które nam odsłoni ciekawą własność ciężkości. Mam tu płytę z blachy żelaznej, postaci nieregularnej, jak wskazuje fig. 27; posiada ona pięć drobnych otworków *A B C D E*, wybitych w różnych miejscach na jej brzegach. Do belki zaś przytwierdzony jest cienki drucik, na którym zawieszać możemy tę płytę żelazną w jednym z jej otworków *A*; nie jest ona bynajmniej w żaden inny sposób podtrzymywana, — wisi swobodnie na druciku tak, że może się dokoła niego łatwo obracać. Poznajemy tą drogą, że jest jedno położenie, i li tylko jedno, w którem płyta utrzymuje się

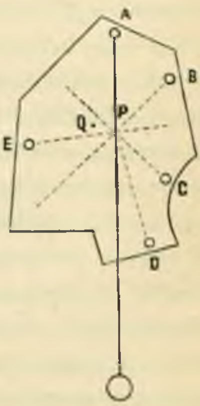

Fig. 27.

w spoczynku; gdy ją z położenia tego usuwam, wraca doń znowu po kilku wachnięciach. Aby położenie to zaznaczyć, zawieszam na druciku nitkę z ciężarkiem, którą poprzednio potarłem kredą. Czekam dopóki się nitka nie uspokoi przed płytą, a wtedy potrącam ją silnie tak, by na płycie pozostawiła ślad kredowy; w ten sposób otrzymujemy na płycie linię pionową *A P*.

Usuwam teraz ołowiankę, zawieszam płytę w innym otworku *B* i powtarzam toż samo działanie, zkąd na płycie otrzymuję drugą linię kredową *B P*; wykonawszy zaś toż samo z każdym innym otworkiem, mamy na płycie nakreślonych pięć linij, które na figurze przedstawione są przez linie kropkowane. Dostrzegamy tu okoliczność uderzającą, że wszystkie te pięć linij przecinają się w jednym punkcie *P*; a gdybyśmy w płycie wywiercili więcej jeszcze otworków, czy to na jej brzegu czy też w innych punktach, i gdybyśmy przy każdym takim otworku nakreślili linię kredową w sposób opowiedziany, przeszłyby wszystkie przez tenże sam punkt. Ważny ten punkt nazywa się *środkiem ciężkości* płyty, a rezultat naszych badań wyrazimy krótko, jeżeli powiemy, że linia pionowa, wyprowadzona z punktu zawieszenia, przechodzi zawsze przez środek ciężkości płyty.

100. W środku ciężkości *P* wywiercémy również otworek, a gdy przez otworek ten przesuwamy drucik podtrzymujący, dostrzegamy, że płyta utrzymuje się obojętnie w każdem położeniu, jakie jej nadajemy; jestto ciekawa własność środka ciężkości. Pod tym względem widzimy, jaka sprzeczność zachodzi między środkiem ciężkości a innym otworkiem *Q*, o cal tylko jeden od nie-

go odległym; gdy w tym otworku płytę zawieszam, istnieje tylko jedno położenie, w którem się ona w spoczynku utrzymuje, a mianowicie, gdy środek ciężkości *P* przypada pionowo poniżej *Q*. Środek ciężkości różni się przeto wybitnie od każdego innego punktu tej płyty.

101. Rozumieć możemy, że siła ciężkości działa na płytę, jako siła przyczepiona do punktu *P*, a to dozwala nam wytłomaczyć łatwo, dlaczego punkt ten przypada pionowo pod punktem zawieszenia, gdy ciało jest w spoczynku. Jeżeli przywiążę sznur do płyty i ciągnąć go będę, płyta oczywiście sama przez się przyjmie położenie takie, że kierunek sznura przejdzie przez punkt zawieszenia; w podobnyż sposób i ciężkość sprowadza takie położenie płyty, by kierunek tej siły przechodził przez punkt zawieszenia.

102. Jakąkolwiek miałaby postać płyta, zawiera ona zawsze jeden punkt, posiadający tę własność wybitną; każde też w ogólności ciało, z jakiejkolwiek byłoby złożone materyi, posiada punkt zwany środkiem ciężkości, taki, że gdy ciało jest w punkcie tym zawieszone, pozostaje w równowadze bez względu, jakie zajmuje położenie; jeżeli zaś ciało zawieszone jest w którymkolwiek innym punkcie, pozostaje w równowadze wtedy, gdy środek ciężkości przypada bezpośrednio poniżej punktu zawieszenia. W ogólności niepodobna podeprzeć ciała dokładnie w jego środku ciężkości, gdy punkt ten przypada wewnątrz masy ciała; niekiedy też wydarzyć się może, że środek ciężkości nie znajduje się zgoła w substancyi ciała, jak naprzykład w pierścieniu, w tym bowiem przypadku środek ciężkości jest w środku pierścienia. Nie

potrzebujemy wszakże zatrzymywać się na tych przypadkach szczególnych, dostateczne bowiem dowody rzetelności podanych tu praw same się nam nastręczą w dalszym ciągu.

Równowaga stała i niestała.

103. Fig. 28 przedstawia nam pręt żelazny AB, mogący się obracać dokoła osi przechodzącej przez jego środek P.

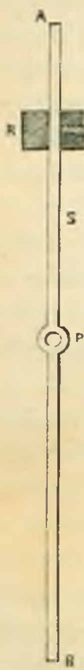

Fig. 28.

Środek ciężkości przypada w środku P, a zatem, jak to łatwo widzieć można, pręt pozostaje w spoczynku w każdem położeniu, jakie mu nadajemy. Osadźmy jednak teraz na pręcie ciężar R, przytwierdzając go za pomocą szruby, a środek ciężkości całego tego połączenia nie przypada już w środku pręta; przesunął się do punktu S, bliżej ciężaru. Położenie tego punktu wyszukać możemy łatwo, usunąwszy pręt z osi, a następnie starając się wynaleść punkt, w którym utrzyma się w równowadze. W tym celu umieścić możemy pręt na ostrzu i przesuwać go w jednę i w drugą stronę, dopóki nie uchwycimy należytego położenia; oznaczywszy położenie to na pręcie, osadzamy go znów na osi, pozostawiając ciężar przyczepiony. Zobaczymy, że teraz pręt nie utrzymuje się już w każdem położeniu w równowadze. Jest on w równowadze, gdy punkt S przypada wprost pod osią, ale nie ma równowagi, gdy znajduje się po jednej lub drugiej jej stronie. Gdy punkt S przypada wprost nad osią, pręt znajduje się w osobliwych warunkach. Jeżeli ostrożnie jest w położeniu tem umieszczony, pozostaje w spoczynku; ale gdy ulegnie najlżejszemu przesunięciu, obraca się w drugę stronę. Pręt w położeniu tem jest więc w równowadze, ale w stanie takim, który się nazywa równowagą *niestałą*. Jeżeli środek ciężkości znajduje się poniżej punktu zawieszenia, pręt po odchyleniu wraca do swego położenia, które się przeto nazywa równowagą *stałą* albo *stateczną*. Jest rzeczą bardzo ważną, zapamiętać wyróżnienie tych dwu rodzajów równowagi.

104. Inną drogę rozpoznania tych warunków otrzymujemy w sposób następujący. Ciało jest w równowadze stałej, gdy środek ciężkości znajduje się w punkcie, o ile można najniższym, w niestałej zaś, gdy znajduje się w punkcie, o ile można, najwyższym. Wykazać to możemy w sposób bardzo prosty za pomocą elipsy, którą trzymam w ręce. Środek ciężkości tej figury przypada w jej środku geometrycznym. Elipsa, gdy spoczywa na szerokim brzegu, jest w równowadze stałej, a jej środek ciężkości zajmuje wtedy widocznie położenie najniższe. Mogę też ustawić elipsę i na jej krańcu wąskim, ale w tym razie najsłabsze dotknięcie wystarcza do jej wywrócenia. Elipsa jest wtedy w równowadze niestałej; w tym razie oczywiście środek ciężkości jest w najwyższem swem położeniu.

105. Mam tu kulę, której środek ciężkości znajduje się w jej środku; w jakikolwiek sposób kulę tę umieszczę na płaszczyźnie, środek jej znajduje się zawsze

w tejże samej wysokości, nie mogę przeto powiedzieć, by on zajmował położenie najniższe lub najwyższe, a w podobnych razach równowaga jest *obojętna*. Jeżeli ciało zostanie przechylonem, nie wraca już do dawnego swego położenia, jak to się dzieje, gdy ciało jest w równowadze stałej, ani też nie zbacza dalej jeszcze od położenia dawnego, jak to ma miejsce w równowadze niestałej, — pozostaje ono po prostu w nowem położeniu, jakie mu nadajemy.

Fig. 29.

106. Probuję utrzymać pierścień żelazny na pręciku *H*, fig. 29, to mi się wszakże nie udaje. Niepowodzenie to pochodzi stąd, że środek ciężkości jest powyżej punktu podpory; gdy wszakże umieszczam pręcik w punkcie *F*, pierścień jest w równowadze stałej, teraz bowiem środek ciężkości jest poniżej punktu podpory.

Własność środka ciężkości w obracającem się kole.

107. Z własności środka ciężkości wypływają inne jeszcze ciekawe następstwa, a jedno z najwybitniejszych, które zarazem najwyższej jest wagi w budowie maszyn, wyprowadzimy tu doświadczalnie.

108. Jest w ogólności rzeczą konieczną, by maszyna działała tak regularnie, jak tylko być może, i by usunięte były wszelkie nienależyte drgania i wstrząśnięcia murów, co ma zwłaszcza miejsce, gdy niektóre części maszyny wirują z wielką prędkością; jeżeli bowiem są bardzo ciężkie, powstają łatwo szkodliwe drgania, gdy

brak dokładnego uregulowania. Zależność tych warunków od środka ciężkości stanie się dla nas zrozumiałą przez odwołanie się do przyrządu przedstawionego na załączonej rycinie (fig. 30). Przyrząd ten składa się z wiel-

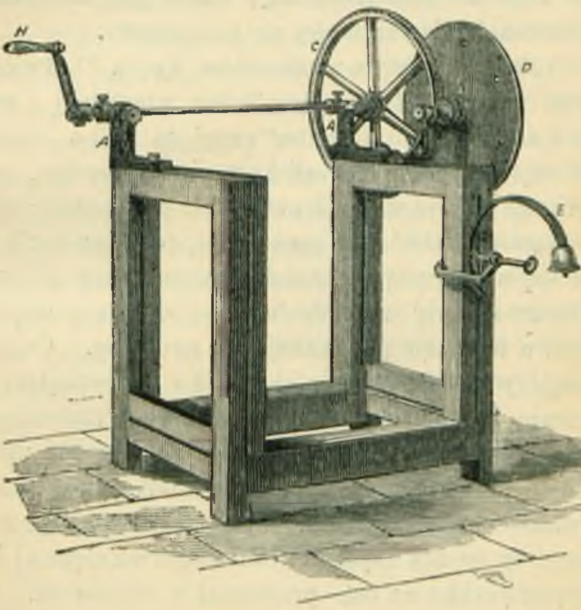

Fig. 30.

kiego koła zębatego *C*, którego zęby zaczepiają się o zęby koła mniejszego *B*; tym więc sposobem, gdy obracamy korbę *H*, nadać możemy znaczną szybkość obrotu kręgowi żelaznemu *D*, który waży 14 f., a w średnicy ma 18". Ponieważ krąg ten jest jednorodny, a na osi osadzony jest w swym środku, wypływa stąd, że jego środek ciężkości jest zarazem środkiem obrotu. Koła umieszczone są na odpowiedniej podstawie, która, chociaż ciężka, jest jednak z podłogą niepołączona. Kręcąc korbą, obracać możemy krąg bardzo szybko, nawet przeszło dwanaście razy na sekundę. Pomimo to podpora pozostaje zupełnie niewzruszona, a nawet przymocowany do niej dzwonek *E* bynajmniej się nie odzywa.

109. W jednym z otworków kręga *D* utwierdzam czopek żelazny, dźwigający kilka pierścieni i ważący wraz z niemi około 1 funta; czyni to tylko czternastą część ciężaru kręga. Jeżeli korbą kręcę zwolna, maszyna pracuje również spokojnie, jak poprzednio; ale gdy wzmagam prędkość do tego stopnia, że jeden obrót dokonywa się w ciągu dwu sekund, dzwonek zaczyna brzmieć gwałtownie, a gdy szybkość bardziej jeszcze powiększam, podstawa wyraźnie podskakuje na podłodze. Co jest tego przyczyną? Przez dodatek czopka przesunąłem nieco położenie środka ciężkości kręga, ale nie zmieniłem osi, dokoła której krąg wirował; tem samem nie miał on już możności obracania się dokoła srodka ciężkości, a to sprowadziło wstrząśnienia. Jest rzeczą niezbędnie konieczną, by środek ciężkości jakiejkolwiek ciężkiej bryły, wirującej szybko na osi, przypadał w osi obrotu. Natężenie wstrząśnień, powstających przy znacznej prędkości, może być bardzo wielkie, choćby nawet wywołane były przez masę bardzo drobną.

110. Aby maszyna znowu pracować mogła spokojnie, usunięcie z otworu osadzonego w nim czopa nie jest koniecznie potrzebne. Jeżeli jakimkolwiekbądź sposobem sprowadzimy znowu środek ciężkości do osi, tenże sam cel osiągniemy. Możemy to zaś wykonać w spo-

sób bardzo prosty, przesuwając drugi czop tejże samej wielkości przez otworek na przeciwległej stronie kręga, tak aby oba były w jednakiej od osi odległości; gdy teraz znów korbę obracamy, widzimy, że maszyna pracuje również spokojnie, jak w warunkach pierwotnych.

111. Poruszające się części maszyn są to najpospoliciej koła różnego rodzaju, a w kołach środek ciężkości schodzi się oczywiście ze środkiem obrotu; ale gdy dla jakiegokolwiek powodu koło, szybko się obracające, posiada ciężar dodatkowy w jednem miejscu przyczepiony, ciężar ten zrównoważony być musi przez jedne lub kilka innych części dodatkowych, tak, aby środek ciężkości całego tego układu przypadał we właściwem miejscu. Dlatego to koła poruszające lokomotywy są zawsze obciążone, dla przeciwdziałania wpływowi korby i utrzymania środka ciężkości na osi obrotu. Przyczynę tych drgań zrozumiemy po wykładzie o sile odśrodkowej (wykład XVII).

WYKŁAD V.

Siła tarcia.

Natura tarcia. — Metoda doświadczeń. — Tarcie jest proporcyonalne do ciśnienia. — Ściślejsze wyrażenie tego prawa. — Spółczynnik zmienia się wraz z użytemi ciężarami. — Kąt tarcia. — Drugie prawo tarcia. — Uwagi ogólne.

Natura tarcia.

112. Znajomość siły tarcia jest niezbędnym wstępem do nauki o maszynach, którą teraz zająć się mamy. Tarcie czyni wprawdzie trudniejszem badanie maszyn, aniżeli miałoby to miejsce, gdybyśmy siły tej nie uwzględniali; skutki jej są wszakże zbyt ważne, byśmy ją pominąć mogli.

113. Na czem tarcie polega, zrozumieć można z fig. 31 (str. 87), która przedstawia przecięcie płyty stołu drewnianego, lub też z innego materyału, ustawionego tak, by płyta ta CD była poziomą; na stole spoczywa bryła A, również z drzewa lub innego materyału. Do bryły A przyczepiony jest sznur, który przechodzi przez

blok *P* i wyprężony jest działaniem zawieszonego ciężaru *B*. Jeżeli wielkość tego ciężaru przekracza pewną granicę, wtedy *A* posuwa się wzdłuż stołu i *B* opada; ale

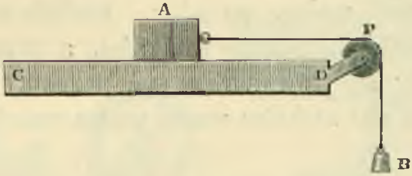

Fig. 31.

gdy ciężar *B* mniejszy jest od tej granicy, zarówno *A* jak i *B* pozostają w spoczynku. Gdy ciężar *B* nie jest dostateczny do wywołania ruchu, podtrzymywany jest przez napięcie sznura, które znów znosi się działaniem *tarcia*, wywołanego przez pewne przyleganie między bryłą *A* a stołem. Doświadczenie to uczy tedy, że tarcie jest siłą, gdyż powstrzymuje ruch ciężaru *B*. W samej też rzeczy tarcie ujawnia się w ogólności jako siła przez niszczenie ruchu, chociaż też niekiedy wywołuje ono ruch pośrednio.

114. Istotne źródło tej siły polega na nieuniknionej *chropowatości* wszelkich znanych powierzchni, żadna bowiem materya doskonale wygładzić się nie daje. Drobne wyniosłości jednej powierzchni zatrzymywane są w odpowiednich zagłębieniach drugiej, a tem samem wywierać trzeba siłę, by powierzchnię jedne przesuwać po drugiej. Przez staranne wygładzenie powierzchni stopień tarcia może być zmniejszonym; można go wszakże obni-

żać jedynie do pewnej granicy, poza którą dokładniejsze wygładzanie nie sprowadza już widocznej różnicy.

115. Należy nam poznać prawa tarcia w różnych warunkach, byśmy się do nich odwoływać mogli, gdy tarcie wywiera wpływ wyraźny. Rozbiór doświadczeń nastręcza niekiedy pewne trudności, a wyprowadzane z nich zasady są głównie liczebne; poznamy jednak, że odsłonią nam one niektóre ważne prawa natury.

Metoda doświadczeń.

116. Tarcie istnieje między każdemi dwiema powierzchniami, pozostającemi ze sobą w zetknięciu; występuje ono tedy między dwiema bryłami drewnianemi, podobnie jak między bryłą drewnianą a żelazną, wielkość zaś tej siły zależy od natury obu powierzchni. Doświadczenia prowadzić będziemy jedynie nad tarciem drzewa o drzewo, więcej nas bowiem nauczy staranne zbadanie przypadku specyalnego, aniżeli mniej dokładne rozpatrzenie znacznej liczby różnych substancyj.

117. Przyrząd, którego do badań tych użyjemy, przedstawia fig. 32 (str. 89). Płyta z drzewa sosnowego, o wymiarach 6' $\times$ 11" $\times$ 2", na górnej swej powierzchni wygładzona, doprowadzona jest za pomocą libeli do położenia poziomego i silnie przytwierdzona do podpory na wysokości około 4' od podłogi. Na płycie umieszczona jest deszczułka sosnowa, o wymiarach 9" $\times$ 9", której włókna idą poprzecznie względem włókien płyty; deszczułka ta stanowi tedy sanie, na których umieszczony jest ciężar *A*. Do sań przywiązana jest lina, która prze-

chodzi przez bardzo swobodnie osadzony blok z żelaza lanego *C* mający 14" w średnicy, a na drugim końcu

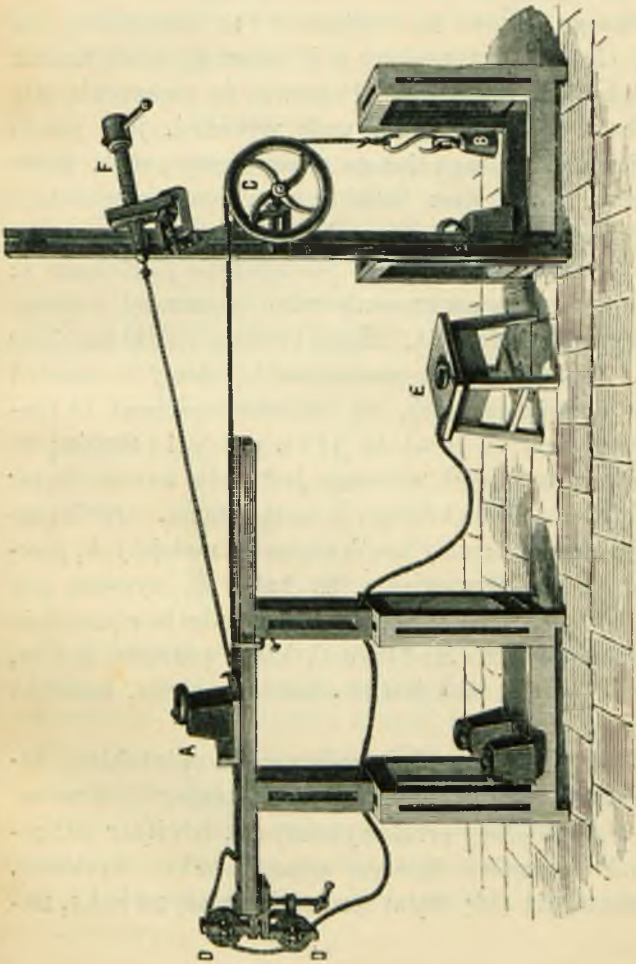

Fig. 32.

dźwiga hak, ważący jeden funt, przeznaczony do zawieszania na nim ciężarów *B*.

118. Metoda doświadczenia polega na umieszczaniu pewnego ciężaru na saniach *A* i na oznaczaniu, jak wielki ciężar, przyczepiony w *B*, posunąć zdoła wzdłuż płyty tak obciążone sanie. Ponieważ do oznaczenia siły potrzeba w ogólności kilka prób wykonać, jest przeto przywiązana też druga lina do tylnej strony sanek, która przechodzi przez dwa bloki *D*; tym bowiem sposobem eksperymentator, nakładając ciężary przy *B*, może znów sanie posunąć wstecz przez pociągnięcie pierścienia *E*; sznur ten jest przytem zupełnie luźno puszczony podczas przebiegu doświadczenia, inaczej bowiem opóźniałby bieg sanek. Ciężary, które umieszczać będziemy na saniach *A* przy doświadczeniach, są wielokrotnościami 14 funtów, począwszy od 14 aż do 112 t. j. 8 $\times$ 14 funtów; do ciężarów oznaczonych włączany jest nadto zawsze ciężar samychże sań, niedochodzący zresztą 1 funta. Oprócz tego przygotowany mamy zasób ciężarów mniejszych, przeznaczonych do zawieszania na haku *B*; wynoszą one 0,1 f., 0,5 f., 1, 2, 7 i 14 funtów. Zachodzi tu wprawdzie jeszcze pewne tarcie na bloku *C*, które pokonać trzeba, ponieważ jednak blok jest stosunkowo wielki, tarcie to jest słabe.

119. Jako przykład, podajemy tu opis takiego doświadczenia. Ciężar 56 funtów umieszczony jest na saniach, a przez próby przekonywamy się, że ciężar 29 funtów na *B* (łącznie z ciężarem samegoż haka) wystarcza do przesunięcia sań; ciężar ten zawiesza się na haku, na-

kładając funt po funcie i bacząc, by każdy dodatek wprowadzany był zwolna.

120. W ten sposób przeprowadzono ciąg doświadczeń, umieszczając różne ciężary na saniach *A*, a rezultaty zestawione są w tabeli I.

TABELA I. — TARCIE.

Wygładzona powierzchnia pozioma płyty sosnowej 72″×11″; sanie również z drzewa sosnowego 9″ × 9″; włókna poprzecznie zestawione; sanie nie są wstrząsane; siła działająca na sanie powiększa się stopniowo, dopóki się ruch nie rozpoczyna.

Numer doświadczenia	Ładunek sań w funtach, łącznie z ciężarem sań.	Siła potrzebna do poruszenia sań. Szer. pierwszy.	Siła potrzebna do poruszenia sań. Szereg drugi.	Wartości średnie.
1	14	5	8	6,5
2	28	15	16	15,5
3	42	20	15	17,5
4	56	29	24	26,5
5	70	33	31	32,0
6	84	43	33	38,0
7	98	42	38	40,0
8	112	50	33	41,5

W kolumnie pierwszej podana jest liczba porządkowa każdego doświadczenia, by dogodnie do nich można się odwoływać. W kolumnie drugiej ładunek sań podany jest w funtach. W kolumnie trzeciej wykazana jest siła, potrzebna do przezwyciężania tarcia. Kolumna czwarta obejmuje drugi szereg doświadczeń, wykonanych w tenże sam sposób, co w szeregu pierwszym; ostatnia wreszcie kolumna zawiera wartości średnie tarcia pierwszego i drugiego.

121. Pierwszą uwagą, jaką nasuwa nam ta tabela, jest to, że rezultaty nie wydają się zadawalniające czyli zgodne. Tak w szczególności z 6 i 7 doświadczenia szeregu pierwszego okazuje się, że tarcie 84 funtów czyniło 43 funty, gdy tymczasem tarcie 98 funtów wynosiło 42 funty, tak, że tu wydaje się, jakoby ciężar większy wywierał tarcie mniejsze, co oczywiście sprzecznem jest z całym ogółem rezultatów, jak to ogólny rzut oka wskazuje. Co większa, tarcie w szeregu pierwszym i w drugim nie są ze sobą zgodne, w ogólności jest ono w pierwszym większe, aniżeli w tym ostatnim, zwłaszcza zaś odstępstwo jest znaczne w doświadczeniu 8, gdy rezultaty wynoszą 50 f. i 33 f. W ostatniej kolumnie wartości średnich nieprawidłowości te są złagodzone, gdyż kolumna ta ujawnia, że tarcie wzrasta wraz z ciężarem; skoro wszakże różnica między doświadczeniem 1-em a 2-em wynosi 9 f., a między 2-em a 3-em tylko 2 f., wykrycie jakiegokolwiek prawa z tych rezultatów nie ma żadnych widoków.

122. Czy jednak w samej rzerzy jest tarcie tak kapryśne, że nie daje się wyrazić przez prawa dokładniejsze, aniżeli to można wnosić z powyższych doświadczeń? Musimy przeto bliżej przedmiot ten rozpatrzeć. Jeżeli dwie bryły drewniane pozostawały ze sobą w zetknięciu, będąc w spoczynku przez czas pewien, inna jeszcze siła, krom tarcia, opiera się ich rozdzieleniu, — drzewo mianowicie jest ściśliwe, powierzchnie tedy ulegają ściślejszemu zbliżeniu, a przyleganie, od przyczyny tej zawisłe, musi być przezwyciężone, zanim się ruch rozpocznie. Początkowej tej przyczepności wyjaśnić nie

umiemy; zależy ona prawdopodobnie od mnóstwa drobnych okoliczności, których ocenić niepodobna, a ona to wikła rezultaty, które się nam tak niezadawalniającemi wydały.

123. Zawikłania te usunąć możemy, *wstrząsając* sanie w początku ruchu. Daje się to dogodnie wykonać za pomocą szruby przedstawionej przy *F* na fig. 32; sznur, przywiązany do jej końca, przytwierdzony jest do sań, a gdy rękojeść szruby kilkakrotnie obrócimy, sanie zaczynają się ślizgać. Ciało raz w ruch wprawione poruszać się będzie dalej z jednaką szybkością, jeżeli nie jest poddane działaniu siły; stąd więc ciężar *B* pokonywa właśnie tarcie, gdy sanie poruszają się jednostajnie po doznanem wstrząśnięciu; prędkość ta zmierzona w jednym przypadku, gdy miała wielkość pośrednią, wynosiła 16 cali na minutę.

124. W istocie nie mogą sanie w żadnym razie ruchu swego *rozpocząć*, dopóki siła nie *przewyższa* tarcia, wielkość wszakże tego nadmiaru oznaczyć się nie daje. Jest on niewątpliwie między powierzchniami drzewa większy, aniżeli między powierzchniami materyałów mniej ściśliwych, jak metali lub szkła. W tym ostatnim przypadku, gdy siła przewyższa tarcie choćby nader nieznacznie, sanie zaczynają się już posuwać ruchem nader opieszałym; gdy mamy do czynienia z drzewem, siła przewyższać musi tarcie nadmiarem większym, zanim sanie ulegają ruchowi, ale ruch wtedy jest stosunkowo szybki.

125. Jeżeli, siła jest zbyt mała, ciężar bądź to nie porusza się dalej po wstrząśnięciu, bądź też zatrzymuje

się nieregularnie. Jeżeli siła jest zbyt wielka, ciężar posuwa się z prędkością przyspieszoną. Należytą jej wielkość rozpoznać można łatwo z jednostajności ruchu, gdy bowiem sanie są znacznie nawet obładowane, kilka dziesiątych części funta, dodanych do ciężaru zawieszonego na haku, powodują wyraźną zmianę prędkości.

126. Ścisłość, z jaką tarcie mierzyć można, daje się ocenić z rozpatrzenia tabeli II.

TABELA II. — TARCIE.

Wygładzona powierzchnia pozioma płyty sosnowej 72″×11″; sanie również z drzewa sosnowego 9″×9″; włókna poprzecznie zestawione; sanie wstrząsane; siła zastosowana wystarcza właśnie do utrzymania ruchu jednostajnego sań.

Numer doświadczenia	Ładunek sań w funtach, łącznie z ciężarem sań	Siła potrzebna do utrzymania ruchu. Szer. pierwszy	Siła potrzebna do utrzymania ruchu Szereg drugi	Wartości średnie.
1	14	4,9	4,9	4,9
2	28	8,5	8,6	8,5
3	42	12,6	12,4	12,5
4	56	16,3	16,2	16,2
5	70	19,7	20,0	19,8
6	84	23,7	23,0	23,4
7	98	26,5	26,1	26,3
8	112	29,7	29,9	29,8

127. Zestawione tu zostały dwa szeregi doświadczeń, mających na celu oznaczenie siły, potrzebnej do utrzymania ruchu, a jak widzimy, rezultaty są teraz dostatecznie zgodne. Tak naprzykład, w doświadczeniu 7, gdy ciężar sań wynosił 98 f., okazało się, że 26,5 f. wystarcza do utrzymania ruchu, a w drugiej próbie, prowa-

dzonej niezależnie, siła ta czyniła 26,1 f.; średnią tedy obu tych wartości przyjąć można, jako bliską prawdy. Najznaczniejsza różnica między obu szeregami, wynosząca 0,7 funta, miała miejsce w doświadczeniu 6. Dlatego też tarcie ciężaru 84 funtów oznaczono trzeciem jeszcze doświadczeniem, które wydało 23,5 funtów; jestto rezultat pośredni między obu poprzedniemi, a 23,4 f., jako wartość średnią wszystkich trzech, przyjęto za rezultat ostateczny.

128. Ścisła zgodność doświadczeń w tabeli tej świadczy, że wartości średnie piątej kolumny są prawdopodobnie bardzo zbliżone do prawdziwych wartości tarcia, wywołanego przez odpowiednie ładunki na saniach.

129. Średnie to wszakże tarcie winno być nieco zmniejszone, byśmy mogli twierdzić, że przedstawia ono li tylko tarcie drzewa o drzewo. Blok mianowicie, przez który sznur przechodzi, obraca się dokoła swej osi z pewnem, choć niewielkiem tarciem, które przeto przezwyciężone być musi siłą. Sposobu oceniania tego tarcia, które w doświadczeniach tych nie przekracza nigdy 0,5 funta, nie mamy potrzeby tu znowu rozbierać. Poprawione wartości tarcia zestawione są w trzeciej kolumnie tabeli III. Tak, naprzykład, tarcie 4,9 f. w doświadczeniu 1, składa się z 4,7, istotnego tarcia drzewa o drzewo, i z 0,2, które jest tarciem bloka; podobnież 26,3 f. doświadczenia 7 składa się z 25,8 i 0,5. Tak poprawionego tarcia używać będziemy w następnych naszych obliczeniach.

Tarcie jest proporcyonalne do ciśnienia.

130. Oznaczywszy więc wartości siły tarcia dla ośmiu różnych ciężarów, zajmiemy się obecnie poszukiwaniem praw, któreby można wyprowadzić z rezultatów naszych. Dostrzegamy bezpośrednio, że tarcie wzrasta wraz z ciężarem i że jest zawsze większe od jego części czwartej, a mniejsze od trzeciej. Naturalną tedy będzie rzeczą przypuścić, że tarcie (F) jest rzeczywiście stałym ułamkiem ciężaru (R), czyli, innemi słowy, że $F = k\,R$, gdzie k jest liczbą stałą.

131. Aby domysł ten sprawdzić, winniśmy się postarać o oznaczenie liczby k, co można otrzymać, dzieląc którąkolwiek wartość F przez odpowiadającą mu wartość R. Jeżeli to wykonamy, przekonamy się, że każde z powyższych doświadczeń prowadzi do ilorazu odmiennego; doświadczenie pierwsze wydaje 0,336, a ostatnie 0,262, podczas gdy inne doświadczenia wydają rezultaty pośrednie między temi wartościami skrajnemi. Liczby te są wprawdzie dosyć do siebie nawzajem zbliżone, zachodzące wszakże między niemi odstępstwa okazują, że nie jest ściśle prawdziwem twierdzenie, by tarcie było proporcyonalne do ciężaru.

132. Prawo to wszakże, że *tarcie zmienia się proporcyonalnie do ciśnienia*, jest o tyle dostatecznie bliskiem prawdy, że wystarcza do celów najbardziej praktycznych, a w takim razie nasuwa się pytanie, którą z różnych wartości spółczynnika k przyjąć winniśmy? Za pomocą metody wyłożonej w Dodatku oznaczyć możemy taką wartość liczebną na k, która, chociaż nie wyraża do-

kładnie żadnego doświadczenia, przedstawia jednak ogólną ich zbiorowość lepiej, aniżeliby to dać mogła jakakolwiek inna wartość liczebna. Liczba w ten sposób oznaczona czyni 0,27. Jest ona pośrednią między dwiema wartościami, które podaliśmy wyżej, jako wartości skrajne. Znaczenie tego rezultatu wyjaśni nam rozpatrzenie tabeli III.

Kolumna czwarta tabeli tej obliczoną została według wzoru $F = 0,27\ R$. Tak naprzykład, w doświadczeniu 5 tarcie ciężaru 70 funtów wynosi 19,4 f., iloczyn zaś liczb 70 i 0,27 czyni 18,9, mniej zatem o 0,5 funta od wielkości istotnie otrzymanej. W ostatniej kolumnie tej tabeli zestawione są, dla łatwiejszego porównania, odstępstwa między wartościami zaobserwowanemi i obliczonemi. Zwracamy tu jeszcze uwagę, że największa różnica nie dochodzi 1 funta.

TABELA III. — TARCIE.

Tarcie drzewa sosnowego o takież drzewo; wartości średnie tabeli II (poprawione co do tarcia bloka) porównane ze wzorem $F = 0,27\ R$.

Numer doświadczenia	R. Całkowity ładunek sań; w funtach	Średnie wartości tarcia poprawione	F. Obliczone wartości tarcia	Odstępstwa między tarciem zaobserwowanem a obliczonem
1	14	4,7	3,8	— 0,9
2	28	8,2	7,6	— 0,6
3	42	12,2	11,3	— 0,9
4	56	15,8	15,1	— 0,7
5	70	19,4	18,9	— 0,5
6	84	23,0	22,7	— 0,3
7	98	25,8	26,5	+ 0,7
8	112	29,3	30,2	+ 0,9

133. Prawo zatem $F = 0{,}27\ R$ przedstawia rezultaty doświadczeń ze ścisłością znośną, a stosunek liczebny 0,27 nazywa się *spółczynnikiem tarcia.* Stosować możemy prawo to do obliczania tarcia w przypadkach, gdy ciężar przypada między 14 f. a 112 f.; tak naprzykład, jeżeli ciężar wynosi 63 f., tarcie jest $63 \times 0{,}27 = 17{,}0$.

134. Spółczynnik tarcia byłby nieco odmienny, gdyby włókna sań były równoległe do włókien płyty, a w ogólności zmienia się on wraz z naturą powierzchni. Na podstawie doświadczeń zestawiono tablice spółczynników tarcia różnych substancyj, drzewa, kamieni, metali i t. d. Użycie tych tablic polega na uznaniu zwykłego prawa tarcia, a mianowicie, że tarcie jest proporcyonalne do ciśnienia; prawo to jest dostatecznie ściśle w przeważnej liczbie potrzeb, zwłaszcza zaś, gdy stosuje się do ciężarów, przypadających między skrajnemi ciężarami, które były użyte do obliczenia stosowanego spółczynnika.

Dokładniejsze prawo tarcia.

135. Jeżeli pomiary nasze prowadzimy starannie, wyjątkowo chyba otrzymujemy błąd przechodzący pięć dziesiątych funta, a zaledwie możebna, by którekolwiek *tarcie średnie,* jakie otrzymaliśmy, dotknięte było błędem wynoszącym 0,5 funta. Ale przy wartości spółczynnika tarcia, która była użyta w tabeli III, odstępstwa dochodzą niekiedy do 0,9 funta. Przy jakimkolwiek innym spółczynniku tarcia, zamiast 0,27, odstępstwa by-

łyby nawet jeszcze wybitniejsze. Skoro zaś są one zbyt znaczne, by można je było przypisać błędom doświadczenia, musimy wnieść, że przyjęte przez nas prawo tarcia nie może być ściśle rzetelnem. Znaki odstępstw wskazują, że tarcie obliczone według tego prawa wypada zamałe dla ciężarów małych, a zawielkie dla ciężarów wielkich.

136. Prowadzi to nas tedy do wniosku, że może inna jaka zależność między F a R przedstawiałaby doświadczenia z wiernością większą, aniżeli pospolite prawo tarcia. Gdybyśmy zmniejszyli nieco spółczynnik, a następnie do iloczynu ze spółczynnika i ciężaru dodali pewną ilość stałą, zmiana taka sprowadziłaby dla małych ciężarów powiększenie wartości obliczonych, dla wielkich zaś zmniejszenie tych wartości. Wskazany więc tu przez nas sposób zmiany nadaje się do pogodzenia wartości zaobserwowanych i obliczonych.

137. Wnosimy stąd, że związek formy $F = x + yR$ wyrazi prawdopodobnie prawo poprawniejsze, w przypuszczeniu, że zdołamy oznaczyć x i y. Równanie jedno między x i y otrzymamy, wprowadzając którąkolwiek wartość R wraz z odpowiadającą jej wartością F, a drugie równanie da nam użycie innej podobnej pary wartości. Z dwu tych równań wyprowadzić możemy według zasad algebry elementarnej wartości x i y, najlepszy jednak wzór zyskamy, jeżeli skombinujemy razem wszystkie pary wartości odpowiednich. Do takiego zaś obliczenia użytą być musi metoda opisana w Dodatku, która, opierając się na wszystkich doświadczeniach, daje

rezultat dokładnie je przedstawiający. W ten sposób otrzymany wzór jest

$$F = 1{,}44 + 0{,}252\ R.$$

Wzór ten zestawiamy z doświadczeniami w tabeli IV.

TABELA IV. — TARCIE.

Tarcie drzewa sosnowego o takież drzewo; średnie wartości tarcia podane w tabeli II (poprawione co do tarcia bloka), porównane ze wzorem $F = 1{,}44 + 0{,}252\ R$.

Numer doświadczenia	R. Całkowity ładunek sań w funtach	Średnie wartości tarcia poprawione	F. Obliczone wartości tarcia	Odstępstwa między tarciem zaobserwowanem a obliczonem
1	14	4,7	5,0	+ 0,3
2	28	8,2	8,5	+ 0,3
3	42	12,2	12,0	— 0,2
4	56	15,8	15,6	— 0,2
5	70	19,4	19,1	— 0,3
6	84	23,0	22,6	— 0,4
7	98	25,8	26,1	+ 0,3
8	112	29,3	29,7	+ 0,4

Kolumna czwarta zawiera wartości obliczone; tak, naprzykład, w doświadczeniu 4, gdy ciężar wynosi 56 f., wartość obliczona jest $1{,}44 + 0{,}252 \times 56 = 15{,}6$; różnicę 0,2 między wartością tak obliczoną a wartością zaobserwowaną znajdujemy w kolumnie ostatniej.

138. Zwrócimy tu jeszcze uwagę, że największe w kolumnie tej odstępstwo czyni 0,4 funta; wzór obecny zatem przedstawia doświadczenia ze znaczną ścisłością. Jest on niewątpliwie bliższy prawdy, aniżeli prawo po-

przednie (ustęp 132); w samej rzeczy, różnice są teraz takie, że wypływać mogą istotnie z błędów, nieuniknionych przy prowadzeniu doświadczeń.

139. Wzór ten używany być może do obliczania tarcia dla ciężarów między 14 f. a 112 funtami. Tak naprzykład, jeżeli ciężar wynosi 63 f., tarcie jest 1,44 + 0,252 × 63 = 17,3 f., co nie odstępuje znacznie od 17,0 f., którą to wartość otrzymujemy według prawa prostszego. W każdym razie winniśmy się strzedz stosowania wzoru tego do ciężarów, nieprzypadających między granicami największego i najmniejszego ciężaru, jakie użyte były w doświadczeniach, które posłużyły do oznaczenia wartości liczebnych we wzorze; tak naprzykład, biorąc przypadek skrajny, gdy $R = 0$, wzór wykaże nam tarcie 1,44, co jest oczywistą niedorzecznością; tu błądzi wzór przez nadmiar, gdy natomiast, gdyby ciężar był bardzo wielki, wzór ten błądziłby niewątpliwie przez niedomiar.

Spółczynnik zmienia się wraz z ciężarami użytemi.

140. W jednym z następnych wykładów użyjemy płyty, którą tu zbadaliśmy, jako równi pochyłej i korzystać będziemy ze zdobytej obecnie znajomości jej tarcia, posługiwać się zaś tam będziemy ciężarami zawartemi między 7 f. a 56 funtami. Przyjmując zwykłe prawo tarcia, znaleźliśmy, że 0,27 jest najdokładniejszą wartością tego spółczynnika, gdy ciężary zawierają się między 14 f. a 112 funtami. W przypuszczeniu, że bierzemy pod uwagę jedynie ciężary aż do 56 f., okazuje się, że

spółczynnik 0,288 przedstawia najlepiej doświadczenia w tym obrębie, chociaż dla 112 f. dałby on błąd prawie 3 funtów. Rezultaty obliczone według wzoru $F = 0,288\,R$ zestawione są w tabeli V, w której różnica największa wynosi 0,7 funta.

TABELA V. — TARCIE.

Tarcie drzewa sosnowego o takież drzewo; średnie wartości tarcia podane w tab. II (poprawione co do tarcia bloka), porównane ze wzorem $F = 0,288\,R$.

Numer doświadczenia	R. Całkowity ciężar sań w funtach	Poprawione wartości średnie tarcia	F. Obliczone wartości tarcia	Odstępstwa między tarciem zaobserwowanem a obliczonem
1	14	4,7	4,0	— 0,7
2	28	8,2	8,1	— 0,1
3	42	12,2	12,1	— 0,1
4	56	15,8	16,1	+ 0,3

141. Zwyczajne to jednak prawo tarcia zastąpić możemy prawem dokładniejszem z ust. 137, a wzór obliczony tak, by zgadzał się jak najlepiej z doświadczeniami aż do 56 f., pomijając ciężary wyższe, jest $F = 0,9 + 0,266\,R$. Wzór ten otrzymany został za pomocą metody, do której odwoływaliśmy się w ust. 137. Przekonywamy się, że przedstawia on doświadczenia lepiej, aniżeli wzór użyty w tabeli V. Między wzmiankowanemi granicami jest również wzór ten dokładniejszy, aniżeli wzór użyty w tabeli IV. Jest on zestawiony z doświadczeniami w tabeli VI, przyczem zwracamy uwagę, że przedsta-

wia on je z wielką ścisłością, żadne bowiem odstępstwo nie przekracza 0,1.

TABELA VI. — TARCIE.

Tarcie drzewa sosnowego o takież drzewo; średnie wartości tarcia podane w tabeli II (poprawione co do tarcia bloka), porównane ze wzorem $F = 0{,}9 + 0{,}266\,R$.

Numer doświadczenia	R. Całkowity ciężar sań w funtach	Poprawione wartości średnie tarcia	F. Obliczone wartości tarcia	Odstępstwa między tarciem zaobserwowanem a obliczonem
1	14	4,7	4,6	— 0,1
2	28	8,2	8,3	+ 0,1
3	42	12,2	12,1	— 0,1
4	56	15,8	15,8	0,0

Kąt tarcia.

142. Oprócz metody, którą poznaliśmy, jest jeszcze inna metoda badania wpływu tarcia. Przyrząd do celu tego służący wskazany jest na fig. 33 (str. 104), w której $B\,C$ przedstawia poprzednio przez nas użytą płytę sosnową. Jest ona teraz osadzona tak, by można ją było obracać dokoła jednego końca B; koniec C zawieszony jest na haku łańcucha, opuszczonego z bloka „*epicykloidalnego.*" Blok ten bardzo jest odpowiedni do obecnego celu. Za jego pomocą pochylenie płyty może być uregulowane z jaknajwiększą dokładnością, gdy łańcuch podnoszący G trzymamy w jednej a łańcuch

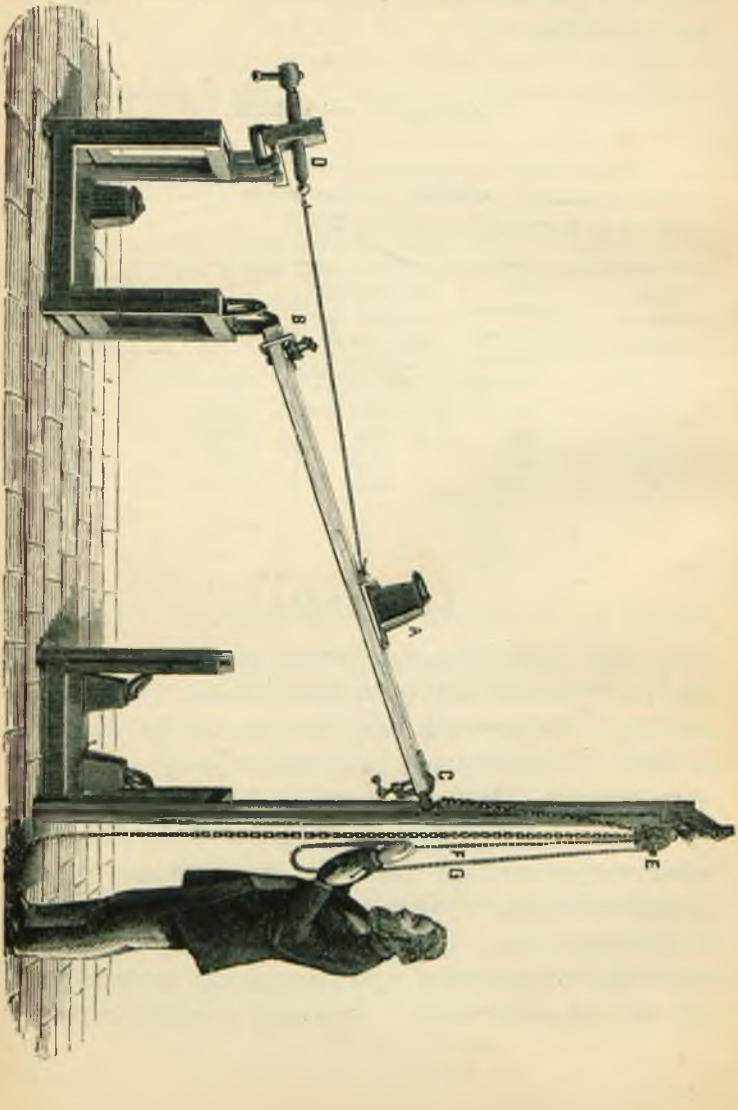

Fig. 33.

opuszczający F w drugiej ręce. Inna znaczna dogodność bloka tego polega na tem, że ładunek nie zbiega ku dołowi, gdy łańcuch podnoszący puszczony jest swobodnie. Płyta przyczepiona jest do zawiasy, na której się obraca. Obie podpory, które podtrzymują zarówno zawiasę jak i blok, są obciążone dla zapewnienia należytej stateczności. Pochylenie płyty daje się łatwo oznaczyć przez zmierzenie różnicy wysokości dwu jej końców ponad podłogą, i odrysowanie tego według dokładnej skali. Szruba wstrząsająca D, której użycie podaliśmy wyżej, jest również przytwierdzona do podpory, w położeniu wskazanem na figurze.

143. Dajmy, że sanie A zostały zważone i umieszczone na równi pochyłej B C; jeżeli koniec C jest słabo tylko wzniesiony, sanie pozostają w spoczynku; pochodzi to stąd, że tarcie między saniami a płaszczyzną znosi działanie siły ciężkości. Dajmy jednak, że za pomocą bloka podnosimy stopniowo koniec C; w takim razie doprowadzimy wreszcie płytę do wzniesienia, przy którem sanie poruszą się i ruchem przyśpieszonym zbiegną ku dołowi równi. Kąt wzniesienia równi, przy którym to następuje, nazywa się kątem tarcia statycznego.

144. Ciężary, jakiemi sanie w doświadczeniu tem obciążone były, wynosiły 14 f., 56 f. i 114 f., a rezultaty podane są w tabeli VII.

TABELA VII. — KĄT TARCIA STATYCZNEGO.

Wygładzona płaszczyzna sosnowa 72″ × 11″ dźwiga obciążone sanie sosnowe 9″ × 9″; koniec jeden płaszczyzny podnosi się stopniowo, dopóki się sanie nie poruszają.

Numer doświadczenia	Całkowity ciężar sań w funtach	Kąt wzniesienia. Szereg pierwszy	Kąt wzniesienia Szereg drugi	Wartości średnie kątów
1	14	19,5°	—	19,5°
2	56	20,1°	17,2°	18,6°
3	112	20,3°	18,9°	19,6°

Widzimy, że ciężar 56 f. porusza się, gdy płaszczyzna osiąga pochylenie 20,1° w pierwszym, a 17,2° w drugim szeregu doświadczeń, wartość zaś średnia podana jest w kolumnie piątej. Wartości średnie trzech tych różnych ciężarów dosyć blisko do siebie nawzajem przystępują, by z nich wyczytać uderzające prawo, że *kąt tarcia nie zależy od wielkości ciężaru.*

145. Możemy wszakże postępować inaczej jeszcze dla oznaczenia kąta tarcia, a mianowicie nadając ciężarowi wstrząśnięcia i uważając, czy ruch dalej zachodzić będzie. Działanie to wymaga pomocy asystenta, który wstrząsa ciężar za pośrednictwem szruby, podczas gdy zwolna powiększa się wzniesienie płaszczyzny. Rezultaty tych doświadczeń podane są w tabeli VIII.

TABELA VIII. — KĄT TARCIA.

Wygładzona płaszczyzna sosnowa 72″ × 11″ dźwiga obciążone sanie sosnowe 9″ × 9″; koniec jeden płaszczyzny podnosi się stopniowo, aż sanie po doznaniu potrącenia poruszają się dalej jednostajnie.

Numer doświadczenia	Całkowity ciężar sań w funtach	Kąt pochylenia
1	14	14,3°
2	56	13,0°
3	112	13,0°

Z tablicy tej widzimy również, że kąt tarcia jest niezależny od ciężaru, ale jest on w przypadku tym o 5° lub 6° mniejszy od kąta, jaki był potrzebny do sprowadzenia ruchu, gdy sanie nie doznawały potrącenia.

146. Przyjmuje się powszechnie, że spółczynnik tarcia równa się stycznej trygonometrycznej kąta tarcia a zasada ta okazuje się w samej rzeczy prawdziwą, jeżeli używamy zwykłego prawa tarcia. Ponieważ widzieliśmy wszakże, że prawo to tarcia jest w przybliżeniu jedynie dokładne, nie możemy się też spodziewać, by i to dalsze prawo zupełnie się sprawdzało.

147. Gdy sanie ulegają potrąceniu, wartość średnia kąta tarcia wynosi 13,4°. Styczna trygonometryczna tego kąta jest 0,24, a zatem o 11 prawie odsetek mniejsza, od oznaczonego wyżej spółczynnika tarcia 0,27. Średnia wartość kąta tarcia, gdy sanie nie są poruszone, wynosi 19,2°, a stycznia trygonometryczna tego kąta 0,35. Do-

świadczenia tabeli I są, jak to zaznaczyliśmy wyżej, bardziej niezadawalniające, odwołujemy się tu jednak do nich, by wykazać, że, o ile posługiwać się niemi możemy, spółczynnik tarcia w żadnym razie nie jest równy stycznej kąta tarcia. Jeżeli przyjmiemy wartości średnie, podane w ostatniej kolumnie tabeli I, najdokładniejszy spółczynnik tarcia, jaki się w nim wyprowadzić daje, jest 0,41. Czy to zatem sanie doznają czy też nie doznają potrącenia, styczna trygonometryczna kąta tarcia jest mniejsza aniżeli odpowiadający spółczynnik tarcia. Jeżeli sanie są potrącane, styczna jest o 11 odsetek mniej więcej mniejsza aniżeli spółczynnik, a gdy sanie nie są potrącane, jest o 14 odsetek mniejsza. Są wszelako niewątpliwie pewne przypadki, w których różnice te są dostatecznie małe, by mogły być pominięte, i w których zatem prawo to uznane być może za rzetelne.

Drugie prawo tarcia.

148. Powierzchnia sań drewnianych wynosi 9"×9", możemy się jednak przekonać, że tarcie pod danem obciążeniem jest w istocie rzeczy jednakiem, jakąkolwiek byłaby powierzchnia sań, dopóki materyał ich pozostaje niezmiennym. Wypływa to jako wniosek z prawa przybliżonego, że tarcie proporcyonalne jest do ciśnienia. Dajmy, że ciężar wynosi 100 funtów, a powierzchnia sań 100 cali, co sprowadza ciśnienie 1 funta na cal kwadratowy powierzchni sań, a zatem tarcie, jakie przezwyciężyć należy na każdym calu kwadratowym, czyni 0,27 funta, czyli na całe sanie 27 funtów. Jeżeli natomiast,

sanie mają powierzchnię tylko 50 cali kwadratowych, ciężar wywiera ciśnienie 2 f. na cal kwadratowy; tarcie będzie zatem $2 \times 0,27 = 0,54$ f. na każdy cal kwadratowy, całkowite zaś tarcie uczyni $50 \times 0,54 = 27$ f., takież samo, jak poprzednio, — a zatem tarcie całkowite jest niezależne od rozległości powierzchni. Prawo to utrzymuje się nawet, choćby ciężar nie był, jak to tu przypuszczaliśmy, jednostajnie rozłożony na powierzchni sań.

UWAGI OGÓLNE.

149. Ważność tarcia w mechanice wypływa stąd, że jest ono wszędzie obecnem. Ujawnia się nam często, niszcząc lub powstrzymując ruch, występuje jako marnotrawca naszej energii, jako źródło straty lub niedogodności. Ale, z drugiej strony, tarcie daje często pośrednio sposoby wywoływania ruchu, jak tego wspaniały przykład nastręcza nam lokomotywa. Ponieważ jestto maszyna bardzo ciężka, koła jej naciskane są ściśle do szyn; powstaje tu zatem tarcie dostatecznie wielkie do powstrzymania ślizgania się kół, a stąd, gdy maszyna znagla koła do obracania się, toczyć się muszą naprzód. Spółczynnik tarcia żelaza kutego po żelazie kutem czyni około 0,2. Dajmy, że lokomotywa waży 67200 f., a część tego ciężaru, którą dźwigają koła poruszające, wynosi 22400 f., tarcie więc kół poruszających o szyny wynosi 4480 f. Jestto największa siła, jaką lokomotywa wywierać może na drodze poziomej. Oceniono, że siła 1 funta na każde 224 f. wagi pociągu wystarcza do utrzymywania ruchu, a zatem lokomotywa, jaką tu przyjęliśmy,

mogłaby posuwać po drodze poziomej ciężar miliona przeszło, 1.003.520 funtów.

150. Nie potrzebujemy wszakże odwoływać się do maszyny parowej, by dostrzedz pożytek tarcia. Nie moglibyśmy bez niego istnieć. Przedewszystkiem, nie moglibyśmy się zgoła poruszać, chód nasz bowiem możliwy jest jedynie przy udziale tarcia, zachodzącego między podeszwami naszego obuwia a gruntem; ani też, gdybyśmy raz wprawieni byli w ruch, nie moglibyśmy się zatrzymać, chyba wchodząc w starcie z jakimkolwiek innym przedmiotem, albo też chwytając się jakiejkolwiek po drodze zawady. Z trudnością zaledwie moglibyśmy rzeczy ujmować, gwoździe nie trzymałyby się w drzewie, a szruby byłyby również bezużyteczne. Budynków niepodobna byłoby wznosić, a co większa, wzgórza nawet i góry znikałyby stopniowo i ląd stały pogrążyłby się ostatecznie pod poziom morza. Tarcie, o ile to nas dotyczy, jest również doniosłem prawem natury, jak i prawo ciążenia. Nie powinniśmy pomijać go w naszych poszukiwaniach mechanicznych, dlatego, że je nieco utrudnia. Tarcie ulega prawom; działanie jego nie jest chwiejne lub niepewne. Jeżeli jest niedogodne, może być zmniejszone, jeżeli jest użyteczne, może być powiększone; w wykładach zaś naszych o maszynach prostych, do których teraz przystępujemy, nastręczy się nam sposobność opisywania przyrządów, które zostały zbudowane na podstawie praw tarcia.

WYKŁAD VI.

Blok.

Wstęp. — Tarcie sznura o pręt żelazny. — Pożytek bloka. — Blok wielki i mały. — Prawo tarcia w bloku. — Koła. — Energia.

WSTĘP.

151. Blok stanowi wstęp odpowiedni do ważnego działu nauki, który traktuje o maszynach. Zanim jednak przystąpimy do przedmiotu tego, o którym mówić będziemy w kilku najbliższych wykładach, należy nam wyjaśnić, co rozumieć należy w mechanice przez „pracę" i przez „energię", która jest zdolnością wykonywania pracy; dlatego też do obecnego wykładu wtrącimy krótki zarys tej rzeczy.

152. Blok jest maszyną, która służy do zmiany kierunku siły. Zachodzi często potrzeba stosowania siły w kierunku różnym od kierunku, w którym ona działanie swe wywiera, a blok właśnie to umożebnia. Nie będziemy teraz mówili o urządzeniach do wzmożenia działalności siły, w których blokom ważny przypada udział, tem

bowiem zajmiemy się w następnym wykładzie; obecnie zastanowimy się jedynie nad zmianą kierunku. W istocie rzeczy, jak to wkrótce poznamy, pewna część siły przy użyciu bloka nieruchomego ulega nawet stracie, a stąd, w ścisłem znaczeniu wyrazu, blok taki nie może być uważany za maszynę.

153. Przypadki, w których nastręcza się potrzeba użycia pojedynczego bloka nieruchomego, są liczne i powszednie. Dajmy, że trzeba podnieść wór zboża z dolnego na jedno z górnych piętr gmachu. Może go wprawdzie dźwignąć człowiek, obładowawszy się nim, musi on wszakże unieść własny swój ciężar wraz z ciężarem worka, a zatem ilość zużytego wysiłku jest większa nad konieczną potrzebę. Dajmy jednak, że na szczycie gmachu umieszczony jest blok, przez który przechodzi sznur; wtedy, jeżeli człowiek przywiąże jeden koniec sznura do worka, a ciągnie koniec drugi, podniesie ciężar, nie dźwigając przytem własnego swego ciężaru. Blok więc dał nam sposób, za pomocą którego siła działająca ku dołowi zmieniła się co do kierunku na siłę działającą ku górze.

154. Ciężary, sznury i bloki, używane w oknach naszych do zrównoważenia ciężaru zasłon, dają nam pospolity bardzo przykład, jak blok zmienia kierunek siły. Tu siła ciężaru, działająca ku dołowi, zmienia się na siłę działającą ku górze, a równoważącą prawie ciężar zasłony.

Tarcie sznura o pręt żelazny.

155. Każdemu znaną jest dobrze zwykła forma bloka; składa się on z koła czyli krążka, mogącego się swobodnie na swej osi obracać, na obwodzie zaś posiada rowek, przez który przechodzi sznur. Dlaczegóż wszakże potrzeba blokowi postać taką nadawać? Czyżby kierunek sznura nie zmieniał się, gdybyśmy go przeprowadzili poprostu nad prętem, również dobrze, jak przy użyciu bardziej zawiłego bloka. Na pytanie to odpowiemy najlepiej, jeżeli wykonamy rzeczywiście to doświadczenie, do czego nam posłuży przyrząd przedstawiony na fig. 34.

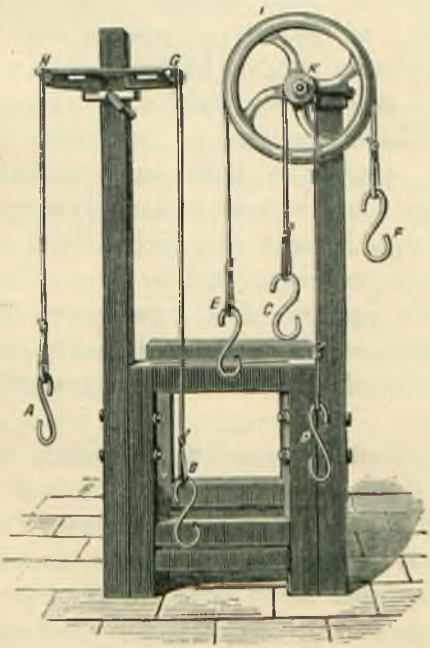

 Fig. 34.

Widzimy tu dwa kołki żelazne *G* i *H*, mające po 0,6" w średnicy, a oddalone między sobą mniej więcej o 8"; na kołkach tych przesunięty jest sznur, zaopatrzony w haki na obu swych końcach. Jeżeli, zawiesiwszy na haku ciężar 14 f., ciągnę hak *B*, wywrzeć mogę siłę dostateczną do podźwignięcia ciężaru na haku *A*; przy takiem wszakże urządzeniu czuję, że wywrzeć musiałem siłę znacznie większą, aniżeliby to miało miejsce, gdybym wprost podnosił 14 funtów w górę.

156. By kwestyę tę zbadać dokładnie, zobaczmy, jaki ciężar zawiesić należy na haku *B*, by starczył do podźwignięcia *A*. Otóż, przekonywamy się, że dla podniesienia 14 f. na haku *A* potrzeba na haku *B* nie mniej nad 47 f., zachodzi tu zatem bardzo znaczna strata siły,— dwie trzecie przeszło wywartej siły wydatkujemy bezużytecznie. Jeżeli zamiast 14 f. zawiesimy jakikolwiek inny ciężar, otrzymamy tenże sam rezultat, to jest, że przeszło trzy razy większy ciężar potrzebny jest do podniesienia tego ładunku za pośrednictwem sznura, przechodzącego przez kołki. Gdyby więc robotnik, chcąc dźwignąć wór, przeprowadził sznur przez dwa podobne pręty, musiałby na każde dziesięć funtów wagi worka wyłożyć siłę trzydziestu funtów, coby stanowiło ogromną stratę siły.

157. Zkądżeż pochodzi ta strata? Sznur, poruszając się, ślizga się po powierzchni kołków żelaznych. Jakkolwiek są one starannie wyrównane i wygładzone, jednakże, gdy sznur ulega wyprężeniu, naciska on je silnie, a stąd pewien zasób siły jest potrzebny, by sznur po żelazie przesuwać. Innemi słowy, gdy usiłujemy za

pomocą takiego urządzenia dźwignąć w górę 14 f., mamy do przezwyciężenia nietylko ciężar zawieszony, ale i inną jeszcze siłę, powstającą przy ślizganiu się sznura po żelazie, siła zaś ta pochodzi z tarcia. Gdyby tu tarcia tego nie było, siła 14 f. na jednym haku zrównoważyłaby dokładnie 14 f. na drugim, najlżejszy zaś dodatek do jednego z tych ciężarów wywołałby już jego spadek, a podniesienie drugiego ciężaru. Jeżeli więc zmuszeni jesteśmy zmieniać kierunek siły, obmyślić winniśmy sposoby, któreby nie wymagały ofiary tak znacznej, jak urządzenie obecnie przez nas użyte.

Pożytek bloka.

158. Zajmiemy się teraz dochodzeniem, dlaczego pośrednictwo bloka daje możność unikania tarcia. Jest rzeczą oczywistą, że winniśmy postarać się o urządzenie takie, przy którem sznur nie potrzebowałby się ślizgać po powierzchni żelaza. Celu tego dopniemy właśnie za pomocą bloka, do czego niech nam posłuży, dajmy, blok *I* (fig. 34). Jestto krążek z żelaza lanego, o 14" średnicy, a na obwodzie posiadający wyżłobienie, przedstawiające w przecięciu postać głoski *V*, w którem mieści się sznur; koło obraca się dokoła osi z żelaza kutego, o średnicy $^5/_8$ cala, i dobrze natłuszczonej. Sznur użyty ma około 0,25" w średnicy.

159. Na hakach *E* i *F*, uczepionych do każdego końca sznura, zawieszamy po 14 funtów. Równe te ciężary równoważą się nawzajem. Według doświadczenia z kolkami możnaby sądzić, że należałoby ciężar na je-

dnym haku potroić, aby drugi dźwignąć w górę; widzimy jednak teraz, że już dodatek 0,5 funta, umieszczony na jednym haku, sprowadza jego spadek, a podnoszenie się ciężaru drugiego. Jesto znaczne ulepszenie, — 0,5 funta spełnia toż samo, do czego poprzednio trzeba było 35 funtów używać. Usunęliśmy przeważną część tarcia, chociaż nie zdołaliśmy pokonać go całkowicie, jeżeli bowiem do jednego z ciężarów dodamy tylko 0,25 funta, powiększenie takie spadku jego nie sprowadzi.

160. Czemuż więc ulepszenie to zawdzięczamy? Gdy ciężar opada, sznur nie ślizga się po kole, ale sprawia to tylko, że koło wraz z nim się obraca, a zatem na obwodzie bloka nie ma zgoła, albo jest słabe tylko tarcie, przenosi się zaś ono na oś koła. Mamy wprawdzie jeszcze pewien opór do przezwyciężenia, na wygładzonych wszakże i natłuszczonych osiach żelaznych tarcie jest bardzo małe, a na tem korzyść bloka polega.

W każdym bloku zachodzi jeszcze niewiellka strata siły, jaką zużywa zginanie sznura; obecnie zresztą nas to nie dotyczy, przy giętkim bowiem sznurze, jakiego tu używaliśmy, wpływ ten jest zgoła nieznaczny; przy wielkich wszakże, sztywnych sznurach strata ta nabiera ważności. Wysokość straty, jaka zachodzi przy użyciu sznurów różnych rodzajów, oznaczono starannemi doświadczeniami.

Blok wielki i mały.

161. Znaczną osiągamy często korzyść, używając raczej wielkich aniżeli małych bloków. Wielkość siły,

potrzebnej do pokonywania tarcia, zmienia się w stosunku odwrotnym do wymiarów bloka. Okażemy to doświadczalnie, za pomocą przyrządu fig. 34. Mały blok *K* połączony jest z wielkim blokiem *I*; stanowią one właściwie wspólny przyrząd i obracają się razem dokoła jednej osi. Jeżeli więc oznaczymy najpierw tarcie sznura na bloku wielkim, a następnie tarcie sznura na bloku małym, jakakolwiek różnica, którąby się tu okazała, zależyć może jedynie od różnicy wymiarów, ponieważ wszystkie inne okoliczności są jednakie.

162. Przy dokonywaniu tych doświadczeń zwrócić winniśmy uwagę na następny szczegół. Bloki wraz z osadami, na których są umocowane, ważą kilka funtów, występuje tu zatem tarcie pochodzące z ciężaru bloków, niezależne zupełnie od ciężarów, które na hakach zawieszamy. Powinniśmy zatem, jeżeli to możebna, usunąć tarcie samychże bloków, by wysokość tarcia, jaka się okaże, zależną była całkowicie od ciężarów podnoszonych. Osiągnąć to można łatwo. Gdy sznur z hakami znajduje się na wielkim bloku, widzimy, że ciężar 0,16 funta, umieszczony na jednym z haków, dajmy *E*, wystarcza do przezwyciężenia tarcia bloka i sprowadza spadek tego haka *E*, a podnoszenie się haka *F*. Jeżeli przeto pozostawimy 0,16 funta na haku *E*, przyjąć możemy, że tarcie zależne od ciężaru bloka, sznura i haków jest zniesione.

163. Zawieszam teraz po 14 funtów na każdym z haków *E* i *F*. Nadmiar potrzebny do wywołania spadku haka *E* wraz z jego obciążeniem wynosi 0,28 funta, a to prócz pozostawionych na haku 0,16 funta. Widzimy

przeto, że przy użyciu wielkiego bloka tarcie, jakie pokonać należy przy podnoszeniu 14 f., wynosi 0,28 funta.

164. Zupełnie toż samo doświadczenie wykonajmy teraz z blokiem małym. Przenosimy więc tenże sam sznur z hakami na blok *K*, ale przekonywamy się, że 0,16 funta teraz nie wystarcza do przezwyciężenia tarcia bloka; nakładamy tedy dalej ciężary, dopóki hak *C* nie zacznie się obniżać, a to ma miejsce, gdy obciążenie dochodzi 0,95 funta. Ładunek ten pozostawiamy na haku *C* jako przeciwwagę, a to dla powodów wyżej podanych. Umieszczam teraz ciężar 14 f. na haku *C*, takiż sam ciężar na haku *D*, a widzicie, że *C* zaczyna opadać, gdy otrzymuje ładunek dodatkowy 1,35 f.; takie zatem tarcie przezwyciężyć trzeba, gdy za pośrednictwem bloka *K* podnosimy ciężar 14 funtów.

165. Rezultaty powyższe zestawmy z wymiarami bloków. Najprostszym sposobem zmierzenia właściwego obwodu bloka, gdy dźwiga dany sznur, będzie zmierzenie długości tego sznura, która go dokładnie otacza. Długość w ten sposób oznaczona zależyć zawsze będzie w pewnej mierze od grubości sznura. Obwody obu bloków, jak poznajemy, wynoszą 43,0" i 9,5," a stosunek tych liczb czyni 4,5. Odpowiadające im opory, przez tarcie powodowane, jak widzieliśmy, są 0,28 f. i 1,35 f., a większa z tych liczb przewyższa mniejszą 4,8 razy. Liczba ta jest bardzo bliska 4,5, zwłaszcza, że jak to wyżej wyjaśniono, w doświadczeniach tyczących się tarcia nie możemy zupełnej dokładności oczekiwać. W przypadku obecnym różnica wynosi tylko $1/_{16}$ część całej liczby, możemy więc

to uważać za dowód prawa, że *tarcie bloka jest odwrotnie proporcyonalne do jego obwodu.*

166. Przyczyna, dla której tarcie zmniejsza się, gdy wielkość bloka wzrasta, łatwo jest zrozumiała. Tarcie działa na obwód osi, dokoła której krążek się obraca, a występuje jako siła, która dąży do opóźnienia ruchu. Im większy zaś jest krążek, tem znaczniejszą jest odległość tej osi od siły, która dąży do przezwyciężenia tarcia, a tem samem też mniejsza być może ta siła. Zrozumiecie to zapewne lepiej, gdy poznamy zasadę drążka.

167. Z uwag tych wyprowadzić możemy regułę praktyczną, że wielkie bloki sprowadzają oszczędność siły, a zasada ta dobrze jest znana inżynierom. Wielkich zresztą bloków używać wypada nietylko dla zmniejszenia tarcia, ale również i dla unikania straty przez nadmierne zginanie sznura. Sznur zgina się stopniowo na obwodzie wielkiego bloka działaniem siły daleko słabszej od siły, jaka jest potrzebna, by go do bloka mniejszego przystosowywać; przez nadmierne nadto wyginanie sznur uledz może uszkodzeniu. W kopalniach węgla kubły naładowane węglem wydobywają się na powierzchnię za pomocą lin drucianych, które przechodzą przez blok umieszczony w zabudowaniu górnem, blok zaś ten ma wymiary bardzo znaczne, a to dla powodów tu przytoczonych.

Prawo tarcia w bloku.

168. Mam tu blok drewniany, mający 3,5" w średnicy; otwór wyłożony jest mosiądzem, a blok obraca się bardzo swobodnie na osi żelaznej. Sznur z hakam

umieszczam w wyżłobieniu. Mosiądz przesuwając się po żelazie sprowadza słabe tarcie, a gdy na każdym haku zawieszamy po 7 f., dodatek 0,5 funta do jednego z nich wywołuje spadek tego i podnoszenie się drugiego haka. Gdy na każdym haku umieszczamy 14 f., 0,5 f. już nie wystarcza, — potrzeba 1 funta; gdy zatem ciężar się podwaja, podwaja się i tarcie. Powtarzając doświadczenie to z 21 f. i 28 f. na każdej stronie, widzimy, że ciężary potrzebne do pokonania tarcia wynoszą 1,5 f. i 2 funty. W czterech tych doświadczeniach użyte ciężary są w stosunku liczb 1 : 2 : 3 : 4, a siły potrzebne do przezwyciężenia tarcia, 0,5 f., 1 f., 1,5 f. i 2 f. są w tymże samym stosunku. A zatem tarcie proporcyonalne jest do ciężaru.

Koła.

169. Wprowadzenie kół jest jednym z najłatwiejszych i najskuteczniejszych sposobów przezwyciężania tarcia. Sanie są wybornym wozem na powierzchni gładkiej, jak na lodzie, ale w ogólności nieprzydatne do użytku na zwykłych drogach; pochodzi to stąd, że tarcie między saniami a drogą jest nader znaczne, konie więc musiałyby na poruszanie sań zużywać siłę bardzo znaczną w stosunku do przewożonego ciężaru. Natomiast, wóz należycie na kołach osadzony porusza się po drodze z największą łatwością, gdyż obwód koła nie ślizga się, a zatem nie ma tarcia między kołem a drogą; koło obraca się wprawdzie dokoła swej osi, ślizganie zatem, a stąd w dalszym ciągu i tarcie ma miejsce na osi, oś ta wszakże

i koło są dokładnie do siebie nawzajem przystosowane, a że nadto powierzchnie wygładzone są tłuszczem, tarcie przeto jest tu nader słabe.

170. Przy kołach wielkich tarcie na osi jest mniejsze, aniżeli przy kołach małych. Inna jeszcze korzyść kół wielkich polega na tem, że nie zagłębiają się znacznie w doły napotykane na drodze, a stąd mają większą łatwość przezwyciężania niezliczonych przeszkód drobnych, od których wolną nie jest i najlepsza nawet droga.

171. Gdy jest rzeczą pożądaną, by blok obracał się z nadzwyczaj słabem tarciem, oś jego nie wiruje na podporach nieruchomych, ale osadzona jest na odpowiednio zestawionych kołach. Układ kół takich widzieć możemy na fig. 66; gdy oś się obraca, tarcie jej o koła sprawia, że i te ostatnie kręcą się ruchem stosunkowo powolnym, a stąd całkowite tarcie przenosi się na osie tych czterech kół; osie te obracają się na swych podporach nadzwyczaj powolnie, blok przeto doznaje słabego tylko tarcia. Jak drobne jest tarcie bloka w ten sposób osadzonego, wskaże nam następne doświadczenie. Na bloku takim umieszczamy sznur jedwabny, a do obu jego końców przywiązujemy ciężary 1-funtowe, które się tedy równoważą. Posiadamy tu nadto pewną liczbę cienkich haczyków drucianych, z których każdy waży 0,001 funta, a przy ich pomocy przekonywamy się, że gdy po jednej stronie przyczepimy ciężar 0,004 funta, wystarcza to już do przezwyciężenia tarcia i do wprawienia w ruch ciężarów.

Energia.

172. W związku z zasadą tarcia, a zarazem jako wstęp do nauki o maszynach prostych, wielkiej jest wagi znajomość pojęcia „pracy," albo, jak to się nazywa, „energii." Zrozumienie znaczenia tego wyrazu, jak się on używa w mechanice, wymaga pewnego zastanowienia.

173. W mowie potocznej każda czynność człowieka, która sprowadza znużenie, bądź to ciała bądź umysłu, nazywa się pracą. W mechanice rozumiemy przez energię ten wyłączny rodzaj pracy, który bezpośrednio lub pośrednio równoważny jest z podnoszeniem ciężarów.

174. Dajmy, że na podłodze spoczywa ciężar, obok zaś znajduje się stół; jeżeli człowiek podnosi ciężar i umieszcza go na stole, wysiłek, jaki na to wydatkuje, jest energią w tem znaczeniu, w jakiem się wyraz ten używa w mechanice. Wielkość wysiłku, jaki jest potrzebny do umieszczenia ciężaru na stole, zależy od dwu okoliczności: od wielkości ciężaru i od wysokości stołu. Rzecz jasna, że obie te okoliczności brać musimy pod rachunek. Chociaż bowiem znamy ciężar, jaki podnosimy, nie możemy powiedzieć, jakiego tu potrzeba wysiłku, dopóki nie znamy wysokości, o jaką ciężar ten ma być podniesiony; a jeżeli znamy tę wysokość, nie możemy ocenić ilości wysiłku, dopóki nie znamy ciężaru.

175. Do wyrażenia ilości energii przyjęto drogę następną. Drobny wysiłek, jaki jest potrzebny do podniesienia jednego funta na wysokość jednej stopy, obrano za jednostkę, której używamy do porównania przy oce-

nie wszelkiej innej ilości energii. Ilość ta wysiłku nazywa się w mechanice jednostką energii, a niekiedy też „stopo-funtem.”

176. Jeżeli ciężar 1 f. podniesiony został na wysokość 2 stóp, lub też ciężar 2 f. na wysokość 1 stopy, potrzeba było wyłożyć dwa razy więcej energii, aniżeli przy podniesieniu ciężaru 1 f. o 1 stopę, co znaczy, 2 stopofunty.

Jeżeli ciężar 5 f. podniesiony został na stół o wysokości 3 stóp, ile jednostek energii zużyć należało? Podniesienie 5 f. o 1 stopę wymaga 5 stopofuntów, a działanie to powtórzone być musi jeszcze dwa razy, zanim ciężar przybędzie na płytę stołu. Na wykonanie więc pełnej tej czynności potrzeba 15 stopofuntów.

Jeżeli 100 f. podnieść mamy o 20 stóp, potrzeba 100 stopofuntów energii na pierwszą stopę, tyleż na drugą, trzecią i t. d., aż do dwudziestej, co ogółem czyni 2000 stopofuntów.

Nastręcza się też tu do rozstrzygnięcia kwestya praktyczna. Co jest korzystniej dźwignąć za pomocą sznura przechodzącego przez pojedyńczy blok nieruchomy, czy głaz ważący 40 f. na wysokość 20 stóp, czy też głaz ważący 50 f. na wysokości 15 stóp? Obliczmy, ile energii wyłożyć trzeba w każdym z tych przypadków. Ponieważ 40 razy 20 czyni 800, w pierwszym przeto razie żądana energia wynosi 800 stopofuntów; ale 50 razy 15 jest 750, a zatem ilość pracy w drugim razie wynosi tylko 750. Mniejszego tedy trzeba wysiłku do dźwignięcia 50 f. na 15 stóp, aniżeli 40 f. na 20 stóp.

177. Działalność każdego źródła energii, czyto ono tkwi w mięśniach człowieka lub zwierząt, czyto

w kołach wodnych, maszynach parowych lub innych motorach, mierzy się ilością stopofuntów wytworzonych w ciągu jednostki czasu.

Siła maszyny parowej określa się, jako równoważna danej ilości koni parowych. Znaczy to, naprzykład, że maszyna o sile 3 koni, pracując przez godzinę, dostarczyć może tyle pracy, ile jej dać mogą 3 konie, pracując przez tenże sam czas. Siła konia jest to wszakże ilość niepewna, różna dla różnych zwierząt, i niezupełnie jednostajna zawsze dla jednego i tegoż samego osobnika; wybór zatem tej miary do oceny działalności maszyny parowej jest niewłaściwy. Zastępujemy ją też konwencyjną tylko, to jest zależącą od umowy, jednostką, zwaną siłą konia parowego, która jest wszakże znacznie większą aniżeli praca, jakiej wciąż dostarczać może koń zwykły. Maszyna parowa o sile jednego konia parowego wykonać może 33000 stopofuntów przez minutę.

178. Rachunek liczebny konia parowego objaśnimy przykładem następnym. Jeżeli kopalnia ma 1000 stóp głębokości, ile wody w ciągu minuty wydobywać może na powierzchnię maszyna parowa o sile 50 koni parowych? Maszyna wydaje 50 × 33000 jednostek pracy na minutę, a że ciężar podnoszony jest na wysokość 1000 stóp, liczba przeto funtów wody, wydobywanych przez minutę, wynosi:

$$\frac{50 \times 33000}{1000} = 1650.$$

179. Zasadę pracy zastosujemy teraz do bloka powyżej opisanego (ustęp 163). Aby podnieść ciężar 14 f.,

potrzeba, by sznur, do którego siła jest przyczepiona, pociągany był ku dołowi siłą 15 f., funt bowiem dodatkowy potrzebny jest do pokonania tarcia. Aby myśl naszą utrwalić, dajmy, że ciężar 14 f. dźwignięty został na 1 stopę w górę; by ciężar podnieść bezpośrednio, bez udziału bloka, potrzebaby było 14 stopofuntów, ale gdy jest pociągany za pomocą bloka, potrzeba 15 stopofuntów. Zachodzi tu zatem bezpośrednia strata $^1/_{15}$ części energii, gdy używamy bloka; ponieważ zaś

$$33000 \times {}^{14}/_{15} = 30800,$$

maszyna wykonywa przeto 30800 stopofuntów pracy użytecznej na minutę.

180. Tarcie w bloku lub w jakiejkolwiek innej maszynie powoduje zawsze ubytek energii. Aby wykonać daną pracę bezpośrednio, potrzeba pewnej liczby stopofuntów, gdy tymczasem dokonanie tejże samej pracy za pomocą maszyny wymaga większej ich liczby, a to ze względu na stratę spowodowaną tarciem. Może to na pierwszy rzut oka wydawać się nieco osobliwem, wiemy bowiem dobrze, że za pomocą drążków, bloków i t. d. zyskać można ogromną korzyść mechaniczną. Rzecz ta wyjaśni się dokładnie w następnym i w dalszych wykładach, w których zajmiemy się maszynami prostemi.

181. Obecny zaś wykład zakończymy kilku uwagami, tyczącemi się okoliczności najwyższej wagi. Rozważaliśmy przypadek, w którym 15 stopofuntów energii wykonało jedynie 14 stopofuntów pracy, a zatem 1 stopofunt okazuje się stratą. Widzieliśmy, że wydatkowano go na tarcie, ale co to jest tarcie? Oś zużywa się wciąż stopniowo, przez ścieranie na swych podporach, a gdy nie

jest dobrze natłuszczoną, rozgrzewa się przy obrocie. Ilość energii, która napozór niknie, wydatkuje się w części na naciskanie osi ku dołowi, w części zaś przeobraża się w ciepło; nie ulega przeto istotnej stracie, ale na nieszczęście przybiera postać, której nie żądamy i która jest nawet szkodliwą. Wiemy, w samej rzeczy, że energia nie może być zniszczoną, może wszakże ulegać przeobrażeniom; jeżeli ginie w jednej postaci, to dlatego tylko, by się ujawnić w innej. Tak zwana strata energii przez tarcie znaczy tylko, że pewna część pracy, dokonywa się inaczej, aniżeli pragnęliśmy. Wiedziano już dawno, że materya jest niezniszczalną; teraz jest również niewątpliwem, że toż samo twierdzić możemy o energii.

181*. Wraz ze zmianą jednostek ciężaru i długości zmienia się i jednostka pracy (energii). W układzie miar metrycznych jednostką pracy jest ilość pracy, potrzebna do podniesienia jednego kilograma na wysokość jednego metra, mająca tedy nazwę złożoną „kilogrammetra.” Ponieważ 1 *kg.*=2,2046 f. ang. a 1 *m.*=3,2809 stóp ang., przeto 1 kilogrammetr $= 2{,}2046 \times 3{,}2809 = 7{,}233$ stopofuntów ang. Siłą konia parowego w układzie miar metrycznych jest praca 75 kilogrammetrów, wykonana w ciągu sekundy, a zatem 1 koń parowy $= 75 \times 7{,}233 = 542{,}5$ stopofuntów ang. Jestto zatem jednostka nieco mniejsza aniżeli koń parowy angielski, który wynosi 550 stopofuntów na sekundę, czyli 33000 stopofuntów na minutę, jak wyżej podano.

WYKŁAD VII.

Blok złożony.

Wstęp. — Blok ruchomy pojedynczy. — Blok złożony z trzech krążków. — Blok różnicowy. — Blok epicykloidalny.

WSTĘP.

182. W wykładzie pierwszym okazałem, że wielki ciężar podniesiony być może przez ciężar mniejszy, i nadmieniłem, że przedmiot ten zajmie jeszcze naszą uwagę. Obecnie spełniam to przyrzeczenie. Rozbierzemy tu najkorzystniejsze metody zastosowania sił małych do pokonywania większych. Jestto rzecz ważnego znaczenia pod względem praktycznym. Człowiek średniej mocy bez nadmiernego wysiłku nie może dźwignąć więcej nad cetnar, ale ciężary jakie podnosić i przesuwać trzeba, ważą często dziesiątki i setki całe cetnarów. Nie zawsze jest też rzeczą dogodną użycie licznych rąk do tego celu, ani też nie w każdej chwili posługiwać się można motorem parowym lub innem potężnem źródłem siły. Przyrządy wszakże, nazywane maszynami, dają sposobność znaczne-

go wzmożenia sił, jakiemi rozporządzamy. Człowiek jeden, przy ich pomocy, wywierać może siłę tak znaczną, jak kilku ludzi bez ich pośrednictwa; gdy zaś używamy ich do powiększania siły wielu ludzi lub też motorów parowych, olbrzymie ciężary, wynoszące niekiedy setki tysięcy funtów, poruszane być mogą z łatwością.

183. W różnych gałęziach przemysłu napotykamy często przypadki, w których pokonywać trzeba wielkie opory, ale odpowiednio posiadamy też do ich przezwyciężania znaczną liczbę urządzeń, które zawdzięczamy bystrości ludzkiej. Belki mostu żelaznego dźwignięte zostały na swe filary; kotły i motory parowca, przebiegającego ocean, umieszczone zostały w należytem położeniu; lokomotywa kolei żelaznej wprowadzoną została na pokład okrętu, który ją przewozi; wielki odlew wydobyty został ze swej formy; ciężka kotwica wyciągniętą została z dna morskiego; płyta żelazna została skręconą, przeciętą lub przebitą,— we wszystkich tych przypadkach obmyśleć należało odpowiednie urządzenia, by zdobyć siłę potrzebną.

184. Niewiele wiemy, jakich sposobów używali starożytni, by dźwigać wielkie głazy do swych budynków, które nam podróżnicy po Wschodzie opisali. Możnaby wprawdzie przypuszczać, że znaczna liczba ludzi zdołała przenieść te głazy bez pomocy środków, jakie nam teraz do podobnych celów przysługują; prawdopodobnie jednak używane być musiały pewne maszyny, ponieważ przy mnóstwie ludzi trudno zapewnić należyte stosowanie połączonej ich siły. W Islandyi wschodniej, w znacznej odległości od okolic cywilizowanych, niezamieszkałej teraz nawet przez dzikich, napotkano na wzgórzach ogrom-

ne bałwany kamienne, które musiały być pracą ludzką wzniesione; napróżno wszakże snulibyśmy rojenia o plemieniu wygasłem, które dzieł tych dokonało, lub o sposobach, jakiemi się ono posługiwało.

185. Maszyny proste wyliczają się pospolicie, jak następuje: Blok, drążek czyli dźwignia, kołowrót, klin, równia pochyła, szruba. Różne te maszyny tak często używają się w połączeniach, że rozróżnienie ich nie zawsze może być utrzymanem. W każdym razie klasyfikacya powyższa wystarcza, by dać o rzeczy tej ogólne pojęcie.

186. W niektórych z najcenniejszych maszyn przypada sznurom i łańcuchom udział bardzo ważny. Bloki używają się pospolicie, gdy zachodzi potrzeba zmiany kierunku sznura lub łańcucha, które przenoszą siłę. W wykładzie obecnym rozbierzemy najważniejsze maszyny, utworzone z kombinacyi bloków.

Blok ruchomy pojedynczy.

187. Rozpoczynamy od przypadku najprostszego, a mianowicie od bloka ruchomego pojedyńczego (fig. 35, str. 130). Sznur jest silnie przytwierdzony na jednym swym końcu A; następnie przechodzi on u dołu pod blokiem ruchomym B, a w górze znowu nad blokiem nieruchomym. Do końca wolnego, który zwiesza z bloka nieruchomego, przyczepiona jest siła, ciężar zaś, który podnieść mamy, zawieszony jest na bloku ruchomym. Zbadamy najpierw zależność między siłą a ciężarem w spo-

sób prosty, a następnie opiszemy kilka doświadczeń dokładnych.

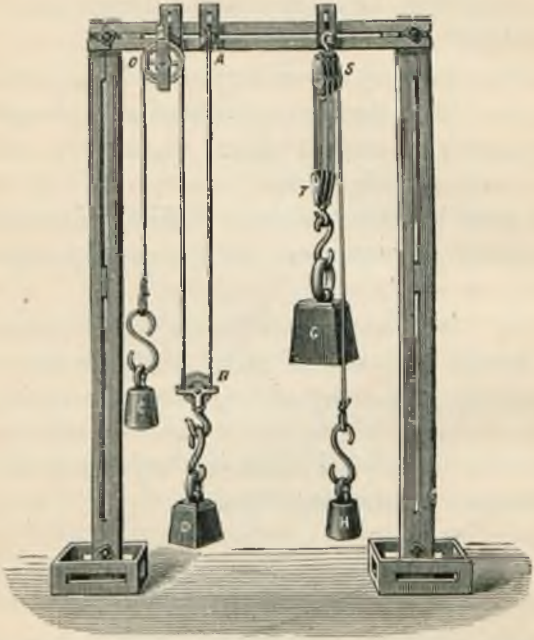

Fig. 35.

188. Gdy ciężar podnosimy, podnieść oczywiście musimy również i blok ruchomy, a na cel ten wyłożyć trzeba pewną część siły. Możemy wszakże, o ile to rachunków naszych dotyczy, ciężar bloka ruchomego wyrugować, przywiązawszy do swobodnego końca sznura ciężar dostateczny do podniesienia tego bloka ruchomego, gdy nie dźwiga on ładunku. Ciężar potrzebny do wykonania tego, oznaczony przez próby, jest nieco większy

nad 1,5 funta. Według tego zatem, gdy ciężar zostaje podniesionym, winniśmy siłę pozorną zmniejszyć o 1,5 f., by otrzymać siłę istotnie skuteczną.

189. Zawieśmy 14 f. na haku *B* i oznaczmy, jaka siła zdoła opór ten dźwignąć. Ciężar bloka ruchomego i 1,5 f. siły na haku *C* wypuszczamy z uwagi. Doświadczenie wskazuje nam wtedy, że siła 7 f. nie wystarcza do podniesienia oporu, ale gdy dodamy jeden funt nadto, siła opada ku dołowi, a opór podnosi się w górę. Jestto więc rezultat uderzający, — siła 8 f. przezwyciężyła 14 f. Mamy tu pierwsze zastosowanie maszyn do wzmagania sił, jakiemi rozporządzamy.

190. Rozbierzmy teraz przyczynę tego zysku mechanicznego. Jeżeli ładunek podniesiony został o jednę stopę, jest rzeczą widoczną, że siła obniżyć się musiała o dwie stopy; aby bowiem ładunek wzniósł się w górę, każda z dwu części sznura, obejmującego blok ruchomy, musiała się o jednę stopę skrócić, a to stać się mogło tylko, gdy siła przebiegła dwie stopy. A zatem, gdy ciężar 14 f. dźwigany jest przez maszynę, na każdą stopę, o którą zostaje podniesionym, siła zejść musi na dwie stopy. Prosty ten szczegół prowadzi do pojęcia najwyższej doniosłości, od którego zależy działalność bloka. Przy badaniu maszyn zadanie naczelne polega na oznaczaniu ilości stóp, przez jaką działać musi siła, by dźwignąć ciężar na jednę stopę, — liczbę tę nazywać będziemy zawsze *stosunkiem prędkości.*

191. Podniesienie 14 f. na jednę stopę wymaga 14 stopofuntów energii. A zatem, gdyby tu nie zachodziło tarcie, 7 funtów na końcu swobodnym sznura wystarczy-

łoby do podniesienia ciężaru, gdyż 7 f., przebiegając dwie stopy, dostarczają 14 stopofuntów. Zachodzi tu wszakże strata energii z powodu tarcia, siła więc 7 f. nie jest dostateczna, — potrzeba 8 funtów. Ośm funtów, przy obniżeniu się o dwie stopy, wytwarzają 16 stopofuntów; z tego 14 tylko zużywa się na ciężar czyli opór, pozostałe zaś dwa stopofunty są ilością energii, która została spożytą przez tarcie. Przekonywamy się tedy, że w bloku ruchomym ilość zużytej *energii* jest rzeczywiście większą od ilości energii, jakaby mogła podnieść ciężar bezpośrednio, ale *siła*, która została istotnie wywarta, jest mniejsza.

192. Dajmy, że na haku bloka ruchomego zawieszono 28 f., a próby wykażą nam, że do sprowadzenia ruchu wystarczy siła 16 f. (ale nie mniej); przekonywamy się tedy, jak tego mogliśmy oczekiwać, że gdy ciężar zostaje podwojonym, siła podwaja się również. Łatwo też dojść możemy, że strata energii na tarcie wynosi wtedy 4 stopofunty. Sprawdzamy tym sposobem, w przypadku bloka ruchomego, prawo przybliżone, że *tarcie proporcyonalne jest do ciężaru.*

193. Za pomocą bloka ruchomego człowiek podnieść może ciężar prawie dwa razy większy, aniżeliby mógł dźwignąć bezpośrednio. Szeregiem starannych doświadczeń przekonano się, że gdy człowiek używany jest jedynie do podnoszenia ciężarów za pomocą bloka, pracuje on najskuteczniej, gdy wymagany od niego na ciągnięcie nakład siły wynosi około 40 funtów (angielskich, co czyni 18 kilogramów). Człowiek może oczywiście wywierać siłę większą, ale w ciągu dnia roboczego jest on

w stanie wytworzyć więcej stopofuntów, gdy siła, z jaką ciągnie, wynosi 40 funtów, aniżeli gdy jest większą lub mniejszą. Jeżeli więc ciężar, jaki ma podnosić, czyni około 70 funtów, energia może być rzeczywiście zaoszczędzona przez użycie bloka ruchomego pojedynczego, chociaż przy pracy takiej w istocie rzeczy zużyje on więcej energii, aniżeliby potrzebował, gdyby ciężary podnosił bezpośrednio.

Z dopiero co opisanym blokiem ruchomym wykonano kilka doświadczeń nad podnoszeniem wielkich ciężarów; rezultaty zestawione są w tabeli IX:

TABELA IX. — BLOK RUCHOMY POJEDYNCZY.

Blok ruchomy z żelaza lanego o 3,25″ w średnicy, rowek szeroki na 0,6″; oś z żelaza kutego, 0,6″ w średnicy; blok nieruchomy 5″ w średnicy, rowek szeroki na 0,4″, oś z żelaza kutego, 0,6″ w średnicy, osie natłuszczone; giętki sznur pleciony 0,25″ w średnicy; stosunek szybkości 2, zysk mechaniczny 1,8; efekt użyteczny 90 na sto; wzór $P = 2{,}21 + 0{,}5453\,R$.

Numer doświadczenia	*R.* Ciężar w funtach	Zaobserwowana siła w funtach	*P.* Obliczona siła w funtach	Odstępstwa między siłami obliczonemi a zaobserwowanemi
1	28	17,5	17,5	0,0
2	57	33,5	33,3	— 0,2
3	85	48,5	48,6	+ 0,1
4	113	64	63,8	— 0,2
5	142	80	79,6	— 0,4
6	170	94,5	94,9	+ 0,4
7	198	110,5	110,2	— 0,3
8	226	125,5	125,5	0,0

Wymiary bloków oznaczone zostały ściśle, dla bloków bowiem rozmaitej konstrukcyi spółczynniki liczebne nie byłyby koniecznie jednakie. Uważne wszakże rozpatrzenie tej tablicy wykaże ogólny charakter zależności między siłą a ciężarem we wszelkich urządzeniach tego rodzaju.

Tabela składa się z pięciu kolumn. Pierwsza zawiera jedynie numery doświadczeń, dla dogodniejszego odwoływania się do nich. W kolumnie drugiej, pod napisem *R*, podane są ciężary, które podnoszone były w każdem doświadczeniu, a mianowicie ciężary zawieszone na haku, nie włączając w to ciężaru bloka dolnego. Ciężar tego bloka nie jest włączony do podanych ciężarów. W kolumnie trzeciej przytoczone są siły, które się okazały dostateczne do podniesienia odpowiednich ciężarów kolumny drugiej. Tak naprzykład, w doświadczeniu 7, okazało się, że siła 110,5 f. wystarczyła do podniesienia ciężaru 198 f. Kolumna trzecia została więc sporządzona przez stopniowe zwiększanie siły, dopóki się ruch nie rozpoczął.

195. Z rozejrzenia kolumn podających siłę i ciężar widzimy, że siła wynosi zawsze więcej niż połowę ciężaru. Nadmiar pochodzi raz od małej części siły (około 1,5 funta), wyłożonej na podniesienie bloka dolnego, a powtóre od tarcia. Tak naprzykład, w doświadczeniu 7, gdyby nie istniało tarcie i gdyby blok dolny nie posiadał ciężaru, siła 99 f. byłaby dostateczną; z powodu jednak obecności tych dwu przyczyn zakłócających potrzeba 110,5 f. Z ogółu tego 1,5 zależy od ciężaru blo-

ka, 10 f. jest siłą tarcia, pozostałe zaś 99 f. dźwigają ładunek.

196. Przy obliczaniu opartem na tej tabeli wprowadziliśmy pewien związek między siłą a ciężarem; jest on podany we wzorze, który wysłowiony być może, jak następuje:

Siła otrzymuje się, mnożąc ciężar przez 0,5453 i dodając 2,21 do iloczynu. Oznaczając siłę przez P a ciężar przez R, możemy związek ten wyrazić: $P = 2{,}21 + 0{,}5453\ R$. Tak naprzykład, w doświadczeniu 5, iloczyn 142 przez 0,5453 czyni 77,43, a jeżeli do tego dodamy 2,21, otrzymamy na P wartość 79,64, bardzo bliską 80 f., to jest zaobserwowanej wartości siły.

W kolumnie czwartej podane są wartości P, obliczone za pomocą powyższego wzoru, a w ostatniej wykazane są odstępstwa między wartościami obliczonemi i zaobserwowanemi, dla łatwiejszego ich porównania. Widzimy, że odstępstwo to w żadnym przypadku nie dochodzi do 0,5 f., wzór zatem oddaje doświadczenia bardzo dobrze. Sposób jego wyprowadzenia podany jest w Dodatku.

197. Ilość 2,21 obejmuje tę część siły, która zostaje wyłożoną na pokonanie wagi bloka ruchomego, jakoteż zużywa się na tarcie.

198. Za pomocą wzoru tego dogodnie obliczać możemy, jak wielkiej siły potrzeba do podniesienia danego ciężaru; jeżeli, naprzykład, 200 f. przywiązano do bloka ruchomego, to trzeba 111 f. przyczepić jako siłę. Ale dla podniesienia 200 f. na jednę stopę siła wywarta działać musi przez dwie stopy, a zatem liczba potrzebnych

stopofuntów jest 2 × 111 = 222. Ilość straconej energii wynosi 22 stopofunty. Z każdych więc wyłożonych 222 stopofuntów wydatkowano 200 użytecznie; znaczy to, że z wyłożonej energii użytkujemy około 90 odsetek, gdy pozostałe 10 odsetek tracą się na tarcie.

Blok złożony z trzech krążków.

199. Dalszem urządzeniem, jakiego użyjemy, jest para bloków złożonych *S*, *T* (fig. 35), z których każdy obejmuje trzy krążki, czyli bloki pojedyncze. Sznur przytwierdzony jest do górnego bloka *S*, następnie schodzi ku dołowi do bloka niższego *T* i przesuwa się pod jednym krążkiem, skąd znów wracą do bloka górnego i przechodzi ponad drugim krążkiem, a tak samo dalej, jak widzimy na figurze. Do końca sznura, schodzącego z ostatniego z górnych krążków, przyczepiona jest siła *H*, ciężar zaś *G* zawieszony jest na haku, przytwierdzonym do bloka dolnego. Gdy sznur ciągniemy, podnosi on stopniowo blok dolny; gdy zaś ciężar posuwa się w górę o jednę stopę, każda z sześciu części sznura, od bloka górnego do bloka dolnego, musi się skrócić o stopę, siła tedy przesunąć musi ogółem sześć stóp sznura. A zatem, na każdą stopę, o jaką ciężar został podniesiony, siła działać musiała przez sześć stóp; znaczy to, że *stosunek szybkości* czyni 6.

200. Gdyby nie było tarcia, siła byłaby tylko szóstą częścią ciężaru. Wypływa to wprost z zasady poprzednio wyłożonej. Dajmy, że ciężar wynosi 60 f., w takim razie podniesienie go o jednę stopę wymagać będzie

60 stopofuntów. Siła tedy również wykonać musi 60 stopofuntów, a że przesuwa się o sześć stóp, siła przeto 10 f. będzie dostateczną. Z powodu wszakże tarcia pewna ilość energii ulega stracie, musimy więc odwołać się do doświadczenia, by ocenić skuteczność maszyny. Blok ruchomy pojedynczy podwaja prawie siłę naszą; poznamy, że blok złożony z trzech krążków wzmaga ją czterokrotnie. W tym razie działać będziemy z większemi ciężarami, to nam bowiem dozwoli usunąć z uwagi ciężar dolnego bloka.

201. Przywiążmy najpierw do haka ładunkowego 112 f.; przekonywamy się, że 29 f. na haku drugim, służącym do przyczepiania siły, jest najmniejszym ciężarem, jaki sprowadzić może ruch, — jestto tylko o 1 f. więcej nad czwartą część podnoszonego ładunku. Jeżeli ładunek wynosi 224 f., przekonywamy się, że 56 f. właśnie go podnosi, — teraz siła jest dokładnie czwartą częścią ciężaru. Gdy doświadczenie to powtórzymy, umieszczając 448 f. na haku, zobaczymy, że podniesione zostaną za pomocą 109 f., co czyni tylko o 3 f. mniej od czwartej części tego ciężaru. Według tych zatem doświadczeń do bloka złożonego z trzech krążków tej konstrukcyi stosować można z zupełnem zaufaniem prawidło, że *siła jest czwartą częścią ciężaru.*

202. Mamy też możność oceny, ile z wysilku naszego na podnoszenie ciężarów należało wyłożyć jedynie na przezwyciężenie tarcia, a ile rzeczywiście zużytkować zdołano. Dajmy, naprzykład, że podnieść mamy ciężar 100 f. na jednę stopę w górę za pomocą powyższego bloka złożonego; użyć do tego trzeba siły 25 f., a pomiędzy

blokami przesunąć trzeba ku dołowi sześć stóp sznura, — siła zatem wykonywa 150 stopofuntów energii. Z tego korzystnie użyto tylko 100 stopofuntów, a zatem 50 s., trzecią część wszystkiego, wydatkowano na tarcie. Widzimy więc, że jakkolwiek siła mniejsza pokonała większą, zachodzi jednak przy użyciu tej maszyny strata istotna energii. Rzeczywistą korzyścią jest to oczywiście, że za pomocą bloka złożonego podnieść mogę ciężar większy, aniżelibym mógł dźwignąć bez jego pośrednictwa, ale nie mogę stworzyć energii. Przeobrażam ją jedynie i na zamianie tej tracę.

203. Inny szereg doświadczeń, wykonanych za pomocą tegoż samego bloka złożonego, podany jest w tabeli X.

TABELA X. — BLOK ZŁOŻONY Z TRZECH KRĄŻKÓW.

Krążki z żelaza lanego o średnicy 2,5″; sznur pleciony o średnicy 0,25″; stosunek szybkości 6; zysk mechaniczny 4; efekt użyteczny 67 na sto; wzór $P = 2{,}36 + 0{,}238\ R$.

Numer doświadczenia	*R.* Ciężar w funtach	Siła zaobserwowania w funtach	*P.* Siła obliczona w funtach	Odstępstwa między siłami obliczonemi a zaobserwowanemi
1	57	15,5	15,9	+ 0,4
2	114	29,5	29,5	0,0
3	171	43,5	43,1	— 0,4
4	228	56,0	56,6	+ 0,6
5	281	70,0	69,2	— 0,8
6	338	83,0	82,8	— 0,2
7	395	97,0	96,4	— 0,6
8	452	109,0	109,9	+ 0·9

204. Tabela ta zawiera pięć kolumn; ciężary czyli opory podnoszone, wskazane w kolumnie drugiej, sięgają wielkości przechodzącej nieco 450 f. Zaobserwowane wartości siły przytoczone są w kolumnie trzeciej; każda z tych sił jest w ogólności czwartą mniej więcej częścią odpowiedniej wartości ciężaru. Mamy jednak ściślejszą regułę obliczania siły, a mianowicie, jak następuje:

205. Aby obliczyć siłę, potrzebną do podniesienia danego ciężaru, pomnóż liczbę funtów tego ciężaru przez 0,238 i do iloczynu dodaj 2,36 f. Regułę tę wyrazić możemy wzorem $P = 2{,}36 + 0{,}238\ R$.

206. Obliczmy za pomocą wzoru tego siłę, potrzebną do podniesienia 228 f.; iloczyn 228 przez 0,238 jest 54,26, a po dodaniu 2,36 otrzymujemy na wielkość siły szukanej 56,6 f. Siła istotnie zaobserwowana wynosi 56 f., reguła jest więc dokładną z przybliżeniem około połowy funta. W kolumnie czwartej znajdujemy wartości P obliczone za pomocą tej reguły. W kolumnie piątej zestawione są odstępstwa między obliczonemi a zaobserwowanemi wartościami sił, z czego widzimy, że różnice w żadnym razie nie dochodzą 1 funta. Przypominamy zresztą, że wzór ten stosowanym być może jedynie do ciężarów, przypadających między pierwszym a ostatnim ciężarem, do doświadczeń naszych użytemi. Obliczyć możemy siłę dla jakiegokolwiek ciężaru między 57 f. a 452 f., gdy wszakże idzie o ciężary znacznie większe od 452, albo mniejsze od 57 f., lepiej jest prawdopodobnie użyć poprostu czwartej części tego ciężaru, aniżeli odwoływać się do siły, obliczonej za pomocą powyższego wzoru.

207. Wykonamy teraz doświadczenie z blokiem o trzech krążkach, które nam dozwoli oznaczyć dokładnie wysokość tarcia, bez odwoływania się do stosunku szybkości. Przedewszystkiem zrównoważymy ciężar bloka dolnego przez zawieszenie należytego ciężaru na haku drugim. Przekonywamy się, że do celu tego wystarcza 1,6 f. Przyczepiamy 56 f. jako ciężar i widzimy, że 13,1 f. jest siłą dostateczną do wywołania ruchu. Wielkość ta składa się w części z siły, jakaby była potrzebna do podniesienia ciężaru, gdyby nie było tarcia, reszta zaś zużywa się na tarcie. Usuwam teraz stopniowo ciężar, przedstawiający siłę. Gdy ujmuję jeden funt, widzicie, że siła i ciężar równoważą się nawzajem; ale gdy obniżam siłę aż do 5,5 f. (nie włączając przeciwwagi równoważącej blok niższy), ciężar jest właśnie w stanie przemódz siłę i zbiega ku dołowi. Przekonaliśmy się tedy, że siła 13,1 f., lub od niej większa, pociąga 56 f., że jakkolwiek siła między 13,1 f. a 5,5 f. równoważy 56 f., i wreszcie, że jakakolwiek siła mniejsza od 5,5 f. jest przez 56 f. pociągana.

Gdy siła jest pociągana w górę, wraz z nią przezwyciężonem być musi przez ciężar i tarcie. Oznaczmy przez x rzeczywistą siłę, któraby była potrzebna do zrównoważenia 56 f. na maszynie zupełnie od tarcia wolnej, przez y zaś siłę tarcia, a doświadczenia dopiero co wykonane dają nam możność oznaczenia wielkości x i y. Gdy ciężar jest w górę podnoszony, użyć trzeba siły wyrównywającej sumie $x + y$, a zatem $x + y = 13,1$. Z drugiej zaś strony, gdy ciężar opada, siła x jest właśnie dostateczną do pokonania zarazem i tarcia i pozostałych 5,5 f., a zatem $x = y + 5,5$.

Rozwiązawszy dwa te równania, otrzymujemy, że $x = 9,3$ a $y = 3,8$. Z tego widzimy, że siła w maszynie od tarcia wolnej byłaby 9,3; zupełnie toż samo wszakże moglibyśmy wyprowadzić ze stosunku szybkości, gdyż $56 : 6 = 9,3$. Rezultat taki świadczy o zupełnej zgodności teoryi z doświadczeniem.

Blok rożnicowy.

208. Przez powiększanie liczby krążków w bloku złożonym można siłę powiększać, długość wszakże sznura (albo łańcucha) koniecznego do połączenia kilku krążków sprowadza w praktyce niedogodność. Dla tej i dla innych jeszcze przyczyn blok różnicowy, którym się obecnie zajmiemy, dogodniejszy jest do różnych celów, aniżeli zwykłe bloki złożone, gdy idzie o znaczne wzmożenie siły.

209. Zasada bloka różnicowego jest bardzo dawno znaną, ale w nowszych dopiero czasach zastosowaną została do budowy użytecznej tej maszyny. Posiada ona urządzenie, które dozwala ciężarowi podniesienie się o małą tylko wysokość w ciągu czasu, przez który siła znaczną drogę przebiega. Gdy cel ten jest dopięty, wnieść już możemy z zasady energii, że osiągamy tu znaczny zysk mechaniczny.

210. Rozpatrzymy teraz, w jaki sposób przeprowadzonem to zostało w bloku różnicowym, w sposób po-

mysłowy urządzonym przez Westona. Zasadę tego bloka objaśniają fig. 36 i fig. 37.

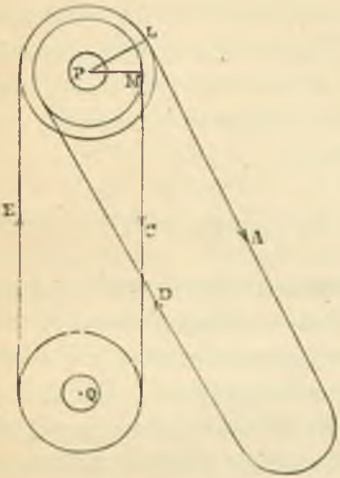

Fig. 36.

Składa się on z trzech części, — z bloka górnego, z bloka ruchomego i z łańcucha bez końca. Opiszemy je tu treściwie. Blok górny P zaopatrzony jest w hak, za pomocą którego może być zawieszany. Obejmuje on właściwie dwa krążki, z których jeden jest od drugiego mniejszy, nawzajem złączone, tak że w samej rzeczy tworzą część wspólną maszyny. Rowki ich pokryte są karbami, a to dla ochrony łańcucha od ślizgania się. Blok dolny Q składa się z jednego tylko krążka, który również opatrzony jest w rowek i dźwiga hak, na którym zawiesza się ciężar. Udział, jaki przypada łańcuchowi bez końca, zrozumieć możemy ze szkicu szematycznego, przedstawionego na fig. 36. Poczynając od trzymającej go ręki przy A, wznosi się łańcuch ten do górnego bloka przy L, przechodzi nad jego krążkiem większym, następnie schodzi ku E, przesuwa się pod blokiem dolnym, a ztąd znów w górę do C, przebiega nad krążkiem mniejszym bloka górnego M, skąd, idąc znów na dół przez D, wraca do ręki *A*. Gdy ręka pociąga łańcuch ku dołowi, oba krążki bloka górnego przechodzą razem w obrót, w kierunku wskazanym przez strzałki na łańcuchu. Krążek zatem większy posuwa łańcuch w górę, mniejszy zaś opuszcza go ku dołowi.

211. W bloku, którego używaliśmy do opisanych wyżej doświadczeń, obwód rowka w krążku większym okazał się równym 11,84", w mniejszym zaś 10,36". Gdy blok górny wykonał jeden obrót, większy jego krążek przesunął w górę 11,84" łańcucha, ponieważ łańcuch ten nie może się ślizgać z powodu karbów; w tymże samym wszakże czasie krążek mniejszy obniżył 10,36" łańcucha, — gdy zatem blok górny raz się obróci, łańcuch pomiędzy obu blokami skrócić się musi o różnicę między 11,84" a 10,36", czyli o 1,48". Siła przeto działała przez 11,84", a dźwignęła opór na 0,74", przebiegła tedy drogę 16 razy większą, aniżeli ciężar; rzeczywiście też sprawdzić możemy przez pomiar bezpośredni, że siła przesunąć się musi o 16 stóp, by ciężar podniesiony został o jedną stopę. Wyrażamy to, mówiąc, że *stosunek szybkości* jest 16.

Fig. 37.

212. Jeżeli siła działa przy *D* na łańcuch schodzący z krążka mniejszego, przebieg jest odwrotny; łańcuch jest opuszczany przez krążek większy prędzej, aniżeli podnoszony przez mniejszy, blok przeto ruchomy schodzi na dół. Ciężar zatem podnosimy lub opuszczamy, stosownie do tego, czy ciągniemy łańcuch *A*, czy też łańcuch *D*.

213. Rozbierzemy teraz zysk mechaniczny bloka różnicowego. Blok, którego tu używamy, przeznaczony jest do tego, by był wprawiany w ruch przez człowieka, ma tedy dźwigać ciężary nieprzechodzące sześciuset mniej więcej funtów.

Poznaliśmy wyżej, że przy użyciu tego bloka siła działać musi przez stóp szesnaście, aby ciężar dźwignięty został na jednę stopę. Gdyby zatem nie było tarcia, wystarczyłaby siła, równa szesnastej części ciężaru. Kilka wszakże prób wykaże nam, że istotny zysk maszyny nie jest tak wielki i że w samej rzeczy połowa przeszło pracy wykonanej zużywa się jedynie na pokonywanie tarcia, co nas dalej doprowadzi do rezultatu znacznej doniosłości praktycznej.

214. Gdy na haku, przeznaczonym do dźwigania ciężarów, zawieszam 200 f., widzimy, że do podniesienia ciężaru tego wystarcza 38 f., umieszczonych na haku, przytwierdzonym do łańcucha, na który działa siła; znaczy to, że siła wynosi nieco nad szóstą część ciężaru. Gdy zawieszam ciężar 400 f., widzimy, że potrzeba siły 64 f., co jest tylko o trzy niespełna funty mniej nad szóstą część 400 funtów. Możemy tedy bezpiecznie przyjąć regułę praktyczną, że za pomocą tego bloka różnicowego człowiek jest w stanie podnieść ciężar sześć razy większy, aniżeliby mógł dźwignąć bez jego pośrednictwa.

215. Szereg doświadczeń, wykonanych starannie z różnemi ciężarami, wydał rezultaty zestawione w tabeli XI.

TABELA XI. — BLOK RÓŻNICOWY.

Obwód rowka większego 11,84″, mniejszego 10,36″; stosunek szybkości 16; zysk mechaniczny 6,07; efekt użyteczny 38 odsetek; wzór $P = 3,87 + 0,1508\ R$.

Numer doświadczenia	R. Ciężar w funtach	Siła zaobserwowana w funtach	P. Siła obliczona w funtach	Różnica wartości obliczonych i zaobserwowanych
1	56	10	12,3	+ 2,3
2	112	20	20,8	+ 0,8
3	168	31	29,2	— 1,8
4	224	38	37,7	— 0,3
5	280	48	46,1	— 1,9
6	336	54	54,6	+ 0,6
7	352	64	63,1	— 0,9
8	448	72	71,5	— 0,5
9	504	80	80,0	0,0
10	560	86	88,4	+ 2,4

Kolumna pierwsza zawiera numery doświadczeń, druga ciężary podnoszone, trzecia wartości zaobserwowane sił odpowiednich, z których wyprowadzono następną regułę obliczania siły.

216. Aby otrzymać siłę, pomnóż ciężar przez 0,1508 i dodaj 3,87 f. do iloczynu; regułę tę wyrazić można wzorem $P = 3,87 + 0,1508\ R$ (ob. Dodatek).

217. Według wzoru tego obliczone wartości sił podane są w kolumnie czwartej, różnice zaś między wartościami obliczonemi i zaobserwowanemi w kolumnie

ostatniej. Różnice te w żadnym przypadku nie dochodzą do 2,5 f.; w założeniu tedy, że ciężary podnoszone nie przewyższają 600 f., wzór powyższy przedstawia doświadczenia ze ścisłością dostateczną.

218. Dajmy, naprzykład, że podnieść mamy 280 f.; iloczyn 280 przez 0,1508 jest 42,2 a dodawszy do tego 3,87, znajdujemy, że siła żądana wynosi 46,09. Zysk mechaniczny otrzymamy, dzieląc 280 przez 46,09, co daje 6,07.

219. Aby podnieść 280 f. o jednę stopę, potrzeba 280 stopofuntów energii, ale by toż samo wykonać za pomocą tego bloka różnicowego, należy siłę 46,09 f. wywierać przez drogę 16 stóp. Iloczyn 46,09 przez 16 jest 737,4. Nasz blok różnicowy wymaga zatem 737,4 stopofuntów energii, aby zdołał dostarczyć 280 stopofuntów użytecznych; ale 280 czyni tylko 38 odsetek 737,4, przy podnoszeniu tedy ciężaru 280 f. zużytkować możemy jedynie 38 odsetek energii, zastosowanej do bloka różnicowego. W ogólności stwierdzić możemy, że nie więcej nad 40 odsetek daje się tu użyć korzystnie, resztę zaś wydajemy na przezwyciężenie tarcia.

220. Ważną jest i użyteczną własnością bloka różnicowego, że ciężar, za pomocą niego podniesiony, pozostaje zawieszonym po usunięciu ręki, chociażby łańcuch nie został w jakikolwiek sposób zabezpieczonym. Bloki, które rozważaliśmy poprzednio, dogodnej tej własności nie posiadają. Ciężar podniesiony, dajmy, za pomocą bloka złożonego z trzech krążków, opada natychmiast na dół, jeżeli swobodnego końca sznura należycie nie zabezpieczymy. Różnica zachodząca pod tym względem między obu maszynami nie jest następstwem jakiegoś

szczególnego mechanizmu, ale wypływa poprostu z nadmiernego tarcia w bloku różnicowym.

221. Przyczyna, dla której ciężar nie opada w bloku różnicowym, daje się w następny sposób wyjaśnić. Przypuśćmy, że ciężar 400 f. podniesiony został o jednę stopę za pomocą bloka różnicowego; wymaga to 400 jednostek pracy, trzeba przeto na łańcuch, do działania siły przeznaczony, wywrzeć pracę około 1000 jednostek (zużytkować bowiem daje się tylko 40 odsetek). Tarcie przeto pochłania 600 jednostek pracy, gdy ciężar podniesionym zostaje o jednę stopę. Przez usunięcie siły ciśnienie, jakiego doznaje blok górny, ulega zmniejszeniu. Rzeczywiście, ponieważ siła jest $^1/_6$-ą mniej więcej ciężaru, ciśnienie na oś po usunięciu siły wynosi tylko $^6/_7$-ych wartości poprzedniej. Tarcie jest w przybliżeniu proporcyonalne do ciśnienia, po usunięciu zatem siły tarcie na oś górną wynosi tylko $^6/_7$-ych poprzedniej swej wartości, gdy tymczasem tarcie na bloku dolnym pozostaje bez zmiany.

Możemy przeto twierdzić, że całkowite tarcie wynosi co najmniej $^6/_7$-ych tego, czem było, zanim siła usuniętą została. Czy zaś tarcie to dozwoli ciężarowi opadać? Przezwyciężenie tarcia przy podnoszeniu go wymagało 600 stopofuntów pracy, co najmniej tedy $^6/_7 \times 600 = 514$ stopofuntów trzebaby było do przezwyciężenia tarcia przy jego opadaniu. Ale zkądże energia ta wziąćby się mogła? Ciężar przy spadku dostarczyć może tylko 400 jednostek, pod wpływem przeto swej wagi opadać nie może. Aby obniżać ciężar, musimy ruchowi jego dopomagać przez pociąganie łańcucha *D* (fig. 36 i 37), który schodzi z mniejszego rowka bloka górnego.

222. Zasada, którą wykazaliśmy teraz, rozciąga się również do innych maszyn i może być uogólnioną. *Ilekroć więcej aniżeli połowa wyłożonej energii zużywa się na tarcie, ciężar zatrzyma się bez spadku po oswobodzeniu maszyny.*

Blok epicykloidalny.

223. Wykład obecny zakończymy kilku doświadczeniami z użyteczną maszyną, zbudowaną przez Eade'a i nazwaną przez niego blokiem epicykloidalnym. Przedstawioną jest ona na fig. 33, podobnież jak i na 49. W maszynie tej są dwa łańcuchy. Jeden jestto cienki łańcuch bez końca, na który działa siła; drugi zaś, gruby łańcuch posiada hak na każdym swym końcu, z których na jednym zawiesza się ciężar. Każdy z łańcuchów tych przechodzi przez krążek bloka, krążki zaś złączone są dobrze obmyślonym mechanizmem, którego wszakże opisywać tu nie potrzebujemy. Urządzenie to sprawia, że gdy siła wywołuje obrót krążka, przez który przechodzi cienki łańcuch, krążek drugi, który dźwiga łańcuch grubszy, obraca się również, ale bardzo powolnie.

224. Przeprowadzone próby wykazały, że siła działać musi przez dwanaście i pół stopy, by ciężar podniesiony został o jednę stopę; stosunek szybkości tej maszyny jest przeto 12,5.

225. Gdyby maszyna wolną była od tarcia, zysk jej mechaniczny byłby oczywiście równy stosunkowi szybkości; ponieważ wszakże tarcie istnieje, zysk mecha-

niczny jest mniejszy aniżeli stosunek szybkości, a dla oznaczenia dokładnej jego wartości przeprowadzić trzeba doświadczenia. Zawieszam tedy na haku, przeznaczonym do dźwigania ładunków, ciężar 280 f., w ogniwach zaś łańcucha, na który działa siła, osadzam kilka drobnych haczyków, by do nich przyczepiać ciężary, — do wywołania ruchu wystarcza 56 f., zysk więc mechaniczny wynosi 5. Gdyby tu tarcia nie było, siła 56 f. byłaby zdatną do pokonania ładunku $12{,}5 \times 56 = 700$ f. By przeto wykonać 280 jednostek pracy, zastosować należy 700 jednostek energii. Innemi słowy, zużytkować można jedynie 40 odsetek wyłożonej energii.

226. Rozległy szereg doświadczeń z blokiem epicykloidalnym zestawiony jest w tabeli XII.

TABELA XII. — BLOK EPICYKLOIDALNY.

Ciężary podnoszone dochodzą do 560 f.; stosunek szybkości 12,5; zysk mechaniczny 5; efekt użyteczny 40 odsetek; wzór obliczony $P = 5{,}8 + 0{,}185\ R$.

Numer doświadczenia	R. Ciężar w funtach	Siła zaobserwowana w funtach	P. Siła obliczona w funtach	Różnice między wartościami obliczonemi a zaobserwowanemi
1	56	15	16,2	+ 1,2
2	112	27	26,5	— 0,5
3	168	40	36,9	— 3,1
4	224	47	47,2	+ 0,2
5	280	56	57,6	+ 1,6
6	336	66	68,0	+ 2,0
7	392	78	78,3	+ 0,3
8	448	88	88,6	+ 0,6
9	504	100	99,0	— 1
10	560	110	109,4	— 0,6

Kolumna czwarta zawiera wartości siły, obliczone za pomocą wzoru. Z kolumny ostatniej poznajemy, że wzór przedstawia doświadczenia z małym tylko błędem.

227. Skoro 60 odsetek energii zużywa się na tarcie, maszyna więc ta, podobnie jak blok różnicowy, powstrzymuje ciężar, gdy łańcuchy są swobodne. Blok różnicowy daje zysk mechaniczny 6, gdy tymczasem blok epicykloidalny posiada tylko zysk mechaniczny 5, a pod tym względem maszyna poprzednia ma pierwszeństwo; z drugiej wszakże strony blok epicykloidalny zawiera jeden blok tylko, łańcuch zaś dźwigający posiada dwa haki, co ze względów praktycznych silnie na korzyść jego przemawia.

WYKŁAD VIII.

Drążek czyli dźwignia.

Drążek pierwszego rodzaju. — Drążek drugiego rodzaju. — Nożyce. — Drążek trzeciego rodzaju.

Drążek pierwszego rodzaju.

228. W wielu razach, gdy potrzeba maszyny do przezwyciężania znacznego oporu, bloki nie dałyby się zgoła zastosować. Różne te wymagania wywołały odpowiednią liczbę wynalazków. Między niemi drążek czyli dźwignia w różnej postaci zajmuje ważne miejsce.

229. Drążek pierwszego rodzaju może być zrozumianym przy pomocy fig. 38 str. 152. Składa się on z pręta prostolinijnego, do którego w jednym końcu przyczepia się siła *C*. Na inny jego punkt działa ciężar, który ma być podniesiony; w punkcie *A* zaś, który nazywa się punktem podpory, pręt jest podtrzymywany. W przypadku, przedstawionym na figurze, pręt jest żelazny, o przecięciu 1" $\times$ 1" i długości 6', a waży 19 fun-

tów. Siłę wytwarza tu ciężar 56 f., punkt zaś podpory stanowi ostrze stalowe, niezbyt wyostrzone, a mocno osadzone na podstawie zbudowanej z belek. Ciężar zastąpiony

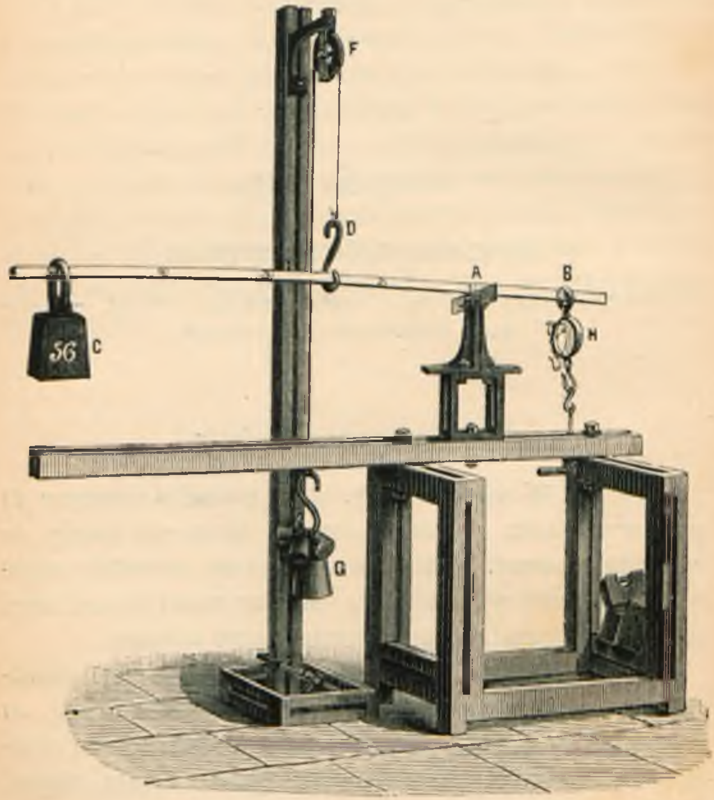

Fig. 38.

jest w tym razie przez wagę sprężynową *H*, której hak przyczepiony jest do podstawy. Przez działanie drążka sprężyna ulega napięciu, a skazówka wagi podaje siłę wzbudzoną na tym końcu. Tak jest urządzony drążek, który ma do doświadczeń naszych posłużyć.

230. Przy rozpatrywaniu związku zachodzącego między siłą a ciężarem, napotykamy pewne zawikłanie z powodu wagi samego drążka (19 f.), możemy wszakże trudność tę usunąć sposobem użytym już przy innej sposobności (ust. 60), — możemy mianowicie zrównoważyć ciężar pręta żelaznego. Wykonamy to łatwo, jeżeli założymy hak *D* na środek pręta, przywiązany do niego sznur przeprowadzimy przez blok *F* i do swobodnego końca tego sznura przywiążemy ciężar *G* 19 funtów. Tym sposobem ciężar pręta jest zrównoważony i możemy go z uwagi naszej wypuścić.

231. Moglibyśmy również postąpić w sposób analogiczny do metody użytej w ust. 51, która wszakże nie byłaby tak dogodną. Ciężar pręta wywołuje pewne ciśnienie na wagę sprężynową; można przeto odczytać najpierw ciśnienie wywołane przez sam tylko pręt, a po zawieszeniu ciężaru *C* odczytać znowu wskazania wagi sprężynowej. Zaobserwowane tym razem ciśnienie zależy zarazem od ciężaru *C* i od ciężaru pręta; jeżeli więc odejmiemy znane już nam działanie pręta, reszta da nam działanie ciężaru *C*. Dogodniej jest wszakże pręt zrównoważyć, wtedy bowiem ciśnienia wskazane przez wagę sprężynową zależą całkowicie od działania siły *C*.

232. Drążek ma 6' długości; punkt *B* oddalony jest na 6" od końca, a *BC* ma 5' długości. Odległość *BC* podzielona jest na 5 równych części, z których każda tedy obejmuje 1'; *A* jest jedną z tych podziałek, o 1' od-

łegłą od *B*, gdy ciężar *C* od *B* oddalony jest o 5' na figurze; ciężar *C* wszakże może być umieszczany w którymkolwiek innem położeniu, a to przez proste przesuwanie pierścienia jego po pręcie.

233. Doświadczenia prowadzimy w sposób następny. Ciężar umieszczamy na pręcie w położeniu *C*, — waga *H* ulega natychmiast naprężeniu; sprężyna nieco się rozciąga, a pręt doznaje pochylenia. Nadmienić należy, że hak wagi sprężynowej przechodzi przez otworek szruby takiej, jaka była użytą w doświadczeniu fig. 11, tak, że kilka obrotów mutry tej szruby sprowadzić może znów drążek do położenia poziomego.

234. Gdy siła 56 f. znajduje się w odległości 4', a opór w odległości 1' od punktu podpory, widzimy, że naprężenie wskazane przez wagę wynosi 224 f., przechodzi zatem cztery razy wielkość siły. Jeżeli ciężar przesuwamy tak, że przypada w odległości 3' od punktu podpory, waga wskazuje naprężenie 168 f.; a jakiemkolwiek będzie oddalenie siły od punktu podpory, zobaczymy, że wywołane przez nią naprężenie otrzymuje się, mnożąc wielkość siły, wyrażoną w funtach, przez odległość wyrażoną w stopach i ułamkowych częściach stopy. Prawo to wysłowione być może ogólniej twierdzeniem, że *siła tak się ma do oporu, jak odległość oporu od punktu podpory do odległości siły od tegoż punktu.*

235. Prawo to stwierdzić możemy, zmieniając rozmaicie warunki. Ostrze stalowe, które tworzy punkt podpory drążka, przesuwam tak, że przypada w odległości 2' od *B*, i utwierdzam je w tem położeniu, ciężar zaś *C* umieszczam w odległości 3' od punktu podpory. Wi-

dzimy teraz, że naprężenie wagi jest 84 f.; ale 84 tak się ma do 56, jak 3 do 2, a zatem prawo powyższe jest i w tym przykładzie sprawdzone.

236. Związek między siłą a oporem wyrazić możemy w innej jeszcze postaci, formułując go mianowicie w ten sposób: *Iloczyn siły przez jej odległość od punktu podpory równa się iloczynowi oporu przez odległość jego od tegoż punktu.* Tak w przypadku, który rozważaliśmy właśnie, iloczyn 56 i 3 jest 168, co wyrównywa iloczynowi 84 i 2. Odległości od punktu podpory nazywają się zwykle ramionami drążka, a reguła powyższa wyraża się prościej twierdzeniem, że *iloczyn siły przez jej ramię równa się iloczynowi oporu przez jego ramię;* opór przeto obliczyć można, dzieląc iloczyn siły i jej ramienia przez ramię oporu. Prosta ta zasada daje dogodną drogę obliczania oporu, gdy znamy siłę, jako też odległość siły i oporu od punktu podpory.

237. Gdy ramię siły jest dłuższe od ramienia oporu, opór jest większy od siły; ale gdy ramię siły jest krótsze od ramienia oporu, siła jest od oporu większa.

Uważać możemy naprężenie wagi za siłę, która podtrzymuje ciężar, podobnież, jak uważamy ciężar za siłę, która powoduje naprężenie wagi. Widzimy więc z tego, że by drążek rodzaju pierwszego korzystny był jako maszyna, potrzeba, by ramię siły było dłuższe od ramienia oporu.

238. Drążek jest maszyną nadzwyczajnie prostą,— posiada on tylko jednę część ruchomą. Tarcie wywiera w nim drobny tylko wpływ, tak, że prawa tu podane mogą być rzeczywiście w praktyce stosowane, bez wprowa-

dzania odstępstw co do tarcia. Pod tym względem zachodzi więc wybitna różnica między drążkiem, a blokami poprzednio opisanemi.

239. Drążek pierwszego rodzaju przedstawia nam wyborną maszynę do wzmagania siły. Przy jego pośrednictwie siła 10 funtów przezwyciężyć może opór 100 funtów, jeżeli siła przypada od punktu podpory dziesięć razy dalej, aniżeli opór od tegoż punktu. Zasada ta znajduje zastosowanie w zwykłym drągu do podważania ciężarów. W tym celu koniec pręta umieszczamy pod ciężkim głazem, który dźwignąć mamy; podporę osadzamy blisko tego końca, a wtedy niewielka stosunkowo siła, wywarta na drugi koniec drąga, wystarcza do podniesienia głazu.

240. Zastosowania drążka są niezliczone. Używa się on nietylko do wzmagania siły, ale też do zmieniania i przeobrażania jej w rozmaity sposób. Ma też zastosowanie w różnych wagach, których zasady bez trudu zrozumiane być mogą, są bowiem następstwem praw tu wyłożonych. Rozlicznemi temi zastosowaniami nie mamy zamiaru obecnie się zajmować; znaczną ich większość, gdy się nam nastręczają, zrozumieć możemy na podstawie podanej tu zasady.

Drążek drugiego rodzaju.

241. W drążku drugiego rodzaju znajduje się siła na jednym końcu, punkt podpory na drugim, a opór przypada między niemi; drążek ten różni się przeto od drążka pierwszego rodzaju, w którym punkt podpory przypada

między obu siłami. Zależność siły i ciężaru w drążku drugiego rodzaju zbadaną być może za pomocą urządzenia przedstawionego na fig. 39.

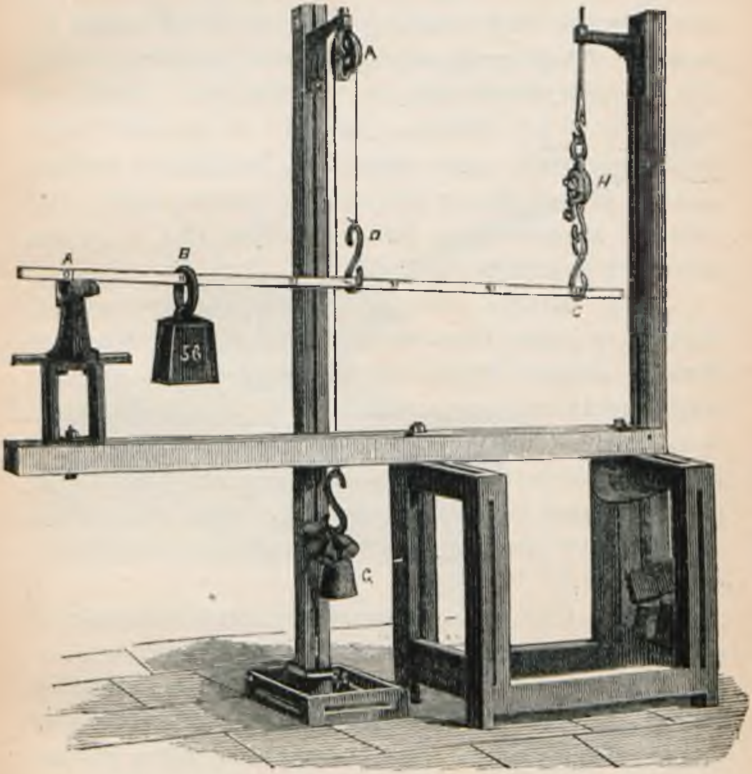

Fig. 39.

242. Pręt *A C* jest tąż samą sztabą żelazną, o wymiarach 72"×1"×1", która użytą była do doświadcze-

nia poprzedniego. Podporą *A* jest ostrze stalowe, na którem pręt spoczywa; siłę przedstawia tu waga sprężynowa *H*, na której haku opiera się koniec *C* pręta, gdy waga podtrzymywana jest przez szrubę, tak, że przez obrót jej mutry pręt doprowadzony być może do położenia poziomego. Część pręta między punktem podpory *A* a siłą *C* podzielona jest na pięć części o długości 1', każdy zaś z punktów *A* i *C* oddalony jest o 6'' od końców pręta. Jako opór służy nam ciężar 56 f., zawieszony pierścieniem na pręcie, tak, że pręt ten go podtrzymuje. Pręt wreszcie zrównoważony jest przez ciężar 19 f. *G*, w sposób wyżej wyjaśniony (ust. 231).

243. Metoda doświadczeń jest następująca: — Dajmy, że ciężar *B* umieszczony jest w odległości 1' od punktu podpory; w tym razie ciśnienie wskazane przez wagę sprężynową czyni około 11 f. Jeżeli obliczymy wartość siły według reguły poprzednio podanej, otrzymamy tenże sam rezultat. Iloczyn oporu przez odległość jego od punktu podpory wynosi 56, odległość zaś siły od punktu podpory jest 5; wartość więc siły byłaby $56 : 5 = 11{,}2$.

244. Gdy ciężar umieszczony jest w odległości 2' od punktu podpory, ciśnienie wynosi około 22,5 f., i również łatwo sprawdzić możemy, że takiż sam wypadek dałoby nam zastosowanie reguły. Podobnyż rezultat otrzymalibyśmy, gdyby ciężar umieszczony był w którymkolwiek punkcie pręta; uważać przeto możemy, że reguła ta stwierdzoną jest dla drążka drugiego rodzaju, również dobrze, jak dla drążka pierwszego rodzaju, — to jest, że iloczyn siły przez odległość jej od punktu pod-

pory równa się iloczynowi oporu przez odległość jego od tegoż punktu. W obecnym przypadku opór wynosi statecznie 56 f., podtrzymująca zaś go siła jest zawsze mniejsza od 56 funtów.

245. Drążek drugiego rodzaju stosowany jest często do celów praktycznych; jednem z najbardziej nauczających zastosowań takich są nożyce, przedstawione na fig. 40.

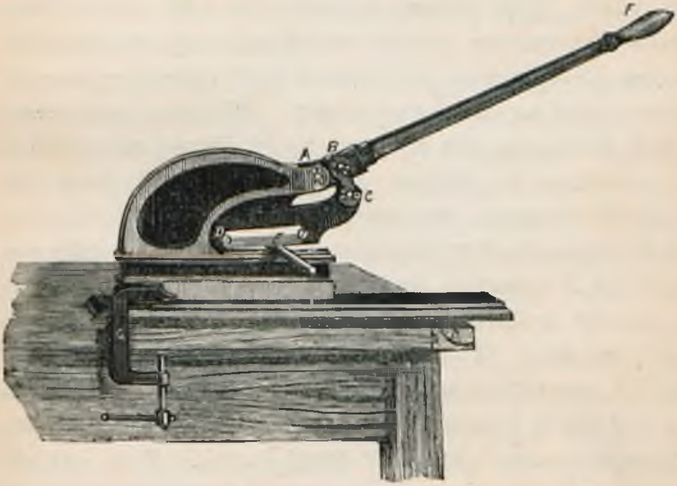

Fig. 40.

Nożyce te składają się z dwu drążków drugiego rodzaju, a połączone ich działanie daje możność człowiekowi wywierania siły znacznie powiększonej, dostatecznej, dajmy, do przecięcia z łatwością pręta żelaznego, mającego 0,25" szerokości i grubości. Sposób działania jest prosty. Pierwszy z tych drążków posiada rękojeść na jednym swym końcu *F*, odległym na 22" od końca drugiego *A*, gdzie umieszczony jest punkt podpory. W punkcie *B* tego drążka, odległym na 1,8" od punktu podpory *A*, przyczepioną jest krótka zawiasa *B C*, której koniec *C* połączony jest z drugim drążkiem *C D*; drugi ten drążek ma 8" długości i stanowi jedno ostrze nożyc, których ostrze drugie przytwierdzone jest do podstawy, na której przyrząd jest osadzony.

246. Pręt żelazny o przecięciu 0,25 cala w kwadracie umieszczam między szczękami nożyc w położeniu *E*, tak, że odległość *D E* wynosi 3,5", i probuję przeciąć żelazo przez naciskanie rękojeści. Obliczmy, jak dalece drążki wzmagają siłę wywartą na *F*. Dajmy naprzykład, że naciskam ku dołowi rękojeść siłą 10 f., jaka jest wielkość ciśnienia wywartego na pręt żelazny? Działanie każdego drążka obliczać należy oddzielnie. Siłę wywartą na *B* oznaczyć możemy za pomocą wyżej wyłożonej zasady momentów; iloczyn mianowicie siły przez jej ramię jest $10 \times 22 = 220$, co po podzieleniu przez liczbę cali 1,8, zawartych w linii *A B*, daje iloraz 122, a iloraz ten jest liczbą funtów ciśnienia, które za pośrednictwem zawiasy wywarte zostaje na drugi drążek. Tym samym sposobem postępujemy, by oznaczyć wielkość ciśnienia na żelazo w *B*. Iloczyn 122 i 8 jest 976, a po podzieleniu go przez 3,5 otrzymujemy iloraz 279. Ciśnienie zatem 10 f., wywarte na *F*, sprowadza ciśnienie 279 f. na *E*. W liczbie okrągłej, możemy powiedzieć, że ciśnienie wzmaga się 28-krotnie za pomocą tej kombinacyi drążków drugiego rodzaju.

247. Ciśnienie 10 f. nie wystarcza do przekrajania nożycami pręta żelaznego, chociaż wzmożone jest do 279

funtów. Zawieszam przeto ciężary na *F* i ładunek ten powiększam stopniowo, dopóki pręt nie zostanie przeciętym. Znajduję przy pierwszej próbie, że wystarcza 112 f., a próba druga w tymże celu przeprowadzona daje 114 f.; 113 f. tedy, to jest średnia tych obu rezultatów, uważaną być może za siłę dostateczną. Jestto ładunek na rękojeści *F*; istotne zaś ciśnienie na pręt wynosi 113 × 27,9 = 3153 f.; tak znaczne tedy ciśnienie potrzebne było do przecięcia sztaby żelaznej.

248. Na podstawie doświadczenia tego obliczyć możemy wielkość siły, potrzebnej do przekrajania pręta, mającego jeden cal kwadratowy w przecięciu. Możemy przyjąć, że siła potrzebna jest proporcyonalna do przecięcia, siła ta przeto jest w takim stosunku do 3153 f., w jakim cal kwadratowy jest do kwadratu z ćwierci cala; a że ostatni ten stosunek wynosi 16, siła przeto jest 16 × 3153 f., co daje około 50000 funtów.

249. Nadmienić tu jeszcze można, że takaż sama prawie siła wystarczyłaby do rozerwania tego pręta na dwie części, przez bezpośrednie wyciąganie. Do sprawy przecinania żelaza wrócimy jeszcze w wykładzie o bezwładności (Wykład XVI).

Drążek trzeciego rodzaju.

250. Drążek trzeciego rodzaju zrozumiany być może łatwo z fig. 39, której używaliśmy poprzednio. W drążku trzeciego rodzaju punkt podpory jest na jednym końcu, opór na drugim, a siła przypada pomiędzy niemi. W przypadku tym przeto siłę przedstawia nam ciężar

56 f., opór zaś wskazany jest przez wagę sprężynową. Siła przewyższa tu zawsze ciężar, drążka tego zatem używa się, gdy idzie o zyskanie na prędkości, zamiast na sile. Tak, naprzykład, gdy siła 56 f. jest o 2' oddaloną od punktu podpory, opór wskazany przez wagę sprężynową wynosi około 23 funtów.

251. Stopień u koła szlifierskiego jest często drążkiem trzeciego rodzaju. Punkt podpory jest na jednym końcu, opór na drugim, a stopa szlifierza poruszać się potrzebuje jedynie w przestrzeni niewielkiej.

252. Zasady, które rozebraliśmy w wykładzie III, a które się tyczą sił równoległych, posłużyć nam mogą do wyjaśnienia wyłożonych obecnie praw co do drążków różnych rodzajów i dadzą nam możność ściślejszego wyrażenia tych praw.

253. Porównanie fig. 20 i 39 uczy, że oba te urządzenia różnią się między sobą jedną tylko okolicznością, tem mianowicie, że na fig. 20 mamy wagę sprężynową *C* w tem samem miejscu, w którem ostrze stalowe *A* przypada na fig. 39. Możemy przeto na fig. 20 uważać jednę wagę sprężynową za siłę, drugą za punkt podpory, a ciężar za opór. Nie ma też istotnej różnicy między przyrządami fig. 38 i fig. 20. Na fig. 38 pręt pociągany jest ku dołowi przez siły na każdym końcu, z których jednę przedstawia ciężar, a drugą waga sprężynowa, podtrzymywany zaś jest ciśnieniem wywieranem ku górze przez ostrze stalowe. Na fig. 20 pręt jest pociągany ku górze przez siłę na każdym końcu, ku dołowi zaś przez ciężar. Oba przypadki są w samej rzeczy jednakie. W każdym bowiem pręt poddany jest działaniu dwu sił równoległych,

przyczepionych do jego końców, utrzymywany zaś jest w równowadze trzecią siłą.

254. Możemy przeto zastosować do drążka zasady sil równoległych, poprzednio wyłożone. Widzieliśmy, że dwie siły równoległe działające na pręt mogą być złożone w jednę wypadkową, przyczepioną do pewnego punktu pręta. Określiliśmy moment siły i wykazaliśmy, że momenty sił równoległych względem punktu przyczepienia ich wypadkowej są równe.

255. W drążku pierwszego rodzaju są dwie siły równoległe, jedna na każdym końcu; składają się one w jednę wypadkową, aby zaś pręt pozostawać mógł w spoczynku, konieczna, by wypadkowa przyczepioną była ściśle nad ostrzem stalowem, czyli nad punktem podpory. W drążkach drugiego i trzeciego rodzaju siła i opór są to dwie siły równoległe, działające w strony przeciwne; wypadkowa ich przeto nie przypada między niemi, ale przyczepia się po stronie siły większej, w punkcie, mianowicie, w którym ostrze stalowe pręt podtrzymuje. We wszystkich tych przypadkach moment jednej z sił względem punktu podpory musi być równy momentowi drugiej. Z równości zaś momentów wypływa, że iloczyn siły przez odległość jej od punktu podpory równa się iloczynowi oporu przez odległość jego od tegoż punktu, a zasada ta daje bezpośrednio dowód reguł wyżej podanych.

256. Prawa rządzące drążkiem można też wyprowadzić z zasady pracy. Opór, jeżeli bliżej aniżeli siła przypada względem punktu podpory, przebiega też drogę mniejszą aniżeli siła; tak, naprzykład, w drążku pierw-

szego rodzaju, jeżeli opór umieszczony jest 12 razy bliżej aniżeli siła od punktu podpory, wtedy, okazać można, że za każdy cal przebieżony przez opór, siła przesunąć się musi o 12 cali. Ilość jednostek pracy, wyłożona na jednym końcu maszyny, równa się liczbie tychże jednostek, dostrzeżonej na końcu drugim, w każdym razie z uwzględnieniem straty zależnej od tarcia, która wszakże w drążku jest tak drobna, że może być pominiętą. Jeżeli tedy siła 1 f. przesuwa jeden koniec drążka przez drogę 12 cali czyli przez jedną stopę, wymaga to nakładu jednostki pracy, a stąd również jedna jednostka pracy wykonaną będzie przez opór; ponieważ wszakże opór ten przebiega jedynie $^1/_{12}$ stopy, przezwyciężonym przeto być może opór 12 f., — a tenże sam rezultat dałaby reguła (ust. 236).

257. Ostatecznie tedy, — wykazaliśmy najpierw doświadczeniem bezpośredniem zależność między siłą a oporem w drążku; widzieliśmy następnie, że prawa tak otrzymane zgodne są z zasadą składu sił równoległych, a wreszcie przekonaliśmy się, że tenże sam rezultat wyprowadzić można z płodnej i ważnej zasady pracy.

WYKŁAD IX.

Równia pochyła i szruba.

Równia pochyła bez tarcia. — Równia pochyła z tarciem. — Szruba. — Zastosowanie szruby do prasy. — Szruba do spajania.

---

258. Maszyny proste, które obecnie rozważać mamy, używane są często do innych celów, prócz do dźwigania wielkich ciężarów. Tak naprzykład, — części budowli mają być silnie jedne do drugich przytwierdzone, wywrzeć trzeba potężne ciśnienie, bryła drzewa lub innego materyału ma być na dwie części rozłupaną. Do celów tych równia pochyła w różnych swych postaciach, jako też szruba, najwyższej są użyteczności. Szruba używa się też niekiedy i do dźwigania ciężarów, wtedy zwłaszcza, gdy ciężary te są nader wielkie, odległość zaś, na jaką mają być dźwignięte, jest stosunkowo drobna.

259. Rozpoczniemy od zbadania równi pochyłej. Posłuży nam do tego przyrząd wskazany na fig. 41 str. 166.

A B jest to płyta szklana długości 4', osadzona na podstawie i obracająca się na zawiasie *A*; *B D* jest łuk koła, którego środek przypada w *A*, a służący do podtrzymywania płyty szklanej; *D C* jest pręt pionowy, na którym osadzony jest blok *C*. Blok ten przesuwany być może w górę i na dół, odpowiednio do położenia płyty *A B*; wyrobiony jest z mosiądzu i obraca się bardzo swobodnie. Mały wózek *R*, zastosowany do toczenia się po płaszczyźnie szklanej, naładowany jest ciężarem 1 funta, a ciężar ten pozostaje niezmiennym w ciągu całego doświadczenia; koła osadzone są bardzo swobodnie, tak, że wózek toczy się ze słabem bardzo tarciem.

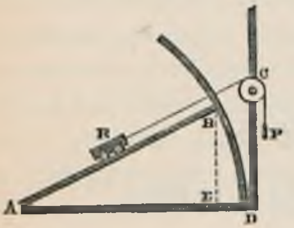

Fig. 41.

260. Tarcie wszakże, jakkolwiek słabe, nie jest zupełnie bez znaczenia, należy więc ocenić jego wielkość, a następnie postarać się o zniesienie wpływu jego na ruch wózka. Sznurek jedwabny, przywiązany do wózka, jest bardzo cienki, tak, że ciężar jego pominąć można. Posiadamy nadto pewien zasób ciężarków, wyrobionych z drutu mosiężnego, a ważących po 0,1 i 0,01 funta, które mogą łatwo być zaczepiane na pętlicy sznurka w *P*. Nadajemy najpierw płaszczyźnie *A B* położenie poziome i przesuwamy blok *C* ku dołowi, tak, by sznurek był do płaszczyzny tej równoległy; przekonywamy się, że dla przesunięcia wózka po płycie przyczepić trzeba do sznura siłę, — siłą to jest oczywiście tarcie, za pomocą odpowie-

dniego tedy ciężaru, zawieszonego na pętlicy *P*, tarcie to może być zrównoważonem. Nie możemy atoli przyjmować, by tarcie było jednakiem przy poziomem i przy pochyłem położeniu płyty. Należy nam przeto kwestyę tę rozebrać za pomocą metody podobnej, jak w ust. 207.

261. Nadajmy płycie położenie *AB*, w którem wzniesienie *BE* punktu *B* nad *AD* wynosi 20'', i uregulujmy należycie położenie bloka *C*, — a przekonamy się, że gdy *P* czyni 0,45 f., wózek *R* posuwa się w górę; z drugiej strony, gdy *P* wynosi tylko 0,40 f., wózek schodzi i podnosi w górę ciężar *P*, gdy zaś *P* ma wartość pośrednią między temi dwoma ciężarami, wózek pozostaje w równowadze. Oznaczmy przez *R* siłę ciężkości działającą ku dołowi w kierunku płaszczyzny *AB*, a wnosimy, że *R* musi być równem 0,425 f., tarcie zaś 0,025 f. Jeżeli bowiem *P* podnosi w górę wózek, pokonać musi tarcie zarówno jak i *R*, siła przeto wynosić musi 0,025+0,425=0,45. Z drugiej strony, gdy wózek podnosi ciężar *R*, musi również przezwyciężyć tarcie 0,025, a zatem *P* wynosić może tylko 0,425 — 0,025 = 0,40; poznajemy przeto, że siła *R* jest pośrednia między największą a najmniejszą wartością ciężaru *P*, utrzymującego wózek w równowadze. Gdy płaszczyznę podniesiemy tak, by wysokość *BE* wynosiła 33'', największa wartość *P* czyni 0,71, najmniejsza zaś 0,66; *R* zatem w tym razie jest 0,685, a tarcie 0,025, takież samo, jak poprzednio. Wreszcie, gdy wysokość *BE* obniżamy do 2'' tylko, tarcie okazuje się równem 0,020, co nie o wiele jest mniejszem od oznaczeń poprzednich. Doświadczenia te przekonywają, że bardzo słabe to tarcie uważać można praktycznie jako stałe przy

powyższych pochyleniach. (Gdyby tarcie było znaczne, należałoby się odwołać do metod innych, — ob. ust. 265). Ponieważ w doświadczeniach naszych wózek R zawsze ma być *podnoszonym*, pozostawimy przy P niezmienne obciążenie 0,025 f., jako dostateczne do zrównoważenia tarcia, które tedy z uwagi usunąć możemy. Dodawać zaledwie potrzeba, że przy następnem notowaniu ciężarów uczepionych przy P przeciwwagi tej włączać nie będziemy.

262. Posiadamy tedy już możność badania zależności siły i oporu na równi pochyłej, wolnej od tarcia. Nadając płaszczyźnie różne pochylenia, oznaczać będziemy, jaka siła potrzebna jest do podnoszenia w górę stałego oporu, przedstawionego przez ciężar 1 funta. Przedewszystkiem zaś przy rozważaniach naszych skorzystamy z zasady energii. Dajmy, że $B\,E$ wynosi 2'; gdy wózek przesunięty został od dolnego końca płaszczyzny do jej szczytu, został dźwignięty pionowo na wysokość 2', na co tedy wyłożyć należało dwie jednostki energii. Płaszczyzna wszakże ma 4' długości, siła przeto potrzebna do podniesienia wózka wynosi tylko 0,5 f, siła bowiem 0,5 f., działając przez 4', wytwarza dwie jednostki pracy. W ogólności, jeżeli l oznacza długość równi a h jej wysokość, R opór, a P siłę, liczba jednostek energii potrzebnych do podniesienia oporu jest Rh, liczba zaś jednostek wyłożonych na przesunięcie go po równi jest Pl, a zatem $Rh = Pl$, skąd $P : R = h : l$, to jest, siła tak się ma do oporu, jak wysokość równi do jej długości. W przypadku obecnym $R = 1$ f., $l = 48''$, a zatem $P = {}^1/_{48}\,h = 0{,}0208\,h$, gdzie h oznacza wysokość równi w calach, a P siłę w funtach.

263. Siły obliczone według wzoru powyższego zestawimy teraz z wartościami otrzymanemi z doświadczeń, a rezultaty te podaje tabela XIII.

TABELA XIII. — RÓWNIA POCHYŁA.

Płyta szklana długości 48″, wózek wagi 1 f., tarcie zrównoważone; wzór $P = 0{,}0208 \times h''$.

Numer doświadczenia	Wysokość równi	Siła zaobserwania w funtach	P. Siła obliczona w funtach	Różnica między siłą obliczoną a zaobserwowaną
1	2″	0,04	0,04	0,00
2	4″	0,08	0,08	0,00
3	6″	0,13	0,12	— 0,01
4	8″	0,16	0,17	+ 0,01
5	10″	0,21	0,21	0,00
6	15″	0,31	0,31	0,00
7	20″	0,42	0,42	0,00
8	33″	0,71	0,69	—0,02

Tak naprzykład, w doświadczeniu 6, przy którem wysokość *BE* jest 15", dostrzegamy, że siła potrzebna do podniesienia wózka wynosi 0,31 f. Wózek umieszczamy w pośrodku równi, siłę zaś dobieramy tak, by wystarczała do podniesienia go z pewnością aż do szczytu; potrzebna do tego siła, obliczona według wzoru, jest również 0,31 f., teorya więc jest stwierdzona.

264. Kolumna piąta tablicy podaje różnicę między siłą obliczoną a zaobserwowaną. Bardzo drobne różnice, nieprzechodzące ani w jednym przypadku pięćdziesiątej części funta, rzucone być mogą na karb nieuniknionych błędów doświadczenia.

Równia pochyła z tarciem.

265. Tarcie wózka po płycie szklanej jest zawsze bardzo małe, a widzieliśmy nadto, że ulega ono słabym zaledwie zmianom przy pochyleniach równi, jakie użyte były. Gdy wszakże tarcie jest znaczne, zmian jego przy różnych pochyleniach zaniedbywać nie możemy i należy nam odwołać się do metod ściślejszych. Do badań tych użyjemy płyty z drzewa sosnowego i sań, opisanych poprzednio w ust. 117. Nie zamierzamy w tym razie zmniejszać tarcia za pomocą kół, będzie ono przeto znacznej wielkości.

266. Z innego jeszcze względu doświadczenia tabeli XIII pozostają również w sprzeczności z doświadczeniami, które obecnie opisujemy. Poprzednio opór był stateczny, zmieniało się zaś pochylenie równi; teraz natomiast pochylenie pozostanie statecznem, a probować będziemy kolejno różnych oporów. Z badań tych przekonamy się również, jeżeli należyty udział odliczymy na tarcie, że prawo teoretyczne, tyczące się zależności siły i oporu, potwierdza się w zupełności.

267. Zastosowany do doświadczeń tych przyrząd przedstawiony jest na fig. 33; równia utrzymywana jest stale w jednakiem pochyleniu, blok zaś *C*, wskazany na fig. 32, tak jest przytwierdzony do przyrządu, by sznur idący od bloka do sań był równoległy do równi pochyłej. Pochylenie równi w położeniu przyjętem wynosi $17{,}2^0$, skąd długość jej, podstawa i wysokość są w stosunku liczb 1 : 0,955 : 0,296. Ciężary, sięgające od 7 f. do 56 f., umieszczone są na saniach, siłę zaś przyjmujemy

taką, która, gdy sanie potrącone są szrubą, pociąga je jednostajnie w górę po równi. Tak oznaczona siła składa się z dwu części, z których jedna potrzebna jest do pokonania ciężkości, działającej ku dołowi w kierunku równi, druga zaś potrzebna jest do pokonania tarcia.

268. Siły te przedstawione są na fig. 42. $R\,G$, siła ciężkości, rozłożona jest na $R\,L$ i $R\,M$; $R\,L$ jest oczywiście składową, działającą ku dołowi w kierunku równi, a $R\,M$ ciśnieniem na równię. Trójkąt $G\,L\,R$ podobny jest do trójkąta ABC; jeżeli więc R oznacza opór, siła $R\,L$ działająca ku dołowi równi wynosić musi 0,296 R, ciśnienie zaś na równię 0,955 R.

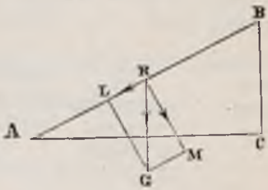

Fig. 42.

269. Przeprowadzimy najpierw obliczenie na zasadzie zwykłego prawa, że tarcie proporcyonalne jest do ciśnienia. Ciśnienie na równię $A\,B$, do którego tarcie jest proporcyonalne, nie jest wagą ciężaru czyli oporu, ale jest składową $R\,M$ tego ciężaru, prostopadłą do równi $A\,B$. Jeżeli ciężary nie przechodzą poza 56 f., najdokładniejszą wartością spółczynnika tarcia jest 0,288; wielkość zatem tarcia po równi jest

$$0{,}288 \times 0{,}955\,R = 0{,}275\,R.$$

Siła ta musi być pokonaną wraz z siłą 0,296 R, to jest składową ciężkości, działającą ku dołowi równi, — zupełnem tedy wyrażeniem siły jest

$$0{,}275\,R + 0{,}296\,R = 0{,}571\,R.$$

270. Wartości sił zaobserwowanych, w zestawieniu z siłami obliczonemi według wyrażenia 0,571 R, podane są w tabeli XIV.

TABELA XIV. — RÓWNIA POCHYŁA.

Wygładzona płyta sosnowa 72″ × 11″; kąt pochylenia 17,2°; sanie sosnowe, włókna skrzyżowane; sanie wstrząsane; wzór $P = 0,571\ R$,

Numer doświadczenia	R, Ciężar całkowity sań w funtach	Siła w funtach, która właśnie posuwa sanie w górę	P. Obliczona wartość siły	Różnica między siłą obliczoną a zaobserwowaną
1	7	4,6	4,0	— 0,6
2	14	8,3	8,0	— 0,3
3	21	12,3	12,0	— 0,3
4	28	16,5	16,0	— 0,5
5	35	20,0	20,0	0,0
6	42	24,2	24,0	— 0,2
7	49	28,0	28,0	0,0
8	56	31,8	32,0	+ 0,2

271. Tak, naprzykład, w doświadczeniu 6 opór 42 f. dźwignięty został siłą 24,2 f., gdy wartość obliczona daje 24,0 f.; różnica, 0,2 f., podana jest w kolumnie ostatniej.

272. Przekonywamy się, że wartości obliczone przystępują w sposób dostatecznie znośny do wartości zaobserwowanych, znaczne wszakże różnice w nr. 1 i w nr. 4 prowadzą nas do poszukiwań, czyby przez zastosowanie dokładniejszego prawa tarcia (ust. 141) nie można było otrzymać rezultatu lepszego.

W tablicy VI widzieliśmy, że tarcie przy ciężarach nieprzechodzących 56 f. wyraża się wzorem

$F = 0{,}9 + 0{,}266 \times$ ciśnienie; ponieważ zaś w przypadku obecnym ciśnienie $= 0{,}955\ R$, tarcie przeto wynosi

$$0{,}9 + 0{,}254\ R.$$

Do wielkości tej dodać należy $0{,}296\ R$, to jest składową ciężkości, która ma być pokonaną, całkowita zatem siła potrzebna jest

$$0{,}9 + 0{,}55\ R.$$

Siły obliczone według tego wyrażenia zestawione są z siłami zaobserwowanemi w tabeli XV.

TABELA XV. — RÓWNIA POCHYŁA.

Wygładzona płyta sosnowa 72″ × 11″: kąt pochylenia 17,2°; sanie sosnowe, włókna skrzyżowane; sanie wstrząsane; wzór $P = 0{,}9 + 0{,}55\ R$.

Numer doświadczenia	*R*. Ciężar całkowity sań w funtach	Siła w funtach, która właśnie posuwa sanie w górę	*P*. Obliczona wartość siły	Różnica między siłą obliczoną a zaobserwowaną
1	7	4,6	4,7	+ 0,1
2	14	8,3	8,6	+ 0,3
3	21	12,3	12,5	+ 0,2
4	28	16,5	16,3	— 0,2
5	35	20,0	20,1	+ 0,1
6	42	24,2	24,0	— 0,2
7	49	28,0	27,8	— 0,2
8	56	31,8	31,7	— 0,1

W doświadczeniu 5, naprzykład, opór 35 f. podniesionym zostaje siłą 20,0 f., gdy siła obliczona jest $0{,}9 + 0{,}55 \times 35 = 20{,}1$ f.

273. Obliczone wartości siły, jak widzimy z tej tabeli, zgadzają się wybornie z wartościami zaobserwo-

wanemi, największa bowiem różnica wynosi tylko 0,3 f. Nie można tedy powątpiewać, że zasady według których wzór został obliczony, są słuszne. Tabela ta uważaną być może przeto za potwierdzenie zarówno praw tarcia, jako też reguły, podającej zależność między siłą a oporem w równi pochyłej.

274. Równię pochyłą nazywa się słusznie maszyną. Jeżeli bowiem, dajmy, ciężar wynosi 30 f., to za pomocą wzoru obliczamy, że dla podniesienia go wystarczy 17,4 f., pomimo więc straty na tarcie siła mniejsza przezwycięża tu większą, co jest istotną cechą maszyny. Zysk mechaniczny jest 30 : 17,4 = 1,72.

275. Stosunkiem szybkości w równi pochyłej jest stosunek drogi, przez jaką się siła przesuwa, do wysokości, na jaką się ciężar podnosi, to jest 1 : 0,296 = 3,38. Aby dźwignąć 30 f. na jednę stopę, należy przeto siłę 17,4 f. wywierać przez 3,38 stopy. Liczba wyłożonych jednostek pracy wynosi tedy 17,4 × 3,38 = 58,8. Z tego zużytkowuje się 30 jednostek, co czyni 51 odsetek; reszta 28,8 jednostek, czyli 49 odsetek, pochłonięta jest przez tarcie.

276. Przytoczyliśmy wyżej w ust. 222, że maszyna, w której mniej niż połowę energii traci się na tarcie, dozwoli oporowi po oswobodzeniu go opadać ku dołowi, — ma to miejsce w obecnym przypadku; ciężar przeto staczać się będzie ku dołowi równi, dopóki nie zostanie umyślnie zatrzymany. Dziać się tak zresztą winno według ust. 147, widzieliśmy tam bowiem, że przy pochyleniu 13,4°, a tembardziej przy pochyleniu większem, sanie zbiegają na dół, gdy są potrącone

Szruba.

277. Równia pochyła jako maszyna używa się często w formie klina, albo też w bardziej jeszcze przeobrażonej postaci szruby. Klin jest to równia pochyła, która się wtłacza pod opór; wprawia się zwykle w ruch za pomocą młota, skąd skuteczność klina powiększa się efektem dynamicznym uderzenia.

278. Szruba jest jedną z najużyteczniejszych maszyn, jakie posiadamy. Postać jej nakreślić możemy, skręcając dokoła walca klinowato ścięty pas papieru, a następnie wycinając rowek w walcu wzdłuż linii spiralnej, wskazanej brzegiem papieru. Rowek taki jest szrubą. Aby szruba mogła być używaną, obracać się musi w *mutrze*, utworzonej z walca, którego średnica wewnętrzna równa się średnicy walca, na którym szruba jest wycięta. Mutra zawiera wyniosłość spiralną, która wchodzi w odpowiednie skręty szruby; gdy mutra obraca się wokoło, posuwa się wstecz lub naprzód, a to stosownie do kierunku obrotu. Wielkie szruby gatunku lepszego, z jakiemi najpierw przeprowadzimy doświadczenia, są zawsze utoczone na kole tokarskiem i są też wyrobione z doskonałą ścisłością. Szruby małe wyrabiają się prościej za pomocą stempli lub innych urządzeń.

279. Charakterystyczną cechą szruby jest pochylenie skrętu względem osi. Najdogodniej określa się to liczbą pełnych obiegów, jakie skręt opisuje na określonej długości szruby, zwykle na calu. Tak naprzykład mówimy, że szruba ma dziesięć skrętów na calu, jeżeli wymaga 10 obrotów mutry dla przesunięcia jej o jeden cal.

Postać samego skrętu czyli raczej gwintu, jest różna, odpowiednio do celu, do jakiego szruba jest przeznaczona; przecięcie jego może być kwadratowe lub trójkątne, lub też, jak to pospolicie ma miejsce w szrubach małych, postaci zaokrąglonej.

280. W szrubie zachodzi tarcie tak znaczne, że do oznaczenia praw tyczących się zależności siły i oporu niezbędne są doświadczenia.

281. Rozpoczniemy od rozbioru szruby za pomocą przyrządu przedstawionego na fig. 43.

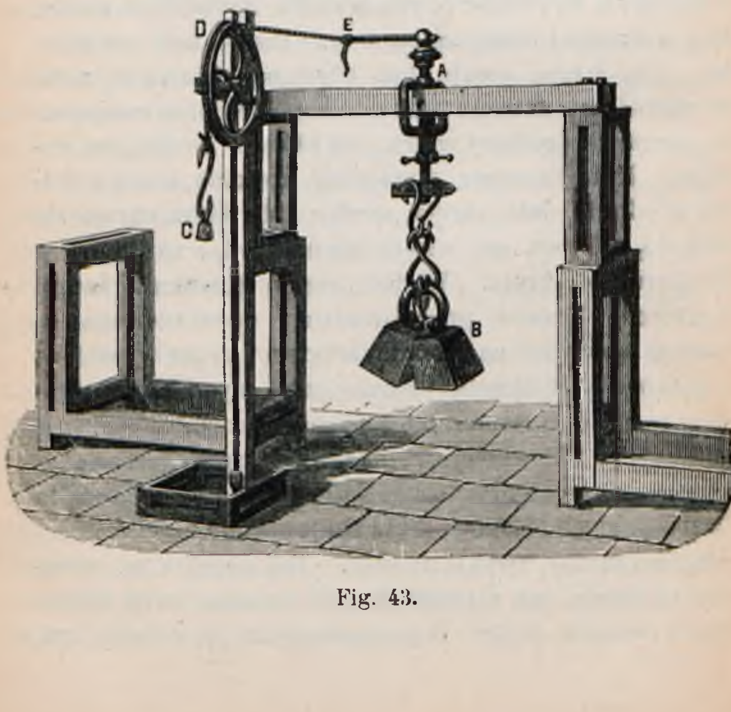

Fig. 43.

Mutra wsparta jest na mocnej podporze; do końca szruby przyczepione są haki, służące do zawieszania oporu, który w przyrządzie tym nie powinien przechodzić 224 f.; na szczycie szruby jest rękojeść *E*, służąca do jej obracania, do końca zaś rękojeści tej przywiązany jest sznur, który po przejściu przez blok *D* dźwiga hak przeznaczony do przyczepiania siły *C*.

282. Zastosujemy najpierw do szruby zasadę pracy i obliczymy zależność między siłą a oporem, jakąbyśmy otrzymali, gdyby tarcie nie istniało. Średnica koła opisanego końcem rękojeści wynosi 20,5", obwód jego jest przeto 64,4". Szruba zawiera trzy skręty w calu, aby tedy opór podnieść o 1", siła przesuwa się o $3 \times 64,4" = 193"$ blisko; stosunek szybkości jest zatem 193, a gdyby szruba działać mogła bez tarcia, 193 wyrażałoby też zysk mechaniczny. Przy prowadzeniu doświadczeń rękojeść *E* umieszcza się pod kątem prostym względem sznura prowadzącego do bloka, hak zaś, na którym przyczepiamy siłę *C*, obciąża się dopóki, za słabem wstrząśnięciem, rękojeść nie zacznie się jednostajnie posuwać; dozwalamy wszakże sile poruszać rękojeść przez kilka tylko cali, gdy bowiem sznur przestaje być prostopadłym do rękojeści, siła działa coraz mniej skutecznie; opór zatem podnosi się w każdem doświadczeniu o drobny tylko ułamek cala, ale zupełnie dostatecznie dla naszego celu.

TABELA XVI. — SZRUBA.

Szruba z żelaza kutego, gwint kwadratowy, średnica 1,25″, o 3 skrętach na calu, długość rękojeści 10,25″; mutra z żelaza lanego, stykające się powierzchnie natłuszczone; stosunek szybkości 193, efekt użyteczny 36 odsetek, zysk mechaniczny 70, wzór $P = 0{,}0143\ R$.

Numer doświadczenia	R. Opór w funtach	Siła zaobserwowana w funtach	P. Siła obliczona w funtach	Różnica między siłą obliczoną a zaobserwowaną
1	28	0,4	0,4	0,0
2	56	0,8	0,8	0,0
3	84	1,2	1,2	0,0
4	112	1,6	1,6	0,0
5	140	2,0	2,0	0,0
6	168	2,4	2,4	0,0
7	196	2,7	2,8	+ 0,1
8	224	3,3	3,2	— 0,1

283. Rezultaty doświadczeń zestawione są w tabeli XVI. Gdyby ruch nie był wspomagany wstrząśnięciem, siły byłyby większe. Tak w doświadczeniu 6, siła 2,4 f. wystarcza przy udziale wstrząśnięcia, bez wstrząśnięcia zaś okazałaby się siła potrzebna 3,2 f. Przy wszystkich doświadczeniach używano pomocy wstrząśnięcia, otrzymane zaś rezultaty poprawione zostały co do tarcia bloka, przez który sznur przechodzi; poprawka ta jest zresztą bardzo mała, w żadnym przypadku nie przechodzi 0,2 f. Kolumna czwarta zawiera wartości siły, obliczone ze wzoru $P = 0{,}0143\ R$. Wzór ten wyprowadzony został z dostrzeżeń w sposób opisany w Dodatku. Kolumna piąta przekonywa, że doświadczenia przedstawione są wiernie przez wzór powyższy; w każdem z doświad-

czeń 7 i 8 różnica między wartością obliczoną a zaobserwowaną dochodzi do 0,1 f., jestto wszakże różnica zgoła nieznaczna w porównaniu z użytemi ciężarami.

284. Do dźwignięcia 100 f., jak wskazuje wyrażenie 0,0143 f., potrzeba by było 1,43 f., zysk przeto mechaniczny szruby jest 100 : 1,43 = 70. Szruba jest więc maszyną daleko potężniejszą, aniżeli którykolwiek z rozbieranych przez nas bloków złożonych. Maszyna tak rzydatna, tak niewielkich wymiarów i tak dzielna jak szruba, jest nieocenioną do niezliczonych celów w sztukach, zarówno jak i do mnóstwa zastosowań w użytku codziennym.

285. Widoczna wszakże, że odległość, na jaką szruba podnieść może ciężar, ograniczona jest długością samejże szruby, pod względem przeto *obszerności podniesienia*, szruba rywalizować nie może z wielu innemi urządzeniami, służącemi do dźwigania ciężarów.

286. Widzieliśmy, że stosunek szybkości jest 193; wypada stąd zatem, że dla podniesienia 100 f. na 1 stopę wyłożyć należy 1,43 × 193 = 276 jednostek energii, z tego zaś tylko 100 jednostek czyli 36 odsetek wydatkuje się użytecznie; reszta niweczy się pokonywaniem tarcia szruby. Dwie trzecie przeto prawie energii, zastosowanej do takiej szruby, ulegają stracie. Stąd też widzimy, że tarcie nie dozwala ciężarowi opadać, ponieważ mniej nad pięćdziesiąt odsetek energii wyłożonej zużywa się korzystnie (ust. 222). Jestto jedna z cennych własności, jakie szruba posiada.

287. Wykazać możemy sprzeczność szruby z blokiem złożonym (ust. 199). Obie te maszyny działają po-

tężnie, ale ta ostatnia jest wielka i oszczędna co do siły, gdy pierwsza ma wymiary niewielkie i jest rozrzutna; druga nadaje się do podnoszenia ciężarów na znaczne odległości, pierwsza zaś do wywierania ciśnień na odległościach krótkich.

Zastosowanie szruby do prasy.

288. Ważność szruby jako maszyny skłania nas do rozbioru innej jeszcze z jej form użytecznych, a mianowicie zastosowania jej do wywierania wielkich ciśnień, jak naprzykład do podźwignięcia okrętu, który należy spuścić na morze, albo do przywrócenia lokomotywy na szyny, z których się jej koła zsunęły. Maszyny te są różnej postaci i zastosowane są do różnych ciężarów; jednę z nich widzimy przy *D* w fig. 44 str. 181, a opis jej szczegółów podany jest w tabeli XVII. Oznaczymy siły, jakie zastosować trzeba do tej maszyny dla pokonania oporów, nieprzechodzących 1120 funtów.

289. Użycie ciężarów dochodzących do 1120 f. byłoby niedogodnem, jeżeli niezupełnie niemożebnem w sali wykładowej, wymagane wszakże ciśnienia wywołane być mogą za pośrednictwem drążka. Na fig. 44 widzimy mocną belkę drewnianą, na 16' długą, ochronioną od zgięcia za pomocą łańcucha. Przy *E* jest belka ta przyczepiona do zawiasy, na której obraca się swobodnie; przy *A* umieszczona jest platforma do nakładania ciężarów. Szruba jest o 2' oddalona od *E*, belka jest zatem drążkiem drugiego rodzaju, a ciężar jakikolwiek, umieszczony na platformie, wywiera ciśnienie ośmiokrotne na szczyt szruby. Tak, naprzykład, ciężar 14 f. na platfor-

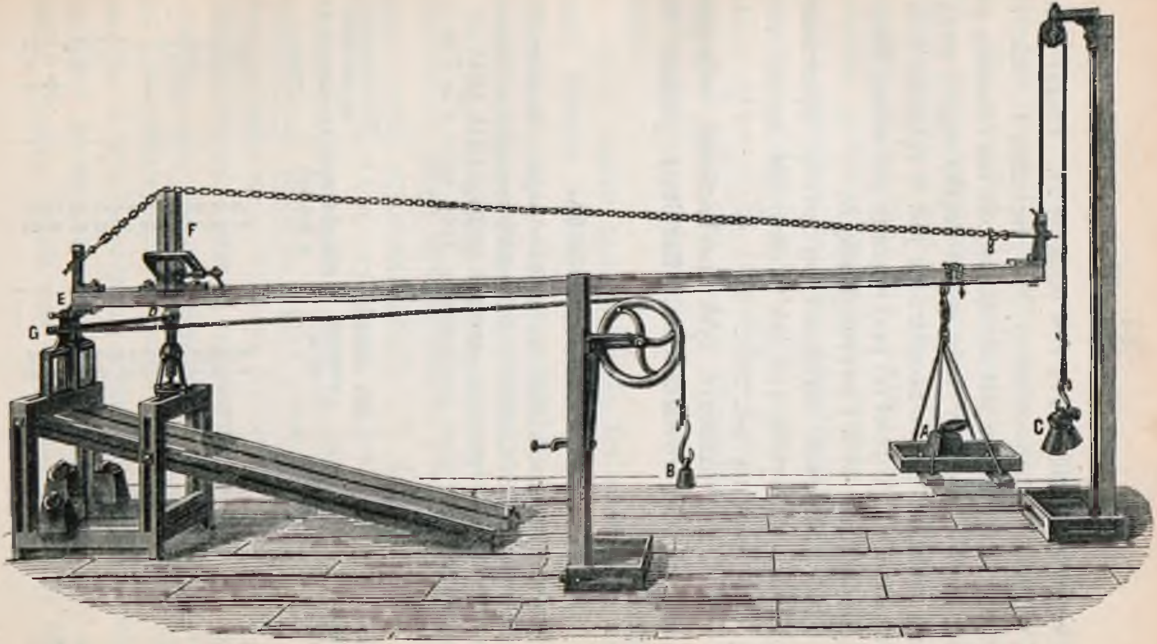

Fig. 44.

mie wywiera ciśnienie 112 f. w punkcie D. Ciężar drążka i platformy zrównoważony jest ciężarem C, tak, że dopóki platforma nie jest obciążona, nie ma ciśnienia na szczyt szruby, możemy tedy ciężar drążka tego z uwagi naszej usunąć. Szruba zaopatrzona jest w rękojeść $D\ G$, a do końca G rękojeści tej przywiązany jest sznur, który przechodzi przez blok i utrzymuje siłę B.

290. Stosunek szybkości tej szruby, opatrzonej rękojeścią 33", wynosi 414, jak to otrzymać można metodą wyżej opisaną (ust. 283).

291. Aby oznaczyć zysk mechaniczny, odwołać się musimy do doświadczenia. Rezultaty podane są w tabeli XVII.

TABELA XVII. — SZRUBA.

Szruba z żelaza kutego, gwint kwadratowy, średnica 2", o dwu skrętach na calu, rękojeść 33"; mutra mosiężna, stykające się powierzchnie natłuszczone; stosunek szybkości 414; efekt użyteczny 28 odsetek; zysk mechaniczny 116; wzór $P = 0{,}66 + 0{,}0075\ R$.

Numer doświadczenia	R. Opór w funtach	Siła zaobserwowana w funtach	P. Siła obliczona w funtach	Różnica między siłą obliczoną a zaobserwowaną
1	112	1,4	1,5	+ 0,1
2	224	2,2	2,3	+ 0,1
3	336	3,3	3,2	— 0,1
4	448	4,1	4,0	— 0,1
5	560	5,0	4,9	— 0,1
6	672	5,7	5,7	0,0
7	784	6,5	6,5	0,0
8	896	7,4	7,4	0,0
9	1008	8,1	8,2	+ 0,1
10	1120	9,0	9,1	+ 0,1

292. Z kolumny różnic poznać możemy, jak dokładnie są doświadczenia przez wzór przedstawione. Siła potrzebna do podniesienia danego ciężaru, 600 f. dajmy, obliczoną być może za pomocą wzoru: $0{,}66 + 0{,}0075 \times 600 = 5{,}16$. Zysk mechaniczny przeto szruby tej jest $600 : 5{,}16 = 116$. Szruba ta jest przeto bardzo potężną, zastosowaną bowiem do niej siłę powiększa przeszło stokrotnie. Aby dźwignąć 600 f. na jednę stopę, wyłożyć trzeba ilość pracy, wyrażoną przez $5{,}16 \times 414 = 2136$ jednostek; z ilości tej zużywa się korzystnie tylko 600, co daje 28 odsetek, trzy czwarte przeto prawie energii wyłożonej wydatkuje się na tarcie.

293. Szruba ta nie dozwala też oporowi opadać, mniej bowiem nad 50 odsetek energii zużywa się korzystnie; aby ciężar obniżyć, musiał być w samej rzeczy drążek naciskany w stronę przeciwną.

294. Szczegóły któregokolwiek z doświadczeń powyższych mogą być nauczające i dają potwierdzenie zasad wyżej wyprowadzonych. W doświadczeniu 10 widzimy, że 9,0 f. wystarcza do podniesienia 1120 f., teraz zaś, gdy przesuwam blok na drugą stronę drążka i umieszczam sznur do drążka prostopadle, widzimy, że do wywołania ruchu w stronę przeciwną, to jest, oczywiście, do obniżenia szruby, przyczepić trzeba siłę 3,4 f. A zatem, przy pomocy nawet oporu, konieczna jest siła 3,4 f. do przezwyciężenia tarcia. To daje nam możność oznaczenia wysokości tarcia w tenże sam sposób, jakiego użyliśmy do oznaczenia tarcia w bloku złożonym (ust. 207). Niech x będzie siła wyłożona użytecznie na po

dnoszenie, a y siła tarcia, która w każdym z obu kierunków zarówno sprowadzeniu ruchu przeciwdziała; aby więc opór dźwignąć w górę, zastosować trzeba siłę wystarczającą do przezwyciężenia x i y, skąd mamy $x + y = 9{,}0$. Gdy ciężar ma być opuszczanym ku dołowi, siła x pomaga oczywiście obniżaniu temu, sama jednak ta siła x nie wystarcza do pokonania tarcia, ale wymaga dodatku 3,4 f., mamy przeto $x + 3{,}4 = y$, a stąd $x = 2{,}8$, $y = 6{,}2$.

Znaczy to, że 2,8 f. jestto wielkość siły, któraby przy szrubie od tarcia wolnej wystarczyła do podniesienia 1120 funtów. W szrubie wszakże od tarcia wolnej otrzymujemy siłę, dzieląc opór przez stosunek szybkości. W tym razie 1120 : 414 = 2,7, co odstępuje o 0,1 f. od powyższej wartości x. Zgodność tych rezultatów jest zadawalniająca.

Szruba do spajania.

Fig. 45.

295. Jednem z najważniejszych zastosowań szruby jest użycie jej do nitowania czyli spajania. Służy do tego pręt z żelaza kutego, opatrzony na jednym końcu w główkę, a na drugim w szrubę, na którą działa mutra. Szruby takie rozmaitej wielkości i postaci przedstawiają nity, któremi części maszyn i budowli najprędzej się spajają. Różne są powody, dla których szruby te są tak dogodne. Ściągają części do ścisłego zetknięcia z siłą niesłychaną; same zaś

są tak mocne, że części połączone z praktycznego punktu widzenia tworzą jednę bryłę. Mogą być szybko przymocowywane i również prędko usuwane. Taż sama szruba, używana do obręczy kół, stosowaną być może do kół różnej wielkości. Nie potrzeba też zgoła wprawnej ręki do posługiwania się prostym przyrządem, który obraca mutrę. Jeżeli dodamy jeszcze, że nity te są tanie i trwałe, pojmiemy łatwo, dlaczego są tak powszechnie używane.

296. Winniśmy w zakończeniu zwrócić uwagę, że nity użyteczność swą zawdzięczają tarciu; szruby tego rodza nie wypadają, gdy bowiem mutra jest należycie przyszrubowana, nie odkręca się sama. Gdyby nie więcej nad połowę siły, zastosawanej do szruby, pochłaniało tarcie, — szruba i mutra czyniłyby się nawzajem bezużyteczne, albo też należałoby je zaopatrzyć w przyrząd bardzo zawiły do ustrzeżenia ruchu mutry.

WYKŁAD X.

K o ł o w r ó t.

Wstęp. — Doświadczenia z kołowrotem. — Tarcie na oś. — Kołowrót na wale. — Kołowrót z trybem zębatym. — Kran czyli żóraw. — Uwagi ogólne.

WSTĘP.

297. Maszyny proste, które rozbieraliśmy w ciągu wykładów dotychczasowych, mogą być zestawione w dwie grupy, — jedna z nich obejmuje maszyny, w których używane są sznury lub łańcuchy, druga zaś maszyny, w których sznury lub łańcuchy nie występują. Do grupy, w której sznury zastosowania nie mają, należy szruba, roztrząsana w wykładzie ostatnim, oraz drążek, rozebrany w wykładzie VIII; śród maszyn zaś, w których sznury lub łańcuchy tworzą istotną część przyrządu, blok i kołowrót zajmują miejsce wybitne. Zbadaliśmy poprzednio różne formy bloka, a obecnie przystępujemy do niemniej ważnego kołowrota.

298. Gdzie do pokonania nastręczają się opory wielkie, ale, gdzie krótką jest droga, przez którą opór taki ma być pokonywany, drążki lub szruby przedstawia-

ją w ogólności najwłaściwsze sposoby wzmagania siły. Gdy natomiast opór ma być przesunięty przez drogę znaczną, odwołać się należy do pomocy bloka lub kołowrota, albo też niekiedy do kombinacyi obu tych maszyn. Kołowrót jest maszyną powszechnie używaną, gdy znaczną jest odległość, na jaką ciężar ma być podniesiony, albo przez jaką opór jakikolwiek ma być pokonany.

299. Kołowrót przybiera formy bardzo różne, a to odpowiednio do różnych celów, do jakich jest stosowany. Ogólną zasadę urządzenia tego zrozumiemy z fig. 46.

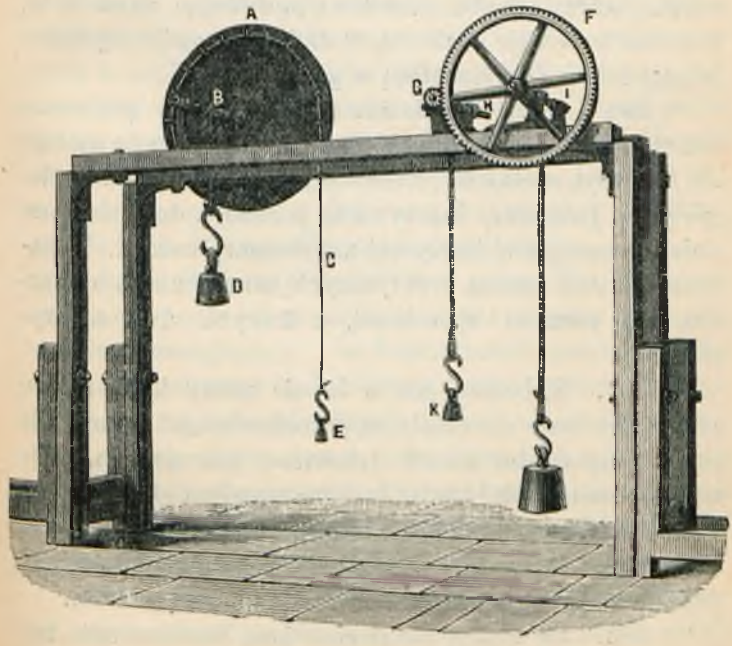

Fig. 46.

Kołowrót składa się z osi żelaznej *B*, umieszczonej na podporach tak, by mogła obracać się swobodnie; do osi przyczepiony jest sznur, dźwigający na końcu swym ciężar *D*, który się stopniowo podnosi, gdy oś się obraca. Na osi osadzone jest koło *A*, które się wraz z nią obraca; koło to na obwodzie opatrzone jest w haki, na których spoczywa sznur; koniec jeden sznura przytwierdzony jest do obwodu koła, drugi zaś dźwiga ciężar *E*. Ostatni ten ciężar uważać możemy za siłę, gdy ciężar *D*, zawieszony na osi, przedstawia opór. Gdy siła *E* jest dostatecznie wielka, wtedy schodzi ku dołowi, powodując obrót koła, koło zaś wywołuje obrót osi, a stąd sznur owija się dokoła niej i opór *D* podnosi się w górę.

300. Jeżeli urządzenie to, jako sposób podnoszenia ciężarów, porównamy z blokiem różnicowym, wydaje się ono zbyt wielkiem i z innych jeszcze względów niedogodnem; jednakże, jak to zaraz poznamy, dozwala ono daleko oszczędniej korzystać z wyłożonej energii. W zastosowaniach zresztą praktycznych urządzenie to upraszcza się różnemi sposobami, z których dwa tu wymienimy.

301. Kabestan jest w istocie rzeczy kołowrotem; siła w tym razie nie działa za pośrednictwem sznura, ale przez bezpośredni nacisk człowieka pracującego. Nie ma tu nawet i koła, nacisk bowiem wywiera się jakby na końce szprych koła, gdyby koło to tu istniało.

302. W zwykłej windzie siła robotnika działa bezpośrednio na korbę, która obraca się po okręgu koła.

303. Są zresztą niezliczone inne zastosowania tejże zasady, a które łatwo zrozumiane być mogą przy nie-

wielkiej uwadze. Nie zatrzymamy się też na ich opisywaniu, ale przystąpimy wprost do ważnej kwestyi zależności między siłą a oporem.

Doświadczenia z kołowrotem.

304. Rozpoczniemy szereg doświadczeń z kołowrotem *A B*, fig. 46. Oznaczymy najpierw stosunek szybkości, a następnie wyprowadzimy zysk mechaniczny z doświadczenia. Koło jest drewniane i ma około 30" w średnicy. Sznur, do którego siła jest przyczepiona, rozpostarty jest w około na szeregu haków, umieszczonych w pobliżu brzegu koła; obwód przeto skuteczny jest nieco mniejszy, aniżeli obwód rzeczywisty. Mierzę jeden obieg sznura i znajduję długość 88,5"; tę przeto długość przyjmiemy, jako obwód skuteczny koła. Oś ma 0,75" w średnicy, obwód jej skuteczny jest wszakże większy, aniżeli koła, którego długość ta jest średnicą.

305. Skuteczny obwód osi w przypadku, gdy sznur znacznie wymiar jej powiększa, ocenić możemy należycie w sposób następujący. Do końca sznura przywiązujemy ciężar, dostateczny do dokładnego go wyprężenia, następnie obracamy kołowrót, dajmy, 20 razy i mierzymy wysokość, o jaką ciężar został podniesiony, a w takim razie dwudziesta część tej wysokości jest skutecznym obwodem osi. Tą drogą znajdujemy, że obwód osi, jaki pod uwagę brać mamy, wynosi 2,87".

306. Możemy już więc oznaczyć stosunek szybkości tej maszyny. Gdy kołowrót wykona jeden pełny obrót, siła obniży się o drogę 88,5", opór zaś podniesie

się o 2,87". Pochodzi to oczywiście stąd, że koło i oś są nawzajem między sobą złączone, kończą zatem jeden obrót w jednakim czasie, a stąd stosunek drogi, jaką siła przebiega, do drogi, na jaką ciężar zostaje podniesionym, jest 88",5 : 2,87 = 31 ze znacznem przybliżeniem. Przyjmiemy tedy, że stosunek szybkości jest 31. Kołowrót więc posiada daleko znaczniejszy stosunek szybkości, aniżeli którykolwiek z rozważanych poprzednio bloków złożonych.

307. Gdyby tarcia nie było, stosunek szybkości 31 wyrażałby zarazem i zysk mechaniczny kołowrota; ze względu wszakże na istniejące tarcie zysk istotny jest mniejszy, — o ile zaś jest mniejszy, musimy to ocenić doświadczeniem. Zawieszam ciężar 56 f. na haku, przyczepionym do sznura schodzącego z osi; ciężar ten widzimy na fig. 46 przy *D*, dostrzegamy zaś, że siła 2,6 f. przyczepiona przy *E* wystarcza właśnie do podniesienia ciężaru *D*. Z rezultatu tego wnosimy, że zysk mechaniczny maszyny tej jest 56 : 2,6 = 21,5. Do poprzednich 56 f. dodaję drugi takiż sam ładunek, a widzimy, że siła 5,0 f. podnosi opór 112 f. Zysk mechaniczny w tym razie jest 112 : 5 = 22,5. Przyjmiemy wartość średnią 22. Zysk mechaniczny obniża się przeto wskutek tarcia z 31 do 22.

308. Na podstawie rezultatu tego obliczyć możemy liczbę jednostek energii, jaką zużytkować można korzystnie z każdych 100 jednostek wyłożonych. Dajmy, że ładunek 100 f. ma być podniesiony na jednę stopę, — do podniesienia go wystarczy siła 100 : 22 = 4,6 f. Siła ta wywarta być musi na drodze 31', wyłożyć zatem należy 31 × 4,6 = 143 jednostek energii; z ilości tej zużywa się korzystnie 100 jednostek, a zatem odsetka

energii użytecznie wyłożonej wynosi 100 : 143×100=70. Wypływa stąd, że pokonywanie tarcia pochłania 30 odsetek energii wyłożonej.

309. Pojmujemy też, dlaczego kołowrót odwraca się, to jest, dlaczego samowolnie opuszcza ciężar ku dołowi, gdy na to zezwolimy; pochodzi to stąd, że mniej niż połowa wyłożonej energii zużywa się na tarcie.

310. Szereg doświadczeń, starannie przeprowadzonych z tym kołowrotem, zestawiony jest w tabeli XVIII.

TABELA XVIII. — KOŁOWRÓT (KOŁO NA OSI).

Koło drewniane; oś żelazna, na podporach mosiężnych, natłuszczonych; ogólny ciężar koła i osi 16,5 f.; obwód skuteczny koła 88,5″; obwód skuteczny osi 2,88″; stosunek szybkości 31; zysk mechaniczny 22; efekt użyteczny 70 odsetek; wzór $P = 0{,}204 + 0{,}0426\ R$.

Numer doświadczenia.	R. Opór w funtach	Siła zaobserwowana w funtach.	P. Siła obliczona w funtach.	Różnica między wartością zaobserwowaną a obliczoną.
1	28	1,4	1,4	0,0
2	42	2,0	2,0	0,0
3	56	2,6	2,6	0,0
4	70	3,2	3,2	0,0
5	84	3,7	3,8	+0,1
6	98	4,4	4,4	0,0
7	112	5,0	5,0	0,0

Związek, zachodzący między siłą a oporem oznaczony został metodą, wyłożoną w Dodatku; wyraża się on w postaci:

$$P = 0{,}204 \times 0{,}0426\ R.$$

311. Tak, naprzykład, w doświadczeniu 5 opór 84 f. podniesiony został siłą 3,7 f. Wartość obliczona za pomocą wzoru czyni $0,204 + 0,0246 \times 84 = 3,8$. Obliczona ta wartość odstępuje od wartości zaobserwowanej zaledwie o 0,1 f., jak to podaje kolumna piąta. Poznajemy z tej kolumny, że wartości obliczone według wzoru przedstawiają wiernie doświadczenia.

312. Związek między siłą a oporem wyprowadziliśmy z zasady energii, mogliśmy go wszakże otrzymać i z zasady drążka. Koło wraz z osią obracają się razem dokoła środka osi, możemy przeto środek ten uważać za punkt podpory drążka, punkty zaś, w których sznury stykają się z kołem i osią, za punkty przyczepienia siły i oporu.

313. Według zasady drążka pierwszego rodzaju (ust. 234) siła ma się do oporu w stosunku odwrotnym ramion; w obecnym przeto przypadku siła ma się do oporu w stosunku odwrotnym promieni koła i osi. Okręgi wszakże kół są w stosunku swych promieni, a zatem siła tak się ma do oporu, jak obwód osi do obwodu koła.

314. Droga ta dochodzenia jest nieco sztuczna; w sposób bardziej naturalny wyprowadza się prawo to bezpośrednio z zasady energii. W maszynie bardziej zawiłej trudno byłoby śledzić przenoszenie się czyli transmisyę siły z jednej jej części na część sąsiednią, zasada zaś energii trudność tę omija; jakiemkolwiek byłoby urządzenie mechaniczne, proste czy też zawiłe, z kilku tylko, czy też z wielu części złożone, należy nam jedynie oznaczyć przez próby, ile stóp przebiedz musi siła,

by opór na jednę stopę dźwignęła; liczba tak otrzymana jest teoretyczną skutecznością czyli zyskiem mechanicznym maszyny.

Tarcie na oś.

315. W kołowrocie, który był przedmiotem naszych doświadczeń, jak widzieliśmy, około 30 odsetek siły zużywa się na tarcie. Możemy też dojść, od czego strata ta zależy, a stąd też w pewnej mierze przyczynę tę usunąć. Doświadczenia ust. 165 nauczyły nas, że tarcie w małym bloku jest znacznie większe, aniżeli w bloku wielkim, — a w ogólności, tarcie jest odwrotnie proporcyonalne do średnicy bloka. Wnosimy stąd, że owijając sznur na bębnie czyli na wale, zamiast na osi, tarcie zmniejszyć będziemy mogli.

316. Wpływ tarcia na oś zbadać możemy doświadczalnie za pomocą przyrządu fig. 47 str. 194. *B* jest to pręt o średnicy 0,75", otoczony kilkakrotnie obiegającym go sznurem; końce tego sznura zbiegają swobodnie ku dołowi i na każdym z nich zawieszone są haki *E*, *F*. Pręt obraca się w natłuszczonych osadach mosiężnych. Aby dojść, jak znaczna siła ulega stracie przy nawijaniu się sznura na osi tych wymiarów, przyczepimy pewien ciężar, dajmy 56 f., na jednym haku *F*, a następnie oznaczymy, jaka siła zawieszona na drugim haku *E* wystarczy do podniesienia *F*. W tym razie nie ma zgoła zysku mechaniczego, nadmiar przeto ładunku, jaki otrzymać musi *E* dla podźwignięcia w górę *F*, jest rzeczywistą miarą tarcia.

317. Nakładamy więc ciężary na hak *E*, dopóki nie zacznie się on obniżać, a to ma miejsce, gdy siła ta dochodzi do 85 f. Widzimy stąd, że dla przezwyciężenia tarcia przy podnoszeniu 56 f. potrzebnym okazał się nad-

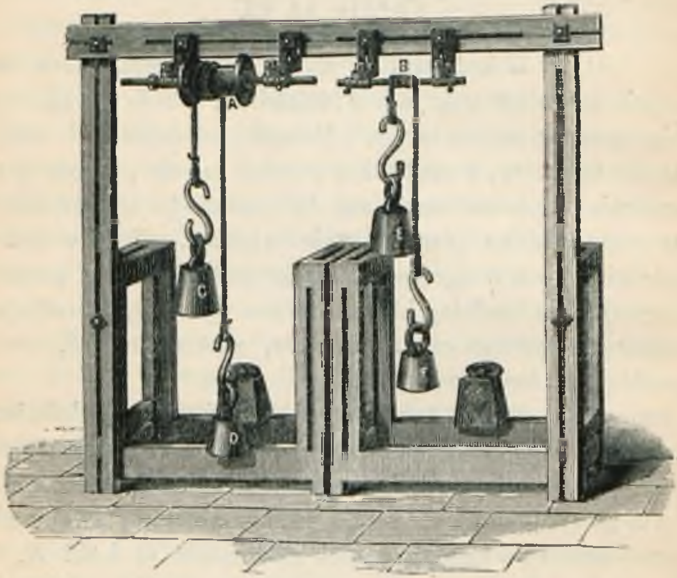

Fig. 47.

miar 29 f. Rezultat ten wyrazić możemy ogólnikowo w ten sposób, że dla podniesienia drogą tą ciężaru potrzeba siły półtora raza większej. Prawo to stwierdzamy, zawieszając na haku *F* 28 f., w tym razie bowiem okazuje się, że dla podniesienia tego ciężaru potrzeba siły 43 f. na haku *E*; gdyby siła ta czyniła 42 f., byłaby dokładnie półtora raza większa od oporu.

318. Przy podnoszeniu więc na osi ciężaru *F* ulega stracie trzecia prawie część siły, działającej na obwód tej osi. Doświadczenie to uczy nas, na czem polega strata w kołowrocie osadzonym na osi ust. 304, i tłomaczy, dlaczego trwoni się trzecia część, mniej więcej, siły. Ładunek 85 f. zdołał dźwignąć zaledwie dwie trzecie własnego swego ciężaru, a to z powodu tarcia; według tego więc, cośmy obecnie poznali, można już z góry było oczekiwać, że siła działająca na obwód koła daje efekt, który wynosi tylko dwie trzecie zysku mechanicznego, jaki wypada z rozważań teoretycznych.

319. Z doświadczenia tego wnieść możemy, że właściwy sposób unikania straty przez tarcie polega na okręceniu sznura dokoła wału znacznej średnicy, zamiast owijaia go bezpośrednio na samejże osi. Na osi, podobnej do osi użytej przy powyższych doświadczeniach, umieszczamy bęben, mający około 15" w obwodzie. Okręcamy dokoła bębna sznur dwa lub trzy razy i końce jego, jak poprzednio, pozostawiamy swobodnie zwieszone. Do każdego z tych końców przyczepiamy teraz po 56 f., a znajdujemy, że dodatek 10 f. do jednego z tych ciężarów wystarcza do przezwyciężenia tarcia, sprowadza spadek tego ciężaru a podnoszenie się drugiego. Przyrząd przedstawiony jest na fig. 47. *A* jestto bęben, *C* i *D* ciężary. Przy urządzeniu tedy takiem 10 f. wystarcza do przezwyciężenia tarcia, które wymagało 20 f., gdy sznur okręcony był wprost dokoła osi. Innemi słowy, przy pomocy bębna czyli wału strata na tarcie redukuje się do trzeciej części poprzedniej swej wielkości.

Kołowrót na wale.

320. Osadzamy teraz bęben ten na osi, z którą poprzednio przeprowadzaliśmy doświadczenia, a która przedstawiona jest na fig. 46 przy *B*. Obwód koła wynosi 88,5", obwód bębna, który tu stanowi wał kołowrotu, 14,9". Właściwa droga oznaczenia obwodu wału polega na przyczepieniu ciężaru do sznura i na podniesieniu go przez jeden obrót koła, — wysokość, na jaką ciężar zostaje podniesionym, daje nam skuteczny obwód wału. Stosunek szybkości kołowrota znajdujemy teraz, dzieląc 88,5 przez 14,9, co daje 5,94.

321. Zysk mechaniczny maszyny tej oznaczyć należy doświadczeniem. Zawieszamy ciężar 56 f. na haku i przyczepiamy siłę do koła. Poznajemy, że 10,1 f. wystarcza właśnie do podniesienia oporu.

322. Zysk więc mechaniczny otrzymamy, dzieląc 56 przez 10,1, co na iloraz daje 5,54. Zysk mechaniczny nie różni się tu znacznie od stosunku szybkości 5,94; w maszynie tej drobna więc tylko część siły wydatkuje się na tarcie.

323. Stratę tę oznaczyć możemy, obliczając odsetkę energii korzystnie wyłożonej. Dajmy, że ciężar 100 f. podniesiony został na wysokość jednej stopy; na cel ten użyć trzeba było siły 100 : 5,54 = 18,1 f. Wypływa to z samego znaczenia stosunku, który nazwaliśmy zyskiem mechanicznym; aby wszakże ciężar dźwignięty został na jednę stopę, potrzeba oczywiście, według wyżej oznaczonego stosunku szybkości, by siła przebiegła w drugą stronę 5,94', — ilość przeto wyłożonych jednostek pracy

mierzy się iloczynem 5,94 przez 18,1, co daje 107,5; aby zatem wykonać 100 jednostek pracy, wyłożyć trzeba 107,5 takichże jednostek. Odsetka zaś energii korzystnie spożytkowanej czyni $100 : 107{,}5 \times 100 = 93$. Jestto znacznie więcej, aniżeli odsetka 70 energii korzystnie wyłożonej, gdy oś użytą była bez bębna.

324. Szereg doświadczeń, starannie przeprowadzonych z kołowrotem tym osadzonym na wale, zestawiony jest w tabeli XIX.

TABELA XIX. — KOŁOWRÓT NA WALE.

Koło drewniane, 88,5″ w obwodzie, osadzone na wspolnej osi z wałem z żelaza lanego, 14,9″ w obwodzie; oś z żelaza kutego, 0,75″ w średnicy, oparta na czopach mosiężnych, natłuszczonych; siła działa na obwód koła, opór podnosi się za pośrednictwem sznura, obiegającego dokoła wału; stosunek szybkości 5,94; zysk mechaniczny 5,54; efekt użyteczny 93 odsetki; wzór $P = 0{,}5 + 0{,}169\,R$.

Numer doświadczenia	R. Opór w funtach	Siła zaobserwowana w funtach	P. Siła obliczona w funtach	Różnice między wartością obliczoną a zaobserwowaną
1	14	2,7	2,9	+ 0,2
2	28	5,3	5,2	— 0,1
3	42	7,7	7,6	— 0,1
4	56	10,1	10,0	— 0,1
5	70	12,4	12,4	0,0
6	84	14,7	14,7	0,0
7	98	17,1	17,1	0,0
8	112	17,4	19,5	+ 0,1

Wzór, przedstawiający doświadczenia te z najwyższym stopniem ścisłości, jest $P = 0{,}5 + 0{,}169\,R$. Wzór ten porównany został z doświadczeniami, a kolumna różnic świadczy, że wartości obliczone i zaobserwowane przystępują nawzajem do siebie bardzo blisko. Liczba stała 0,5 pochodzi częścią z ciągłego tarcia ciężkiego wału i koła, częścią zaś, być może, z drobnych nieregularności, które sprawiają, że środek ciężkości całej masy nie przypada ściśle na osi.

325. Jakkolwiek maszyna ta jest oszczędniejszą co do nakładu siły, aniżeli kołowrót na osi ust. 305, jest wszakże mniej dzielną; w samej rzeczy, skuteczność jej mechaniczna jest prawie cztery razy mniejsza, aniżeli kołowrota na osi. Należy przeto rozpatrzeć, czyby nie można wynaleźć metody, któraby nam zapewniła korzyści słabego tylko tarcia, a zarazem dawała znaczny zysk mechaniczny, — zajmiemy się tedy zbadaniem tej rzeczy.

Kołowrót z trybem zębatym.

326. Za pomocą tak zwanych kół zębatych mamy możność wzajemnego między sobą łączenia dwu lub większej liczby kołowrotów, przez co działalność kołowrota pojedyńczego znacznie powiększyć możemy. Koła zębate używane są do najrozmaitszych w mechanice celów; kilka przykładów ich zastosowania mieliśmy już wyżej w ciągu naszych wykładów (fig. 30). Koła, jakiemi się obecnie posługiwać będziemy, używają się często w tokarniach, lub innych niewielkich maszynach; są to tak zwane w Anglii koła dziesięciokrotne, co znaczy, że koło tego rodzaju posiada na obwodzie swoim dziesięć razy więcej zębów, aniżeli ma cali w swej średnicy. Mam tu

koło o średnicy 20", posiada ono przeto 200 zębów; to drugie zaś koło ma w średnicy 2,5", zawiera tedy 25 zębów. Osadzimy tedy dwa koła na dwu osiach równoległych, tak, aby się nawzajem zębami swemi zaczepiały w sposób wskazany na fig. 46, — *F* jestto koło wielkie, posiadające 200 zębów, *G* zaś tryb o 25 zębach. Osie mają po 0,75" w średnicy; na każdej z nich okręcony jest sznur, na którym zawieszony jest hak.

327. Mały ciężar przy *K* wystarcza do podniesienia daleko większego ciężaru na drugiej osi; zanim wszakże rozpoczniemy doświadczenia nad skutecznością mechaniczną tego urządzenia, obliczymy, jak zwykle, stosunek szybkości. Koło zawiera ośm razy więcej zębów aniżeli tryb; widoczna przeto, że podczas, gdy koło ukończy obrót jeden, tryb wykona ośm obrotów, i nawzajem, tryb obrócić się musi ośm razy, by koło raz się obróciło. Siła zatem, która sprowadza obrót trybu, obniżyć się musi o długość przechodzącą ośmiokrotnie obwód osi, podczas gdy opór podnosi się o drogę, wyrównywającą jednemu obwodowi osi. Wnosimy stąd, że stosunek szybkości maszyny czyni 8.

328. Zysk mechaniczny oznaczamy przez próby. Przyczepiwszy ładunek 56 f. do osi koła wielkiego, poznajemy, że podnosi go w górę siła 13,7 przy *K*; zysk mechaniczny maszyny wynosi przeto około 4,1, co jest prawie dokładnie połową stosunku szybkości. Widzimy też, że po usunięciu siły opór właśnie zaczyna ku dołowi opadać, a stąd możemy wnieść, że połowa prawie siły zużywa się na tarcie i że dlatego to zysk mechaniczny jest mniej więcej połową stosunku szybkości. Dokładna

odsetka energii, korzystnie zużytkowana przy obecnym oporze, wynosi 51. Jeżeli zawiesimy 112 f. na tymże haku, do podniesienia ich wystarczy 26 f., a rezultat ten wydaje zysk mechaniczny 112 : 26 = 4,3, liczbę zatem nieco większą, aniżeli w doświadczeniu poprzedniem. Często w samej rzeczy zachodzi ta własność maszyn, że gdy opór wzrasta, zysk mechaniczny nieco się polepsza.

329. W tabeli XX mamy zestawienie doświadczeń, tyczących się zależności między siłą a oporem w kołowrocie z trybem zębatym; tabela ta zrozumiałą jest po podanych wyżej objaśnieniach podobnych tabel (ust. 310, 324).

TABELA XX. — KOŁOWRÓT Z TRYBEM ZĘBATYM.

Koło (dziesięciokrotne) o 200 zębach; tryb o 25 zębach; osie równe, obwód skuteczny każdej 2,87″; czopy mosiężne, natłuszczone; stosunek szybkości 8; zysk mechaniczny 4,1; efekt użyteczny 51 odsetek; wzór $P = 2{,}46 + 0{,}21\ R$.

Numer doświadczenia	R. Opór w funtach	Siła zaobserwowana w funtach	P. Siła obliczona w funtach	Różnice między wartością obliczoną a zaobserwowaną
1	14	5,4	5,4	0,0
2	28	8,7	8,3	— 0,4
3	42	11,0	11,3	+ 0,3
4	56	13,7	14,2	+ 0,5
5	70	17,5	17,2	— 0,3
6	84	20,0	20,1	+ 0,1
7	96	23,0	23,0	0,0
8	112	26,0	26,0	0,0

330. Znaczna wysokość tarcia, jakie przy urządzeniu tem występuje, pochodzi stąd, że sznur okręcony

jest bezpośrednio na osi, zamiast na wale, jak to wykazano w ust. 319. Moglibyśmy umieścić na osiach tych bębny i okazać tym sposobem słuszność tego twierdzenia; nie będziemy się wszakże nad tem zatrzymywać, użyjemy bowiem wałów w maszynach, które teraz opiszemy.

Kran czyli żóraw.

331. Wyjaśniliśmy poprzednio (ust. 38) ogólną budowę żórawia służącego do podnoszenia ciężarów, obecnie zaś rozbieramy w szczególności mechanizm, za pomocą którego podnoszą się ciężary. Do celu tego posłuży nam model, przedstawiony na fig. 48 str. 202. Żóraw ten podtrzymywany jest prętem drewnianym i wsparty ciężarami, umieszczonemi przy *H*; przeciwwaga taka jest konieczną, inaczej bowiem maszyna wywróciłaby się w drugą stronę po zawieszeniu ładunku na haku.

332. Ciężar utrzymywany jest na sznurze lub na łańcuchu przechodzącym przez blok *E*, a stąd do bębna, czyli wału *D*, na którym się okręca. Bęben otrzymuje ruch swój od wielkiego koła *A*, zawierającego 200 zębów.

Koło *A* wprawia się w obrót za pośrednictwem trybu *B*, który posiada 25 zębów. Przy rzeczywistem użyciu żórawia oś dźwigająca tryb zębaty obraca się za pomocą korby, przy doświadczeniach wszakże nad związkiem między siłą a oporem korba byłaby nieopowiednią,

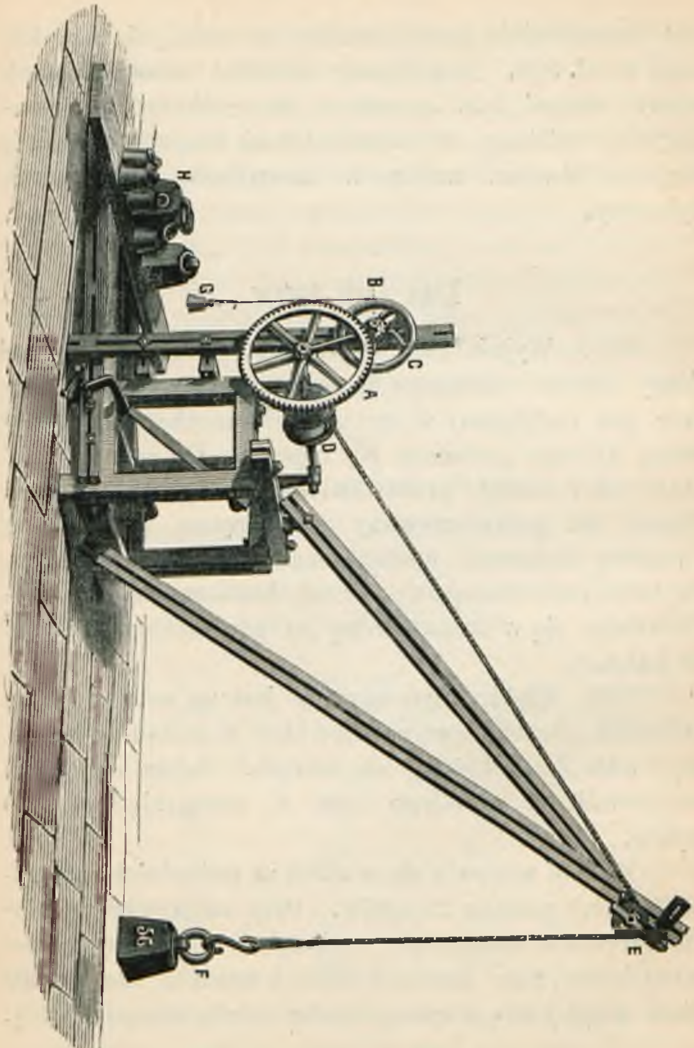

Fig. 48.

dlatego też na osi trybu umieściliśmy koło *C*, posiadające na obwodzie swym rowek. Przez rowek ten przesunięty jest sznur, gdy więc do sznura przyczepimy ciężar *G*, sprowadza on obrót koła. Ciężar ten stanowić będzie siłę, która podnosić ma opór.

333. Zanim rozpoczniemy doświadczenia nad zyskiem mechanicznym tej maszyny, obliczmy jej stosunek szybkości. Obwód skuteczny bębna *D*, oznaczony przez próby, wynosi 14,9". Ponieważ jest tu 200 zębów na kole *A*, a 25 na *B*, tryb przeto *B* obrócić się musi ośm razy, by sprowadzić jeden obrót bębna; zatem też i koło *C*, na którego obwód działa siła, obrócić się musi ośm razy na jeden obrót bębna. Obwód skuteczny koła *C* jest 43"; siła przeto działać musi przez 8 × 43" = 344", by podniosła ciężar o 14,9". Stosunek prędkości jest więc 344 : 14,9 = 23 ze znacznem przybliżeniem. Wartość tę stosunku szybkości sprawdzić możemy łatwo, podnosząc rzeczywiście ciężar o 1", przyczem się okazuje taka liczba obrotów koła *B*, że siła przesunąć się musi o 23".

334. Zysk mechaniczny, jak zwykle, oznaczyć należy przez próby. Ciężar 56 f., umieszczony przy *F*, podnosi się działaniem ciężaru 3,1 f., przyczepionym przy *G*; zysk mechaniczny przeto, z doświadczenia tego wyprowadzony, jest 56 : 3,1 = 18. Odsetka efektu użytecznego jest 78, jak to łatwo oznaczyć możemy metodą ust. 323. Jestto tedy maszyna, posiadająca znaczny bardzo zysk mechaniczny, a zarazem oszczędna pod względem nakładu energii.

TABELA XXI. — KRAN CZYLI ŻÓRAW.

Obwód koła, na które działa siła, 43″; ilość zębów na kołach zębatych 25 : 200; obwód bębna czyli wału, na którym sznur jest okręcony 14,9″; stosunek szybkości 23; zysk mechaniczny 18, efekt użyteczny 78 odsetek; wzór $P = 0{,}0556\ R$.

Numer doświadczenia	R. Opór w funtach	Siła zaobserwowana w funtach	P. Siła obliczona w funtach	Różnica między wartością obliczoną a zaobserwowaną
1	14	0,9	0,8	— 0,1
2	28	1,6	1,6	0,0
3	42	2,4	2,3	— 0,1
4	56	3,1	3,1	0,0
5	70	3,8	3,9	+ 0,1
6	84	4,5	4,7	+ 0,2
7	98	5,3	5,5	+ 0,2
8	112	6,2	6,2	0,0

335. Szereg doświadczeń przeprowadzonych z tym żórawiem zestawiony jest w tabeli XXI, porównanie zaś wartości obliczonych i zaobserwowanych świadczy, że wzór $P = 0{,}0556\ R$ przedstawia doświadczenia ze znaczną ścisłością.

336. Zwrócić wypada uwagę, że we wzorze tym nie występuje wyraz niezależny od R, z którym napotykaliśmy się często w wyrażeniach zależności między siłą a oporem. Prawdopodobne wyjaśnienie tego znajdujemy w okoliczności, że pewna drobna nieprawidłowość w postaci wału lub koła działała tu statecznie jakby mały ciężar na korzyść siły. W każdem doświadczeniu ruch rozpoczynał się od jednakiego położenia kół, a tem samem jakakolwiek nieprawidłowość działać musiała statecznie bądź to na korzyść siły, bądź z jej ujmą. Tu,

jak się zdaje, nadarza się przypadek pierwszy. W innych razach niewątpliwie zachodzić może przypadek drugi; są to zresztą różnice nader drobnego stopnia. Tarcie samej maszyny, gdy zgoła nie jest obciążona, jest innem źródłem powstawania wyrazu stałego. W razie obecnym wydarzyło się, że tarcie to zostało zupełnie prawie zrównoważone przez przytoczone tu wpływy przypadkowe.

337. Krany czyli żórawie opatrzone są zwykle w urządzenia, służące do dodawania drugiego jeszcze układu kół, gdy ładunek jest bardzo ciężki. W innym modelu przyczepiliśmy siłę do osi z trybem o 25 zębach, zaczepiającym się o koło, posiadające 200 zębów; na osi tego koła o 200 zębach osadzony jest tryb o 30 zębach, zahaczający się o koło ze 160 zębami; bęben umieszczony jest na osi tego ostatniego koła. Szereg doświadczeń z żórawiem tym zestawiony jest w tabeli XXII.

TABELA XXII. — ŻÓRAW DO ZNACZNYCH CIĘŻARÓW.

Obwód koła, na które działa siła, 43″; układ kół zębatych 200 : 25 $\times$ 180 : 30; obwód bębna, na którym sznur jest okręcony 14,9″; stosunek szybkości 137; zysk mechaniczny 87; efekt użyteczny 63 odsetek; wzór $P = 0{,}185 + 0{,}00782\ R$.

Numer doświadczenia	R. Opór w funtach	Siła zaobserwowana w funtach	P. Siła obliczona w funtach	Różnice między wartością obliczoną a zaobserwowaną
1	14	0,30	0,29	— 0,01
2	28	0,40	0,40	0,0
3	42	0,50	0,51	+ 0,01
4	56	0,60	0,62	+ 0,02
5	70	0,75	0,73	— 0,02
6	84	0,85	0,84	— 0,01
7	98	0,95	0,95	0,0
8	112	1,05	1,06	+ 0,01

Stosunek szybkości jest teraz 137, a zysk mechaniczny 87; człowiek może przeto łatwo podnieść 2500 funtów, działając na kran tego rodzaju siłą 29 funtów.

UWAGI OGÓLNE.

338. Pożytecznem będzie wykazanie sprzeczności między kołowrotem na osi, z którym prowadziliśmy doświadczenia (ust. 304), a blokiem różnicowym (ust. 209). Stosunek szybkości pierwszej z tych maszyn jest prawie dwa razy, a zysk mechaniczny prawie cztery razy większy aniżeli drugiej. W kołowrocie tracimy mniej niż połowę wyłożonej siły, w bloku różnicowym więcej niż połowę. Według tego więc kołowrót jest maszyną dzielniejszą a zarazem i oszczędniejszą, aniżeli blok różnicowy. Z drugiej wszakże strony, mniejsze wymiary tej ostatniej maszyny, łatwość jej stosowania, a przytem i dogodność praktyczna, polegająca na tej jej własności, że nie dozwala ciężarowi opadać, wszystko to wynagradza często sowicie wyższe korzyści mechaniczne kołowrota.

339. Możemy również ująć sprzeczność między kołowrotem a szrubą (ust. 277). Szruba wyróżnia się między innemi maszynami prostemi bardzo znacznym swym stosunkiem szybkości i nadmiernem swem tarciem. Tak w ust. 291 widzieliśmy, że stosunek szybkości szruby opatrzonej rękojeścią dochodzi do 414, gdy zysk mecha-

niczny jest nieco większy nad czwartą część tej liczby. *Pojedynczego* kołowrota, któryby dawał zysk mechaniczny 116, nie możnaby dogodnie zbudować; według ust. 337 wszakże możemy łatwo obmyśleć *kombinacyę* czyli *układ* kołowrotów o takiejże prawie skuteczności mechanicznej. Tarcie w kołowrocie jest o wiele mniejsze aniżeli w szrubie, energia zatem oszczędza się przy użyciu pierwszej z tych maszyn.

340. W praktyce przytrafia się wszelako często, że oszczędność energii nie waży wiele przy wyborze maszyny do danego celu, nastręczają się bowiem zawsze okoliczności większego znaczenia.

341. Tak, naprzykład, weźmy pod uwagę kran, służący do ładowania i wyładowywania okrętów, i rozpatrzmy, dlaczego podobny układ kół jest w ogólności używany do tego celu. Odpowiedź jest prosta, — układ kół jest dogodny, przy ich bowiem pomocy jakakolwiek długość łańcucha może być okręcona dokoła wału; gdyby zaś użytą została szruba, musiałaby ona posiadać długość wyrównywającą najwyższej wysokości, na jaką ciężar ma być dźwignięty. Szruba byłaby więc niedogodną, a stąd niepraktyczną; dalsza zaś okoliczność, że podobny układ kół jest oszczędniejszy pod względem nakładu energii aniżeli szruba, nie ma zgoła w kwestyi tej znaczenia.

342. Z drugiej strony, dajmy, że ciężar bardzo wielki ma być dźwignięty przez krótką drogę, jak naprzykład przy spuszczaniu okrętu na morze, — w tym

razie oczywiście odpowiednią do użycia maszyną będzie szruba; łatwo daje się użyć i posiada znaczną skuteczność mechaniczną, ogromny przeto opór podnieść można niewielką stosunkową siłą. Brak oszczędności energii przy działaniu takiem pod uwagę branym być nie może.

WYKŁAD XI.

Własności mechaniczne drzewa budulcowego.

Wstęp. — Ogólne własności drzewa budulcowego. — Opór przeciw rozciąganiu. — Opór przeciw ściskaniu. — Zachowanie się belki wyprężanej przez siłę poprzeczną.

WSTĘP.

343. Wykłady o maszynach, właśnie co ukończone, nauczyły nas, w jaki sposób podnosić możemy wielkie ciężary, lub też inne opory pokonywać. Obecnie zająć się mamy ważną rzeczą zastosowania zasad mechanicznych do *budowli*. Budowle są nieruchome, gdy maszyny przeznaczone są do ruchu; dach lub most są to budowle, żóraw zaś lub szruba są maszyny. Budowle przeznaczone są do podtrzymywania ciężarów, maszyny zaś dają możność ich podnoszenia.

344. Budowla podtrzymywać winna zarówno własny swój ciężar, jako też i ładunek, który na niej jest umieszczony. Tak most kolejowy, dajmy, musi w ka-

żdej chwili utrzymywać to, co się nazywa stateczným jego ciężarem, a często też, oczywiście, i ciężar jednego lub kilku pociągów. Zadanie więc, jakie inżynier ma do rozwiązania, polega na zaprojektowaniu mostu, któryby był dostatecznie mocnym, a zarazem i ekonomicznym; biegłość jego ocenioną być może ze sposobu, jak zdoła oba te cele osiągnąć w jednej budowli.

345. W czterech wykładach, które rzeczy tej poświęcimy, możebnem będzie podanie zaledwie drobnego szkicu, niektóre też tylko wprowadzimy szczegóły. Obszerny wykaz własności różnych materyałów, używanych do budowli, przechodzi nasz zakres; istnieją wszakże pewne ogólne zasady, tyczące się wytrzymałości materyałów, które rozebrać tu możemy. Drzewo, jako materyał budowlany, zostało w nowszych czasach w znacznej mierze zastąpione przez żelazo w wielkich konstrukcyach, drzewo jednak lepiej aniżeli żelazo nadaje się do doświadczeń w sali wykładowej. Zasadnicze prawa, które tu wykażemy w odniesieniu do wytrzymałości drzewa, są w istocie rzeczy takież same, jak i odpowiednie prawa wytrzymałości żelaza, lub jakiegokolwiek innego materyału. Dlatego też naukę o budowlach rozpoczniemy od dwu wykładów o drzewie. Prawa, które stwierdzimy doświadczalnie, zastosujemy w dalszym ciągu do kilku prostych przypadków mostów i innych budowli.

Ogólne własności drzewa.

346. Zastosowania drzewa w sztukach są podobnież rozmaite, jak i jego własności. Niektóre drzewa

użyteczne są dla swej piękności, inne dla swej wytrzymałości lub trwałości w różnych warunkach. W doświadczalnych naszych badaniach używać będziemy jedynie drzewa sosnowego. Obieramy je dlatego, że jest powszechnie znane i bardzo używane. Znajomość własności drzewa sosnowego będzie zapewne pożyteczniejszą, aniżeli znajomość własności jakiegokolwiek innego drzewa, przyczem wszakże pamiętać należy, że prawa, jakie wyprowadzimy za pośrednictwem odłamów drzewa sosnowego, stosowane być mogą w ogólności.

347. Na przecięciu poprzecznem drzewa dostrzegamy pewną liczbę pierścieni, z których każdy przedstawia przyrost drzewa w ciągu roku. Wiek drzewa można niekiedy w przybliżeniu ocenić, licząc ilość wyraźnych pierścieni. Pierścienie zewnętrzne są to nowsze części drzewa.

348. Drzewo po ścięciu zawiera znaczną ilość soku, któremu należy dozwolić, by wyparował, zanim drzewo zdatne jest do użytku. W tym celu drzewo pozostawia się w odpowiednich miejscach otwartych przez dwa lub więcej lat, a to stosownie do celu, do jakiego ma służyć; nazywa się to suszeniem drzewa, a niekiedy przyśpiesza się je innemi sposobami. Drzewo, po wyschnięciu, kurczy się, dlatego bryły drzewa często są popękane od obwodu ku środkowi, pierścienie bowiem zewnętrzne, jako nowsze i więcej soku zawierające, kurczą się silniej, aniżeli pierścienie wewnętrzne. Dla tegoż samego powodu deski często się paczą, gdy drzewo nie było należycie wysuszone. Strona ta deski, która bardziej oddaloną była od środka drzewa, kurczy się silniej aniżeli

strona druga i staje się wklęsłą. Można to łatwo sprawdzić, rozpatrując brzeg deski, na którym widzimy składające ją pierścienie.

349. Drzewo wysuszone być może działaniem pary. Mamy tu pręt sosnowy, 24" × 0,5" × 0,5", i drugi pręt podobny, wycięty z tej samej bryły i tej samej wielkości, ale który przez godzinę przeszło wystawiony był na działanie pary wody wrzącej. Przytwierdziwszy je jednym końcem do stałej podpory, zginam je razem ku dołowi, a widzimy, że gdy już pręt suchy się przełamał, pręt naparzony zginany być może znacznie dalej, zanim ustępuje. Z własności tej korzystamy przy formowaniu drzewa do statków drewnianych. Działanie pary zrozumieć możemy, jeżeli zważymy, że drzewo składa się z włókien, obok siebie ułożonych i między sobą nawzajem połączonych. Sznur składa się również z włókien, ułożonych obok siebie i skręconych, włókna te wszakże nie są spojone jak w drzewie. Dlatego to widzimy, że pręt drewniany jest sztywny, gdy sznur jest giętki. Para znajduje sobie drogę w przerwach między włóknami drzewnemi, rozluźnia ich spojenia i powiększa giętkość samychże włókien, a w taki sposób działanie pary dąży do rozluźnienia bryły drzewnej i czyni ją podatniejszą.

350. Budowę drzewa wykazać można następnem doświadczeniem. Mamy tu dwie deseczki z drzewa sosnowego, każda o wymiarach 9" × 1" × 1". Jednę z nich łatwo przełamać mogę uderzeniem, gdy druga opiera się uderzeniom moim. Różnica pochodzi stąd jedynie, że jedna z tych deseczek wycięta jest poprzecznie względem włókien, druga zaś w ich kierunku. W pierw-

szym razie rozerwać potrzebuję jedynie spójność włókien, co jest rzeczą zupełnie łatwą. W drugim natomiast razie należy mi rozłamać na dwoje sameż włókna, co jest znacznie trudniejszem. W pewnej mierze budowa włóknista występuje również i w żelazie kutem, różnica wszakże wytrzymałości żelaza, w kierunku włókien i poprzecznie względem nich, nie jest tak wybitna, jak w drzewie.

Opór przeciw rozciąganiu.

351. Należy nam wyjaśnić nieco dokładniej, co rozumieć należy przez wytrzymałość drzewa. Pojmujemy, że pręt przełamany być może trzema różnemi sposobami. Po pierwsze, pręt uchwycony być może przez siłę na każdym końcu i rozerwany na dwoje przez wyciąganie, podobnie, jak pęka nitka wyciągana. Działanie takie wymaga siły bardzo znacznej, a wytrzymałość materyału względem takiego sposobu jego niszczenia nazywa się oporem przeciw rozciąganiu. Powtóre, pręt może być przełamanym przez ciśnienie podłużne na każdym końcu, jak filar może być zgruchotanym, gdy spoczywający na nim ciężar jest zbyt wielki; wytrzymałość, która się tyczy tego rodzaju siły, nazywa się oporem przeciw ściskaniu; wreszcie, pręt przełamanym być może przez siłę działającą poprzecznie. Wytrzymałość drzewa sosnowego względnie do tych różnych sposobów stosowania siły rozważać należy oddzielnie. Pręty, których użyjemy, wycięte zostały z tejże samej bryły drzewa, wybranej z uwagi na to, by włókna były jak najprostsze i wolne od węzłów. Mają one rozmaite przecięcie prostokątne, najczęściej

1" × 0,5" i 0,5" × 0,5", choć niekiedy posługiwać się będziemy i prętami o przecięciu 1" × 1".

352. Co się tyczy wytrzymałości drzewa, jako zdolności opierania się rozciąganiu, możemy jej niewiele tylko miejsca udzielić w tym wykładzie. Mam tu pręt sosnowy *A B*, wymiarów 48" × 0,5" × 0'5", fig. 49.

Fig. 49.

Każdy jego koniec jest silnie ujęty między dwie listwy żelazne, do siebie przyszrubowane; górnym końcem jest pręt zawieszony na haku bloka epicykloidalnego (ust. 223), który ze swej strony utrzymywany jest przez trójnóg; do dolnego końca pręta przyczepione są haki do dźwigania ciężarów. Umieściwszy 3 cetnary na tych hakach i ciągnąc łańcuch bloka, przekonywam się, że mogę ciężar ten bezpiecznie podnieść, pręt zatem w każdym razie opiera się naprężeniu 3 cetnarów. Z doświadczeń dokonanych w tej rzeczy poznano, że do rozerwania na dwoje podobnego pręta potrzeba około 2500 f., a z tego wnosimy, że drzewo sosnowe jest nader wytrzymałe w opieraniu się rozciągającej je sile. Wytrzymałość pręta na rozciąganie nie zależy od jego długości, ale od pola jego przecięcia poprzecznego. Przecięcie użytego tu przez nas pręta obejmuje ćwierć cala kwadratowego, ciężar zaś, któryby zdołał rozerwać pręt o przecięciu cala kwadratowego, wynosi około dziesięciu tysięcy funtów.

353. Pręt z jakiegokolwiek materyału wydłuża się w ogólności w pewnej mierze pod działaniem zawieszonego na nim ciężaru, wydłużenie to wszakże drzewa nie jest zbyt wyraźne. Zanim pręt został obciążony, oznaczyłem na nim dwie kreski, w odległości 2 stóp dokładnie. Gdy pręt dźwiga 3 cetnary, odległość między kreskami nie uległa wprawdzie zmianie widocznej, ale pomiary ściślejsze wykazałyby niewątpliwie, że odległość ta wydłużyła się o pewien nieznaczny przyrost.

354. Porównajmy teraz opór pręta drewnianego przeciw rozciąganiu z zachowaniem się sznura w tychże samych warunkach. Sznur, mający około 0,25" w średnicy, zawieszony jednym końcem, dźwiga ciężar 14 f.,

który go dokładnie wypręża. Oznaczam kreski na sznurze tym w odległości 2 stóp, obciążenie poprzednie 14 f. zastępuję ciężarem 112 f., a po zmierzeniu przekonywamy się, że dwie kreski, oddalone poprzednio między sobą na 2', znajdują się teraz we wzajemnej odległości 2'2''; sznur więc rozciągnął się w stosunku cala na stopę przy naprężeniu 112 f., gdy drzewo nie wydłużyło się dostrzegalnie nawet przy naprężeniu 3 cetnarów.

355. Wyjaśniliśmy poprzednio w ust. 37, co rozumieć należy przez wyraz „zawieszenie". Materyał na zawieszenie takie przydatny winien przedstawiać znaczną oporność nietylko przeciw istotnemu rozerwaniu przez wyciąganie, ale nawet przeciw wyraźnemu wydłużaniu. Poznaliśmy, że zalety takie posiada drzewo. W wyższym wszakże znacznie stopniu posiada je żelazo kute, które przedstawia nadto inne jeszcze korzyści ze względu trwałości i łatwości przyczepiania.

Opór przeciw ściskaniu.

356. Zajmiemy się obecnie zbadaniem zdolności drzewa do opierania się siłom, wywierającym ściskanie podłużne, przyczem drzewo użyte być może jako filar lub też jako „podpora" jakiejkolwiek innej postaci, jak naprzykład pręt *B C* w żórawiu przedstawionym na fig. 17. Użytek drzewa jako podpory polega w znacznej mierze na wzajemnej spójności włókien, zarówno jak na własnej ich sztywności. Zachowanie się przeto drzewa przy oporze przeciw ściskającym je siłom jest bardzo odmienne od zachowania się jego przy oporze przeciw siłom rozciągającym. Wytrzymałość drzewa, poddanego pierwszemu z tych

warunków, zbadać możemy doświadczalnie, ciężary bowiem, których użyć tu trzeba, przypadają w granicach działalności wykładowego naszego przyrządu.

357. Przyrząd ten przedstawiony jest na fig. 50. Składa się on z drążka drugiego rodzaju, długiego na 10',

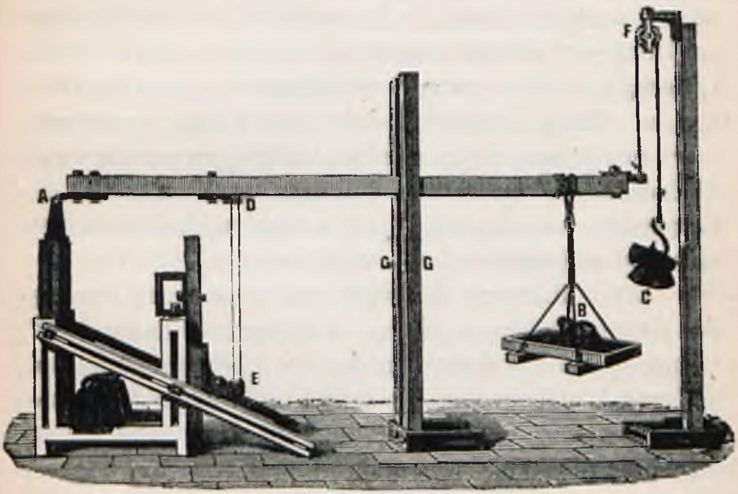

Fig. 50.

a przedstawiającego trzykrotny zysk mechaniczny; wytrzymałość słupa *DE* przeciw zgruchotaniu jestto opór, który tu ma być przezwyciężony, siłę zaś stanowią ciężary, nakładane na platformę *B*; każdy funt na platformie tej umieszczony wywiera siłę ugniatającą 3 f. na słup przy *D*. Punkt podpory jest przy *A*, a rama *G* chroni drążek od wyginania się bocznego. Drążek i platforma mogłyby nieco wikłać nasze obliczenia, gdyby nie były zrównoważone. W tym więc celu sznur przywiązany do końca drążka przechodzi przez blok *F* i na drugim swym końcu dźwiga ciężar *C*, dostateczny do zrównoważenia ciężaru całego przyrządu. W samej więc rzeczy, drążek i platforma bujają teraz swobodnie, jakby zgoła ciężaru nie posiadały, i możemy je z uwagi naszej usunąć. Słup *D E*, poddany doświadczeniom, osadzony jest dolnym końcem w otworze podpórki z żelaza lanego, która jest tak urządzona, że może służyć do prętów różnej długości; koniec górny słupa przechodzi przez otwór innej płyty z żelaza lanego, przyszrubowanej do drążka. W ten sposób słup nasz, czyli mały filar doświadczalny, utwierdzony jest w każdym końcu i uchroniony od niebezpieczeństwa wyślizgnięcia.

358. Pierwsze doświadczenie za pomocą przyrządu tego wykonamy z prętem sosnowym, o długości 40" i o przecięciu kwadratowem 0,5" × 0,5"; podpórka dolna jest tak umieszczona, by drążek miał położenie poziome, gdy właśnie dotyka szczytu pręta *D E*. Ciężary nałożone na platformę wywołują na pręt trzy razy większe ciśnienie, które najpierw pręt zgina, a następnie, gdy skrzywienie dojdzie już do pewnego stopnia, przełamuje go. Nakładam 28 f. na platformę; wydaje to ciśnienie 84 f. na pręt, pozostaje on wszakże zupełnie prostym, tak, że ciśnienie to znosi on łatwo. Gdy ciśnienie to wzrasta do 96 f., dostrzedz można bardzo słabe zgięcie, a gdy nacisk wynosi 114 f., pręt zaczyna się zginać w postać skrzywioną, chociaż odchylenie się środka pręta z położenia pierwotnego jest jeszcze mniejsze od 0,25". Przy dalszem wzmaganiu ciśnienia widzimy, że gdy do-

sięga ono 132 f., zboczenie wynosi 0,5", a wreszcie, gdy na platformie znajduje się 48 f., gdy zatem pręt poddany jest ciśnieniu 144 f., łamie się w środku. Z tego przekonywamy się, że pręt ten podtrzymuje ładunek 96 f. bez wyraźnego jeszcze skrzywienia, złamanie wszakże następuje, skoro ładunek staje się półtora prawie raza większym. Drugie doświadczenie z podobnym prętem dało wartość nieco mniejszą (132 f.) na ładunek łamiący. Jeżeli rezultaty te dodamy i sumę ich podzielimy przez 2, otrzymujemy 138 f. jako wartość średnią ładunku łamiącego, co stanowi rezultat dostatecznie dokładny.

359. Wypróbujmy teraz opór pręta krótszego o takiemże samem przecięciu. Umieszczam w przyrządzie pręt sosnowy, o długości 20" i o przecięciu kwadratowem 0,5" $\times$ 0,5", utwierdzając silnie każdy jego koniec, jak w przypadku poprzednim. Podpórka dolna osadzona jest tak, by drążek miał położenie poziome; przeciwwaga pozostaje oczywiście takąż samą, a ciężary, jak poprzednio, nakładają się na platformę. Zgięcia nie dostrzegamy zgoła, gdy pręt dźwiga 126 f.; skrzywienie bardzo słabe zauważyć się daje przy 186 f.; przy 228 f. skrzywienie jest takie, że środek pręta odchyla się na bok od pierwotnego swego położenia o 0,2" mniej więcej; a wreszcie, gdy nacisk dochodzi do 294 f., pręt się łamie. Złamanie zachodzi najpierw w środku, bezpośrednio wszakże po niem następują i inne załamania, w pobliżu końców, w których pręt jest utwierdzony.

360. Dla pręta zatem na 20" długiego ładunek łamiący jest przeszło dwa razy większy, aniżeli dla pręta długiego na 40", a mającego takież samo przecięcie; poznajemy stąd, że przy jednakiem przecięciu słupy krótkie

są wytrzymalsze aniżeli długie. Doświadczenia wykazały, że wytrzymałość słupa kwadratowego przeciw ugniataniu jest proporcyonalna do kwadratu z pola czyli z powierzchni jego przecięcia. Według tego pręt sosnowy, długi na 40" i o przecięciu 1 cala kwadratowego, mający przeto przecięcie cztery razy większe aniżeli pręt tejże samej długości, z którym prowadziliśmy doświadczenia, byłby szesnaście razy wytrzymalszy, przełamałby się tedy dopiero pod ładunkiem około 2300 f. Wytrzymałość pręta użytego jako „zawieszenie" zależy jedynie od jego przecięcia, gdy wytrzymałość pręta użytego jako „podpora" zawisła od jego długości, zarówno jak i od przecięcia.

Zachowanie się belki wyprężanej przez siłę poprzeczną.

361. Przechodzimy teraz do przedmiotu ważnego ze względów praktycznych, a mianowicie do wytrzymałości drzewa, gdy znosi naprężenie poprzeczne, to jest, gdy użyte jest jako belka. Działanie naprężenia poprzecznego zrozumieć możemy z fig. 51, przedstawiającej

Fig. 51.

małą belkę, naprężoną przez ładunek w środku jej zawieszony. Fig. 52 przedstawia dwie podpory, odległe

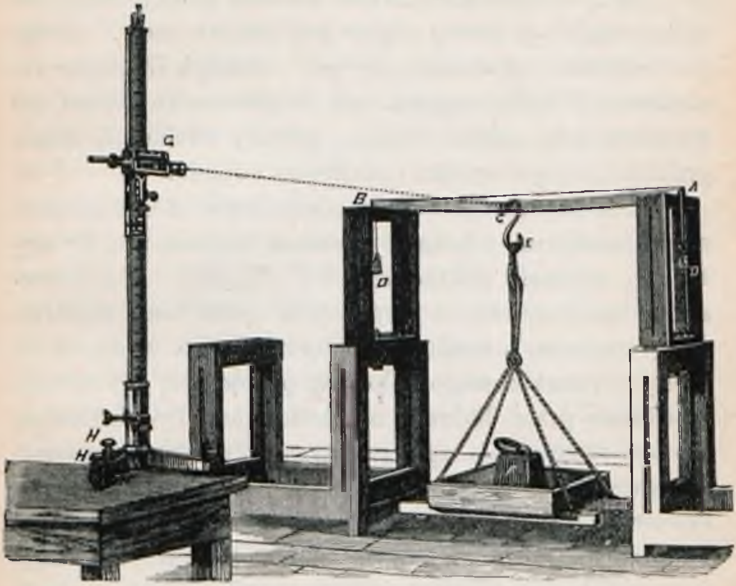

Fig. 52.

między sobą na 40", na których wsparty jest pręt sosnowy 48" × 1" × 1"; w środku pręta umieszczony jest hak, na którym się zawiesza platforma do nakładania ciężarów. O pręcie tak podpartym i dźwigającym ciężary mówimy, że jest poddany naprężeniu poprzecznemu. Krokiew dachu, deska podłogi, kładka od przystani do statku, niektóre formy mostów, i niezliczone inne przykłady dają nam wzory belek w ten sposób naprężonych. Ważnej tej rzeczy poświęcimy koniec wykładu obecnego i cały wykład następny.

362. Przedewszystkiem zwrócić należy uwagę na zgięcie belki, do której ciężar jest przywieszony. Belka jest najpierw poziomą; ale gdy wzmaga się ciężar na platformie, belka wygina się stopniowo ku dołowi, aż wreszcie, gdy ciężar dosięga pewnej wielkości, belka przełamuje się w środku i platforma odpada.

Dla dogodności w zestawianiu doświadczeń platforma z łańcuchami i hakami dobrana została tak, by ciężar jej wynosił dokładnie 14 f. (fig. 52). AB jestto sznur, utrzymywany w wyprężeniu przez mały ciężarek D; pozwala on w sposób przybliżony ocenić wygięcie się belki od początkowego położenia poziomego, gdy zostaje naprężoną przez ładunek na platformie. Do dokładnej zaś obserwacyi tego zgięcia używamy przyrządu, zwanego katetometrem (G). Składa się on z małej lunety, skierowanej zawsze poziomo, ale dającej się przesuwać w górę i na dół po pionowym słupie trójkątnym; na jednej ze ścian tego słupa wyryta jest podziałka, tak, że wysokość lunety w jakiemkolwiek położeniu może być ściśle oznaczona. Katetometr daje się zniwelować za pomocą szrub H, H, przez co słup trójkątny, po którym się luneta przesuwa, może być doprowadzony do kierunku dokładnie pionowego; linija kropkowana oznacza promień widzenia, gdy obserwator spogląda przez lunetę na środek C belki.

Wewnątrz lunety i w jej ognisku rozciągnięta jest poziomo nitka pajęczyny; na pręcie zaś badanym, w pobliżu środkowego jego punktu C, oznaczony jest krzyż z dwu cienkich linij. Po usunięciu platformy, belka staje się poziomą; luneta kątetometru jest tedy zwrócona ku belce, tak, że oznaczone na niej linije widziane być mogą wyraźnie. Za pomocą szruby luneta może być podnoszona lub obniżana, dopóki nitka pajęczyny znów nie zejdzie się dla obserwatora z obrazem punktu przecięcia się linij. Skala wskazuje zaś dokładnie, jak wysoko luneta znajduje się na słupie.

363. Podczas, gdy ja spoglądam przez lunetę, asystent mój zawiesza platformę na belce. Natychmiast dostrzegam, że krzyż obniża się w polu widzenia. Opuszczam lunetę, dopóki nitka pajęczyny znowu nie przejdzie przez obraz punktu przecięcia się linij, a wtedy, patrząc na skalę, widzę, że luneta przesuniętą została ku dołowi o 0,19", to jest prawie o piątą część cala, — o taką tedy odległość obniżyć się musiał krzyż na belce, a zatem i sam środek belki. Zresztą i prostszy nawet przyrząd byłby przydatny do zmierzenia zgięcia z pewnym stopniem ścisłości. Gdy nakładamy kolejno po 14 f. na platformę, skrzywienie belki staje się coraz znaczniejszem, aż wreszcie i bez lunety nawet widzimy, że odchyliła się od linii poziomej.

364. Z dokładnych obserwacyj za pomocą lunety i na podstawie pomiarów, dokonanych w sposób wyżej opisany, oznaczone zostały zgięcia, zestawione w tabeli XXIII. Podziałka na słupie pionowym odczytywaną była po nastawieniu nitki pajęczynowej za każdym przyrostem ciężaru na platformie. Odchylenie od położenia pierwotnego podane jest w tabeli, jako skrzywienie odpowiadające danemu ładunkowi.

TABELA XXIII. — SKRZYWIENIE BELKI.

Pręt sosnowy 48″ × 1″ × 1″, spoczywający swobodnie na podporach oddalonych między sobą na 40″, i obciążony w środku.

Numer doświadczenia	Wielkość obciążenia	Skrzywienie
1	14	0,19″
2	28	0,37″
3	42	0,55″
4	56	0,74″
5	70	0,94″
6	84	1,13″
7	98	1,35″
8	112	1,61″
9	126	1,95″
10	140	2,37″

365. Kolumna pierwsza wykazuje numer doświadczenia, druga podaje obciążenie, trzecia zaś zawiera odpowiednie skrzywienia. Widzimy, że aż do 98 f. skrzywienie wynosi około 0,2" na każde 14 f. dokładanego ciężaru, następnie zaś wzrasta prędzej. Gdy ciężar dochodzi do 140 f., skrzywienie wynosi najpierw 2,37"; stopniowo wszakże linije skrzyżowane obniżają się w polu lunety, co wskazuje, że belka już ustępuje i łamie się wreszcie. Doświadczenie to uczy nas, że skrzywienie powiększa się najpierw proporcyonalnie do ciężaru, jaki utrzymuje; skoro wszakże obciążenie dochodzi już do dwu trzecich ciężaru łamiącego, skrzywienie belki wzrasta prędzej.

366. Jest rzeczą najwyższej wagi oznaczenie najsilniejszego obciążenia, jakie belka utrzymać może bez szkody dla swej wytrzymałości. Rzecz tę zbadać należy, rozpatrując wpływ rozmaitych skrzywień na włókna belki. Belka jest zawsze skrzywioną, gdy jakikolwiek ładunek utrzymuje; spoglądając przez lunetę katetometru, wykryć mogę już przyrost skrzywienia, gdy jeden tylko funt nałożony jest na platformę. Następne doświadczenie wskaże nam, do jakiego stopnia można skrzywienie posunąć, nie sprowadzając jeszcze trwałego skutku szkodliwego.

367. Pręt sosnowy 48" $\times$ 1" $\times$ 1" podtrzymywany jest swobodnie na każdym końcu, gdy odległość między podporami wynosi 38", platforma zaś zawieszona jest na belce w jej środku. Na belce nadto oznaczone są dwie cienkie skrzyżowane linije, a luneta katetometru jest nastawiona tak, że nitka pajęczyny przechodzi dokładnie przez obraz punktu przecięcia się tych linij. Gdy na platformę nałożono 14 f., widzimy, że krzyż schodzi ku dołowi; po usunięciu wszakże ciężaru krzyż wraca dokładnie do pierwotnego swego położenia, wskazanego nitką pajęczynową. A zatem, po takim stopniu skrzywienia belka wraca oczywiście do początkowych swych warunków i jest tedy również dobrą, jak była poprzednio. Na platformę nałożono teraz 56 f.; belka uległa widocznie znacznemu skrzywieniu, ale gdy ciężar zostaje usunięty, krzyż wraca znowu, — w każdym razie, dopóki przesunięcie się krzyża nie przechodzi 0,01", wraca on do pierwotnego swego położenia. Przyjmować więc mo-

żemy, że belka w tym razie odzyskuje również początkowe swe warunki, chociaż poddana była naprężeniu, które, łącznie z platformą, dochodziło do 70 f. Ale gdy belka obciążona zostaje ładunkiem 84 f. przez pięć tylko sekund, krzyż po usunięciu ładunku z platformy nie wraca już zupełnie, ale wskazuje, że belka otrzymała teraz trwałe skrzywienie, wynoszące 0,03". Staje się to jeszcze widoczniejszem przy obciążeniu belki 98 funtami, po usunięciu bowiem ładunku środek belki pozostaje statecznie odchylonym o 0,13". Z tego zatem wnieść możemy, że włókna belki doznają już naprężenia przechodzącego moc ich oporności, co się potwierdza tem, że po nałożeniu dalszych jeszcze 28 f. na platformę, następuje załamanie.

368. Na podstawie powyższych doświadczeń wnieść możemy, że sprężystość belki nie ulega naruszeniu przez ciężar niedochodzący połowy ciężaru, któryby wystarczył do jej przełamania; bez niebezpieczeństwa zatem dźwigać ona może ciężar nieprzekraczający tej granicy. Ponieważ wszakże w doświadczeniach naszych ciężar przyczepiany był raz tylko, i to jedynie przez czas krótki, nie możemy być pewni, czyby bardziej długotrwałe lub częste stosowanie tegoż samego ładunku nie okazało się szkodliwem; aby więc i pod tym względem mieć bezpieczeństwo, przyjmujemy, że trzecia część ciężaru, wystarczającego do przełamania belki, jest największym ładunkiem, na jaki wystawioną być może w budowli. W niektórych przypadkach okazało się pożądanem nadawanie belce wytrzymałości znaczniejszej nad wskazany tu stosunek.

369. Rozważymy teraz zachowanie się włókien belki, poddanej naprężeniu przez siłę poprzeczną. Ponieważ przełamanie rozpoczyna się na dolnej powierzchni belki, jest rzeczą widoczną, że włókna tu pozostawać muszą w stanie rozciągnięcia, gdy włókna na wklęsłej, górnej powierzchni belki są między sobą ściśnięte. Że istotnie włókna w takich pozostają warunkach, można to potwierdzić następnem doświadczeniem.

370. Biorę dwa pręty sosnowe, każdy o wymiarach 48" × 1" × 1", doskonale podobne pod każdym względem, wycięte z tejże samej bryły drzewa, a stąd posiadające prawdopodobnie wytrzymałość prawie zupełnie jednaką. Każdy z tych prętów nacinam cienką piłą w punkcie środkowym do połowy grubości i jednę z tych belek umieszczam teraz na podporach, oddalonych między sobą o 14", zwracając ją stroną naciętą ku górze. Zawieszam na niej platformę, którą stopniowo obciążam, dopóki się belka nie przełamuje, co następuje, gdy ciężar całkowity wynosi 81 funtów.

Gdybym drugą belkę umieścił na tychże samych podporach nacięciem ku górze, nie możemy wątpić, że przełamałby ją takiż sam, lub przynajmniej nader bliski mu ciężar. Umieszczam ją wszakże, zwracając nacięcie ku dołowi. Zawieszam platformę, a widzimy, że belka łamie się pod obciążeniem 31 f. Jestto mniej aniżeli połowa ciężaru, jakiby był potrzebny, gdyby nacięcie zwrócone było ku górze.

371. Co jest przyczyną tej różnicy? Ponieważ włókna ściśnięte są na powierzchni górnej, nacięcie nie ma dążności do ich roztwierania; a gdyby nacięcie to mogło być dokonane piłą niewypowiedzianie cienką, tak, że usunęłaby nader drobną zaledwie ilość materyału, belka pozostałaby istotnie takąż samą, jak gdyby zgoła naruszoną nie była. Na dolnej powierzchni natomiast włókna są w stanie rozciągnięcia; gdy zatem nacięcie jest u dołu, roztwiera się ono znacznie, a belka doznaje silnego osłabienia. Nie jest ona w samej rzeczy wytrzymalszą od belki o wymiarach 48" × 0,5" × 1", umieszczonej tak, że najkrótsza jej krawędź skierowana jest poziomo. Jeżeli przypomnimy sobie, że cała belka tej samej wielkości wymaga do przełamania jej około 140 f. (ust. 365), widzimy, że wytrzymałość belki zmniejsza się do czwartej części, gdy jest naciętą do połowy grubości, a nacięcie to zwrócone jest ku dołowi.

372. Możemy stąd wyprowadzić wniosek praktyczny, że zdrowsza strona belki winna być zawsze umieszczana u dołu. Jakakolwiek szczelina na powierzchni dolnej może belkę poważnie osłabić, silniej więc sękowata powierzchnia drzewa winna niewątpliwie zwracaną być w górę. Gdyby część pewna substancyi belki rzeczywiście została usuniętą, — jak naprzykład, gdyby narznięto na niej karb, byłoby to prawie również niebezpiecznem na którejkolwiek stronie drzewa.

373. Warunki zachodzące na górnej powierzchni belki wykazać możemy dalszem doświadczeniem. Pręt sosnowy o wymiarach 48" × 1" × 1" nacinam w środ-

ku dwa razy do głębokości 0,5". Wcięcia te oddalone są między sobą o 0,5" i lekko ku sobie pochylone, a po usunięciu zawartej między niemi substancyi wsuwam klin tak wyrobiony, by ściśle w przestrzeni tej się mieścił, a nadto dosyć długi, by z jednej strony nieco wystawał. Gdy klin ten, po umieszczeniu belki na podporach, zwrócony będzie ku górze, belka pozostawać będzie w takichże samych warunkach, jak w przypadku, gdyby posiadała dwa cienkie nacięcia na górnej powierzchni. W samej też rzeczy, obciążając belkę platformą w sposób zwykły, widzimy, że dźwiga ona 70 f. bezpiecznie. Rozpatrując belkę, która się znacznie ku dołowi skrzywiła, przekonywam się, że klin jest bardzo ściśle trzymany ciśnieniem włókien górnych, ale gdy nagłem uderzeniem w koniec klina wyrzucam go na zewnątrz, ładunek 70 f. łamie natychmiast belkę. Przyczyna tego jest jasna, — po usunięciu klina cisnące naprężenie włókien górnych nie znajduje zgoła oporu i belka ustępuje.

374. Załamanie się belki pod działaniem naprężenia poprzecznego rozpoczyna się od rozerwania włókien na powierzchni dolnej, poczem następuje rozerwanie wszystkich włókien aż do znacznej głębokości. Widzimy tu, że pod działaniem siły poprzecznej włókna belki o wymiarach 48" × 1" × 1" przełamane zostały naciskiem 140 f. (ust. 365), poprzednio zaś poznaliśmy, (ust. 352), że do rozerwania pręta takiego przez ciągnięcie, wywierane wprost na jego końce, potrzebna była siła około dziesięciu tysięcy funtów. Opór, jaki włókna przedstawiać mogą załamaniu, być musi pewną wielkością określoną, widzimy wszakże, że do pokonania

go w jeden sposób potrzeba około dziesięciu tysięcy funtów, gdy przy drugim sposobie stosowania naprężenia wystarcza już 140 funtów.

375. Dla wyjaśnienia różnicy takiej odwołać się możemy do doświadczenia (ust. 28), w którem sznur rozerwany został przez poprzeczne pociągnięcie za pośrednictwem nitki, co nam posłużyło za dowód, że siła jedna rozłożoną być może na dwie inne, z których każda jest od niej znacznie większa. Podobnyż rozkład siły zachodzi i w skrzywieniu poprzecznem belki, — siła 140 f. zamienia się tu na dwie inne siły, z których każda jest od niej daleko większa i dostatecznie dzielna do rozerwania włókien. Nie potrzeba zresztą przypuszczać, że siła w ten sposób rozwinięta dochodzi wielkości 10000 f., taka bowiem siła byłaby konieczną do zgruchotania cała kwadratowego włókien współcześnie, gdy tymczasem przy załamaniu poprzecznem włókna rozrywają się kolejno warstwami; załamanie dokonywa się w tym razie stopniowo i nie zachodzi naraz w całej grubości belki.

376. Zakończymy wykład ten jedną jeszcze uwagą o warunkach, w jakich pozostaje belka poddana działaniu siły poprzecznej. Widzieliśmy, że włókna na powierzchni górnej są ściśnięte, na dolnej zaś rozciągnięte, ale co się dzieje z włóknami wewnętrznemi? Nie może ulegać wątpliwości, że rzeczy w tym razie mają się, jak następuje: Włókna przypadające bezpośrednio poniżej powierzchni górnej są też ściśnięte, ale w głębokości większej ciśnienie to coraz słabnie, tak, że wpośrodku

belki włókna pozostają w naturalnych swych warunkach; w miarę zbliżania się do powierzchni dolnej włókna zaczynają ulegać rozciągającemu je naprężeniu, a wielkość tego rozciągnięcia wzrasta stopniowo, dopóki nie dochodzi maximum swego na powierzchni dolnej.

WYKŁAD XII.

Wytrzymałość belki.

Belka swobodna na końcach, a obciążona w środku. — Belka jednostajnie obciążona. — Belka obciążona w środku, gdy końce jej są przytwierdzone. — Belka oparta na jednym, a obciążona na drugim końcu.

Belka swobodna na końcach, a obciążona w środku.

377. W wykładzie poprzedzającym rozpatrzyliśmy niektóre okoliczności ogólne, tyczące się zachowania się belki poddanej działaniu siły poprzecznej; obecnie zaś przystępujemy do bardziej szczegółowego badania wytrzymałości w tych warunkach. Podobnie, jak poprzednio, do doświadczeń naszych posługiwać się będziemy wyłącznie prętami z drzewa sosnowego, idzie nam bowiem raczej o wykazanie praw ogólnych, aniżeli o oznaczenie wytrzymałości różnych materyałów. Wytrzymałość belki zależy od jej długości, szerokości i grubości; należy nam przeto rozróżnić wpływ każdego z tych wymiarów na zdolność belki do utrzymywania swego ładunku.

Używać będziemy też jedynie belek o przecięciu prostokątnem, w takiej bowiem postaci powszechnie belki drewniane znajdują zastosowanie. Belki żelazne, gdy są wielkie, nie mają zwykle postaci prostokątnej, materyał ten bowiem może być korzystniej stosowany w przecięciach odmiennej postaci. Należy też rozróżniać *sztywność* belki, polegającą na zdolności opierania się zgięciu, i *wytrzymałość* belki, polegającą na zdolności opierania się złamaniu. Tak naprzykład, najsztywniejsza belka, jaką wyrobić można z pnia walcowego o 1' średnicy, jest na 6" szeroką i na 10,5" grubą, gdy belka najwytrzymalsza jest na 7" szeroką i na 9,75" grubą. Zająć się tu zamierzamy wytrzymałością (nie zaś sztywnością) belek.

378. Badania nasze rozpoczniemy od przeprowadzenia szeregu doświadczeń, które zestawimy w tabeli, a następnie postaramy się wykazać, czego się nauczyć można z jej rozpatrzenia. Mam tu dziesięć prętów sosnowych, których długość przypada w granicach od 1' do 4', i o trzech różnych przecięciach, a mianowicie 1" × 1", 1" × 0,5" i 0,5" × 0,5". Przygotowałem cztery różne rusztowania, na których pręty te przełamać można; w rusztowaniu pierwszem odległość między punktami podpory wynosi 40", w innych zaś rusztowaniach odległości te wynoszą kolejno 30", 20" i 10". Ponieważ zaś pręty posiadają długość 4', 3', 2' i 1', mogą być przeto dogodnie na podporach tych utrzymywane.

379. Załamanie prętów sprowadzamy w sposób następny: Złożywszy belkę na podporach, umieszczamy w środkowym jej punkcie hak zgięty w kształt głoski S, na tym zaś haku zawieszamy platformę. Następnie nakładamy ostrożnie na platformę ciężary, dopóki się belka

nie łamie; ładunki na platformie, wraz z ciężarem samejże platformy, zestawione są w tabeli, jako ciężar łamiący.

380. Aby się, o ile można, ustrzedz od błędu, przygotowałem drugi jeszcze zbiór dziesięciu prętów sosnowych, zupełnie z poprzedniemi zgodnych. Przełamiemy również i te pręty, a ilekroć dostrzeżemy jakąkolwiek różnicę między ciężarami łamiącemi przy dwu jednakich belkach, zaciągniemy do tabeli wartość średnią między temi ciężarami. Tak otrzymane rezultaty zebrane są w tabeli XXIV.

TABELA XXIV. — WYTRZYMAŁOŚĆ BELKI.

Pręty sosnowe (wycięte z tejże samej bryły), podparte swobodnie na każdym końcu; podana długość jestto odległość między punktami podpory; ciężar jest zawieszony w środku belki i powiększa się stopniowo, dopóki się belka nie łamie.

Wzór $P = 6080 \dfrac{\text{pole przecięcia} \times \text{grubość}}{\text{długość}}$.

Numer doświadczenia	Wymiary: Długość (Przęsło)	Szerokość	Grubość	Wartość średnia ciężaru łamiącego w funtach, otrzymana z obserwacyi.	P. Wartość obliczona ciężaru łamiącego w funtach	Różnica między wartością obliczoną a zaobserwowaną
1	40,0″	1,0″	1,0″	152	152	0,0
2	40,0″	0,5″	1,0″	77	76	— 1,0
3	40,0″	1,0″	0,5″	38	38	0,0
4	40,0″	0,5″	0,5″	19	19	0,0
5	30,0″	1,0″	0,5″	59	51	— 8,0
6	30,0″	0,5″	0,5″	25	25	0,0
7	20,0″	1,0″	0,5″	74	76	+ 2,0
8	20,0″	0,5″	0,5″	36	38	+ 2,0
9	10,0″	1,0″	0,5″	154	152	— 2,0
10	10,0″	0,5″	0,5″	68	76	+ 8,0

381. Liczby kolumny pierwszej ułatwiają odwoływanie się do danego doświadczenia. Trzy kolumny dalsze zajęte są przez wymiary belek. Przez przęsło rozumiemy tu odległość między punktami podpory, — długość rzeczywista jest oczywiście większa; grubość jestto wymiar belki, mający kierunek pionowy. Kolumna piąta podaje wartość średnią z dwu dostrzeżeń ciężaru łamiącego. Tak naprzykład, w doświadczeniu 5 każda z dwu belek użytych miała wymiary 36" × 1" × 0,5", a umieszczone były na punktach podpory odległych między sobą o 30", przytoczona tu przeto ich długość wynosi 30"; jedna z tych belek przełamaną została przez ładunek 58 f., druga przez ładunek 60 f., a średnia wartość dwu tych ciężarów, 59 f., podana jest jako średni ciężar łamiący. W ten sposób zestawioną została kolumna ciężarów łamiących. Znaczenie dwu ostatnich kolumn tabeli wyjaśnimy dalej.

382. Należy nam teraz z dostrzeżeń tych wydobyć prawa, tyczące się zależności między ciężarem łamiącym a przęsłem, szerokością i grubością belki.

383. Rozpatrzmy najpierw wpływ przęsła, to jest odstępu między podporami; w tym celu zestawiamy razem doświadczenia z belkami tegoż samego przecięcia, ale różnej długości. Przecięcia 0,5" × 0,5" odpowiednie będą do tego celu, a numery 4, 6, 8 i 10 obejmują właśnie doświadczenia z belkami takiego przecięcia. Porównajmy najpierw doświadczenia 4 i 8. Mamy tu dwie belki jednakiego przecięcia, przęsło zaś jednej (40") jest dwa razy większe aniżeli drugiej (20"). Rozpatrując ciężary łamiące, widzimy, że wynoszą one 19 f. i 36 f.; pierwsza

z tych liczb jest przeszło dwa razy większa od połowy liczby drugiej. W samej rzeczy, gdyby ciężar łamiący przy 40" był o $^3/_4$ f. mniejszy, 18,25 f., a przy 20" o $^1/_2$ f. większy, 36,5 f., pierwszy z tych ciężarów łamiących byłby zupełnie połową drugiego.

384. Dokładnej ścisłości liczebnej od doświadczeń tych wymagać nie należy; oczekiwać tu możemy jedynie rezultatów przybliżonych, prawa bowiem, których tu poszukujemy, są to w rzeczywistości jedynie prawa przybliżone. Drzewo samo jest zmienne pod względem swej jakości, choćby wycięte było z jednego i tegoż samego kloca, — części bliższe obwodu posiadają wytrzymałość inną, aniżeli części bliższe środka; młodych drzew drewno jest w ogólności słabsze aniżeli starych. Drobne różnice w układzie włókien, większa lub mniejsza dokładność wysuszenia, wszystko to są okoliczności, które nie dopuszczają zupełnej identyczności dwu odłamów drzewa. Przekonamy się wprawdzie, że w ogólności wpływ tych różnic jest słaby, zdarzać się wszakże mogą przypadki, że dzieje się inaczej, a przy doświadczeniach nad przełamywaniem drzewa napotykamy niekiedy niedogodności, które trudno jest brać pod rachunek.

385. Czyniąc wszakże uzasadnione ustępstwa ze względu na przytoczone trudności, przekonamy się, jak sądzę, że biorąc rzecz w ogólności, prawa przedstawiają doświadczenia bardzo dokładnie.

386. Możemy przeto przyjąć, że ciężar łamiący sztaby 40-calowej jest połową ciężaru łamiącego sztaby 20-calowej; a w takim razie nasuwa się pytanie, czy jestto w ogólności prawdą, czy w samej rzeczy ciężar łamią-

cy jest odwrotnie proporcyonalny do przęsła, to jest do długości, zawartej między podporami? By domysł ten sprawdzić, obliczyć możemy ciężar łamiący dla płyty o 30" (nr. 6) i rezultat otrzymany porównać z wartością zaobserwowaną; jeżeli przypuszczenie to jest prawdziwe, ciężar łamiący dany będzie z proporcyi:

$$30'' : 40'' = 19 : x.$$

Liczba szukana jest 25,3 f.; odnosząc się zaś do tabeli, znajdujemy tam 25 f., domysł nasz sprawdza się więc co do tej sztaby.

387. Sprawdźmy też toż samo prawo i co do sztaby 10", nr. 10:

$$10'' : 40'' = 19 : x.$$

Liczba szukana jest w tym razie 76, podczas, gdy wartość zaobserwowana wynosi 68, zatem o 8 f. mniej; nie zgadza się to bardzo dobrze z teoryą, ponieważ wszakże różnica, chociaż wynosząca 8 f., czyni tylko około 11 lub 12 odsetek całego ładunku, możemy przeto zatrzymać to prawo, niewątpliwie bowiem nie ma innego prawa, któreby również dobrze rezultat ten wyrażało.

388. Tabela ta posłuży nam nadto do innego jeszcze sprawdzenia. W doświadczeniu nr. 3 sztaba 40", o szerokości 1" i grubości 0,5", łamie się pod 38 funtami, w doświadczeniu zaś nr. 7 sztaba 20" tegoż samego przecięcia łamie się pod 74 f.; ostatnia ta liczba tak mało różni się od podwojonego ciężaru łamiącego sztaby 40", że również posłużyć nam może dodatkowo na dowód prawa, według którego *przy danem przecięciu ciężar łamiący zmienia się odwrotnie proporcyonalnie do przęsła.*

389. Zajmiemy się teraz badaniem wpływu *szerokości* belki na jej wytrzymałość. W tym celu porównywamy doświadczenia nr. 3 i 4; znajdujemy tam, że sztaba 40" × 1" × 0,5" przełamaną została przez obciążenie 38 f., gdy sztaba posiadająca połowę powyższej szerokości przełamaną została przez 19 f. Rezultat ten mogliśmy przewidzieć, widoczna bowiem, że sztaba nr. 3 posiadać musi takąż samą wytrzymałość, jak dwie sztaby, wymiarów takich jak sztaba nr. 4, umieszczone jedna obok drugiej.

390. Wniosek ten potwierdza się przez porównanie nr. 7 i 8, widzimy tam bowiem, że sztaba 20" wymaga do przełamania ładunku dwa razy większego, aniżeli sztaba, mająca połowę jej szerokości. Prawo to nie sprawdza się już tak dobrze przez nr. 5 i 6, połowa bowiem ciężaru łamiącego sztabę nr. 5, a mianowicie 29,5 f., wynosi więcej nad 25 f., co jest ciężarem łamiącym w doświadczeniu nr. 6; podobnaż uwaga tyczy się też nr. 9 i 10.

391. Dajmy, że mamy belkę o 40" długości między podporami, 2" szerokości i 0,5" grubości, a możemy łatwo pojąć że jest ona równoważną dwom sztabom podobnym do sztaby nr. 3, umieszczonym jedna obok drugiej; w ogólności zaś wnosimy, że wytrzymałość sztaby jest proporcyonalna do jej szerokości, albo mówiąc ściślej, *jeżeli dwie belki posiadają jednakie przęsło i jednaką grubość, stosunek ich ciężarów łamiących równa się stosunkowi ich szerokości.*

392. Rozbierzmy teraz wpływ grubości belki na jej wytrzymałość. Przy doświadczeniach z belką umiesz-

czoną na boku zachować należy ostrożność, któraby była zbyteczną, gdyby belka ta ułożoną była na płask. Jeżeli mianowicie belka umieszczona na boku jest jedynie tylko złożona na podporach, to, po zawieszeniu ciężaru, odwróciłaby się prawie niewątpliwie; aby więc wypadkowi takiemu zaradzić, potrzeba końce jej osadzać w wydrążeniach podpór. Zarazem wszakże końce nie powinny doznawać przeszkód w wyginaniu się ku górze, rozpatrujemy bowiem obecnie belkę swobodną na każdym końcu; przypadkiem zaś, gdy końce nie są swobodne, zajmiemy się następnie.

393. Porównywajmy najpierw między sobą doświadczenia nr. 2 i 3; mamy tu dwie sztaby jednakich wymiarów, przecięcie bowiem każdej jest 1,0" × 0,5", ale pierwsza z nich ulega przełamaniu bokiem, druga zaś na płask. Pierwsza z nich łamie się pod 17 f., druga pod 38 f.; jedna i taż sama przeto sztaba jest dwa razy wytrzymalszą przy ułożeniu na boku aniżeli przy ułożeniu na płask, gdy jeden wymiar jej przecięcia jest podwójny względem drugiego. Uogólniając to prawo, twierdzić możemy, że *wytrzymałość belki prostokątnej, przełamywanej bocznie, tak się ma do wytrzymałości belki, jednakiej długości i przecięcia, przełamywanej na płask, jak większy wymiar przecięcia ma się do mniejszego.*

394. Wytrzymałość belki 40" × 0,5" × 1" jest cztery razy większa aniżeli wytrzymałość belki 40"×0,5"×0,5", jakkolwiek ilość drzewa w jednej jest dwa razy tylko większa aniżeli w drugiej. W ogólności zaś twierdzić możemy, że gdyby belka rozdwojoną została cięciem podłużnem, wytrzymałość jej zmniejszyłaby

się do połowy, gdyby przecięcie było poziome, nie uległoby zaś zmianie, gdyby przecięcie było pionowe; tak, naprzykład, dwie belki doświadczenia nr. 4, umieszczone jedna na drugiej, przełamałyby się pod ciężarem około 40 f., gdy tymczasem, gdyby pręty te były w jednej sztuce, ciężar łamiący wynosiłby prawie 80 funtów.

395. Można to wykazać różnemi sposobami. Mam tu dwie belki o wymiarach 40" × 1" × 0,5", ułożone jedna na drugiej; tworzą one jednę belkę równoważną co do wielkości belce z nr. 1, poznajemy jednak, że łamie się ona pod obciążeniem 80 f., co okazuje, że dwie te belki są dwa razy tylko wytrzymalsze, aniżeli jedna.

396. Biorę dwie sztaby podobne, ale zamiast układać je luźno na sobie, łączę je ściśle szrubami czyli raczej przyciskami żelaznemi tego rodzaju, jakie przedstawia fig. 56. Przekonywamy się teraz, że sztaby tak razem ściśnięte wymagają 104 f. do przełamania. Przyrost ten wytrzymałości łatwo zrozumieć możemy. Skoro tylko, mianowicie, pręty zaczynają się zginać pod działaniem ciężaru, pozostające we wzajemnem zetknięciu ich powierzchnie poruszają się zwolna jedna po drugiej, by zastosować się do zmiany postaci. Gdy wszakże ściskamy je szrubami, przeszkadzamy ruchowi temu w znacznej mierze, belki zatem skrzywiają się słabiej i wymagają znaczniejszego ciężaru, któryby je przełamał; przypadek ten daje nam przybliżony obraz tego, co zachodzi, gdy oba te pręty tworzą jednę łączną całość, w którym to przypadku potrzebaby było 152 f., by przełamanie sprowadzić.

397. Przy pewnem zastanowieniu możemy też zrozumieć przyczynę, dla której belka jest wytrzymalszą przy ułożeniu na boku, aniżeli na płask. Dajmy, że probuję przełamać belkę, opierając ją o swe kolano i cisnąc jej oba końce rękoma, — skąd to pochodzi, że opiera się ona przełamaniu? Działa tu głównie oporność włókien na górnej powierzchni sztaby. Gdy sztaba ta złożona jest na boku, włókna znajdują się dalej od mego kolana, a stąd opierają się znaczniejszym momentem, aniżeli w razie, gdy belka złożona jest na płask. Zupełnie zaś tak samo mają się rzeczy w przypadku, gdy sztaba podparta jest na każdym końcu, ładunek zaś umieszczony we środku; wtedy bowiem oddziaływanie podpór odpowiada siłom, któremi naciskam końce sztaby.

398. Możemy teraz obliczyć wytrzymałość jakiejkolwiek prostokątnej belki sosnowej.

Dajmy, że belka ta ma 12' długości, 5" szerokości i 7" grubości. Jest ona pięć razy wytrzymalsza, aniżeli belka na 1" szeroka i na 7" gruba, możemy bowiem belkę pierwotną pojmować jako złożoną z pięciu tych ostatnich, umieszczonych jedna obok drugiej (ust. 391); belka na 1" szeroka i na 7" gruba jest 7 razy wytrzymalsza, aniżeli belka na 7" szeroka i na 1" gruba (ust. 393). Belka przeto pierwotna jest 35 razy wytrzymalsza, aniżeli belka na 7" szeroka i na 1" gruba; ale belka na 7" szeroka i na 1" gruba jest siedem razy wytrzymalsza, aniżeli belka o przecięciu 1" × 1", a zatem belka pierwotna jest 245 razy wytrzymalsza aniżeli belka o długości 12' czyli 144" i o przecięciu 1" × 1", a której wytrzymałość, według ust. 388, daje się obliczyć z proporcyi:

$$144'' : 40'' = 152 : x.$$

Ilość szukana czyni 42,2 f., dla pierwotnej przeto belki ciężar łamiący wynosi około 10300 funtów.

399. Pożytecznem być może wyprowadzenie ogólnego wyrażenia na ciężar łamiący dla belki mającej przęsło l'', szerokość b'', a grubość d'', podpartej swobodnie w końcach i obciążonej we środku.

Dajmy, że mamy belkę o przęśle l'', a o przecięciu $1'' \times 1''$. Ciężar jej łamiący otrzymamy z propreyi:

$$l : 40 = 152 : x,$$

co daje rezultat $\frac{6080}{l}$. Belka szeroka na d'', długa na l'', a na 1" gruba, byłaby również wytrzymałą, jak d belek o wymiarach $l'' \times 1'' \times 1''$, umieszczonych jedna obok drugiej, a których zbiorowa wytrzymałość byłaby:

$$\frac{6080}{l} \times d.$$

Gdyby belka taka, zamiast na płask, ułożoną była na boku, wytrzymałość jej wzrosłaby w stosunku takim, w jakim jej grubość pozostaje do szerokości, to jest, wzmogłaby się d-krotnie i wynosiłaby przeto:

$$\frac{6080}{l} \times d^2.$$

Otrzymaliśmy więc w taki sposób wytrzymałość belki na 1" szerokiej, na d'' grubej i mającej przęsło l''. Wytrzymałość b podobnych belek, umieszczonych jedna obok drugiej, byłaby także sama, jak wytrzymałość jednej belki o szerokości b'', grubości d'' i o przęśle l'', ostatecznie tedy otrzymujemy:

$$\frac{6080}{l} \times d^2 \times b.$$

Ponieważ iloczyn $b\,d$ daje nam pole przecięcia, wypowiedzieć przeto możeby rezultat ten twierdzeniem, że wyrażony w funtach ciężar łamiący prostokątnej belki sosnowej równa się:

$$6080 \times \frac{\text{pole przecięcia} \times \text{grubość}}{\text{przęsło}},$$

gdzie grubość i przęsło wyrażone są w calach miary linijnej, przecięcie zaś w calach kwadratowych.

400. Aby wzór ten potwierdzić, obliczyliśmy według niego ciężary łamiące dla wszystkich dziesięciu belek, przytoczonych w tabeli XXIV, a rezultaty podane są w kolumnie szóstej. Różnice między wielkością obliczoną a zaobserwowanym średnim ciężarem łamiącym zestawione są w kolumnie ostatniej.

401. Tak, naprzykład, w doświadczeniu nr. 7 przęsło jest 20'', szerokość 1'', a grubość 0,5''; wzór tedy, ponieważ przecięcie wynosi 0,5'', daje:

$$P = 6080 \times \frac{0{,}5 \times 0{,}5}{20} = 76.$$

Liczba ta przystępuje dostatecznie do 74 f., to jest do średniej z dwu wartości zaobserwowanych.

402. Z wyjątkiem doświadczeń nr. 5 i 10 różnice są bardzo drobne, a i w tych dwu nawet przypadkach różnice nie są dosyć wielkie, by powątpiewać było mo-

żna, żeśmy odkryli należyte wyrażenie ciężaru, wystarczającego w ogólności do sprowadzenia złamania belki.

403. Zwróciliśmy wyżej uwagę, że belka zaczyna doznawać trwałego uszkodzenia, gdy jest poddana ładunkowi większemu nad połowę ciężaru, któryby zdołał ją przełamać (ust. 368), a możemy nadto przyjąć, że w ogólności nie jest rzeczą roztropną, belkę, stanowiącą część budowli trwałej, obciążać ładunkiem większym nad ciężar, przechodzący o trzecią część, mniej więcej, ćwierć ciężaru łamiącego. Jeżeli przeto obliczyć mamy w funtach ciężar bezpieczny dla belki sosnowej, możemy go wyprowadzić ze wzoru:

$$1500 \times \frac{\text{pole przecięcia} \times \text{grubość}}{\text{przęsło}}.$$

Prawdopodobnie nawet mniejszy jeszcze spółczynnik, aniżeli 1500, używany jest przez ostrożnych budowniczych, zwłaszcza, gdy belka narażona jest na nagłe uderzenia i wstrząśnięcia. Spółczynnik nadto, otrzymany z małych i wybranych prętów, jakich używaliśmy, byłby większym aniżeli spółczynnik, wyprowadzony z belek wielkich, w których niedokładności są nieuniknione.

404. Gdybyśmy obrali inny rodzaj drzewa, otrzymalibyśmy wzór podobny na ciężar łamiący z odmiennym wszakże spółczynnikiem liczebnym. Tak naprzykład, gdyby belki wyrobione były z dębiny, liczbę 6080 należałoby zastąpić ilością większą.

Belka obciążona jednostajnie.

405. Rozważaliśmy dotąd jedynie przypadek, gdy ciężar zawieszony jest w środku belki. Przy rzeczywistem wszakże użyciu belek obciążenie nie wywiera się zwykle w taki sposób. Widzimy, jak w krokwiach, podpierających dach, na każdym calu całej ich długości ciąży oznaczony ładunek dachówek. Belki podpierające podłogę składów dźwigać muszą swe obciążenie stosownie do tego, jak towary są rozłożone; niekiedy, jak naprzykład w spichlerzach, ciśnienie rozkłada się dosyć jednostajnie wzdłuż belek, gdy w innych razach, jeżeli ciężary niejednostajnie rozproszone są po podłodze, zachodzi też odpowiednia niejednostajność w rozkladzie obciążenia belek. Będzie tedy rzeczą pożyteczną zbadanie wytrzymałości belki, gdy ładunek nie jest umieszczony w jej środku, ale inaczej rozłożony.

406. Użyjemy najpierw belki, o długości 40", szerokości 0,5" i grubości 1", a dla przełamania jej przyczepimy ładunek współcześnie w dwu punktach, co najdogodniej uczynić można za pomocą urządzenia, wskazanego na rysunku fig. 53. *A B* jest belka spoczywająca na dwu

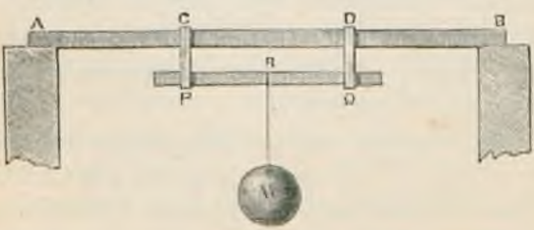

Fig. 53.

podporach, C i D zaś są to punkty, w których przęsło belki dzieli się na trzy równe części; z punktów tych schodzą klamry, dźwigające sztabę żelazną PQ, a w środku jej wreszcie zawieszony jest ciężar W. Ładunek przeto dzieli się tu w równej mierze między dwa punkty C i D, a belka AB obciążona jest w punktach dzielących ją na trzy równe części. Posługujemy się tu platformą i ciężarami, przedstawionemi na fig. 58 (str. 255).

407. Przystępujemy do przełamania belki. Nakładając ciężary na platformę, widzimy, że ustępuje ona pod ładunkiem 117 f. i pęka pomiędzy punktami C i D. Odwołując się do tabeli XXIV, znajdujemy, że podobna sztaba przełamaną została przez ciężar 77 f., zawieszony w środku; ale $^3/_2 \times 77 = 115,5$, twierdzić przeto możemy z dostatecznem przybliżeniem, że sztaba jest półtora raza wytrzymalszą w tym razie, gdy ciężar zawieszony jest w dwu punktach, dzielących ją na trzy równe części, aniżeli, gdy przyczepiony jest we środku. Jest też godna uwagi, że gdy belka w ten sposób jest obciążona, załamanie z jednakiem prawdopodobieństwem nastąpić może w którymkolwiek punkcie między C i D.

408. Belka obciążona jednostajnie wymaga do przełamania obciążenia dwa razy większego, aniżeli w tym razie, gdy ciężar przyczepiony jest jedynie we środku. Sposób jednostajnego obciążenia belki wskazany jest na fig. 54 (str. 247).

Doświadczenie rzeczywiście przeprowadzone z belką 40" $\times$ 0,5" $\times$ 1", umieszczoną na boku, okazało, że może ona utrzymać dziesięć ciężarów 14-funtowych, rozłożonych w sposób przedstawiony na rycinie; w każdym razie, dodatek jednego lub dwu takich ciężarów sprowadziłby niewątpliwie załamanie.

Fig. 54.

409. Z uwag tych wnosimy, że belki obciążone w sposób, jak pospolicie są używane, są daleko wytrzymalsze, aniżeli podają rezultaty doświadczeń tabeli XXIV.

Wpływ przytwierdzenia końcow belki na jej wytrzymałość.

410. Nadmieniliśmy już wyżej, że gdy ciężary zawieszone są na belce i belka zaczyna się wyginać, końce skrzywiają się na podporach ku górze. Wyginanie takie końców jest dla przykładu wskazane na fig. 54. Jeżeli tedy nie dozwolimy końcom belki wyginać się w ten sposób, powiększymy znacznie ich wytrzymałość. Możemy to osiągnąć, przytwierdzając je do podpór.

411. Poddajemy doświadczeniu belkę 40"×1"×1". Przytwierdzamy każdy z jej końców, a następnie przełamujemy ją, zawieszając ciężary we środku. Załamanie następuje pod obciążeniem 238 f., co jest półtora przeszło raza więcej aniżeli ciężar 152 f., podany w tabeli XXIV, jako dostateczny do przełamania takiej sztaby, gdy końce jej były swobodne. Rachunki uczą, że wytrzymałość

belki może być nawet podwojoną, jeżeli końce jej utrzymane są w położeniu poziomem metodami doskonalszemi, aniżeli w sposób tu przez nas użyty.

412. Gdy belka ustępuje w okolicznościach takich, załamanie zachodzi nietylko w środku, ale nadto każda z jej połów okazuje się również przełamaną w pobliżu punktów podpory; konieczność ta trzech załamań w miejsce jednego tłómaczy przyrost wytrzymałości, jaki zachodzi, gdy zmuszamy końce do zachowania kierunku poziomego.

413. W budowlach są w ogólności belki silniej lub słabiej przytwierdzone w każdym końcu, a tem samem bardziej są usposobione do stawiania oporu, aniżeli wskazuje tabela XXIV. Z zasad, opowiedzianych w ust. 408 i 411, wnieść dalej możemy, że belka przytwierdzona w każdym końcu i obciążona jednostajnie, wymagałaby do przełamania trzy lub czterykroć większego ładunku, aniżeli w razie, gdy końce jej są swobodne, a ciężar przyczepiony jest w środku.

Belki przytwierdzone w jednym, a obciążone w drugim końcu.

414. Belka, której jeden koniec osadzony jest w murze, lub inaczej przytwierdzony, może być niekiedy powołaną do podtrzymywania ciężaru, zawieszonego na jej końcu. Belkę taką przedstawia fig. 55 (str. 249).

W przypadku, który tu rozbieramy, $A\ B$ jest belką sosnową wymiarów 20" × 0,5" × 0,5", a widzimy, że gdy ciężar W dosięga 10 f., belka się łamie. W doświadczeniu nr. 8 tabeli XXIV podobna belka wymagała

36 f.; przekonywamy się więc, że belka poddana obciążeniu, jak na fig. 55, przełamuje się już pod działaniem ładunku, który jest mniej więcej czwartą częścią ciężaru, jakiby był potrzebny, gdyby belka podparta była na każdym końcu i obciążona w środku.

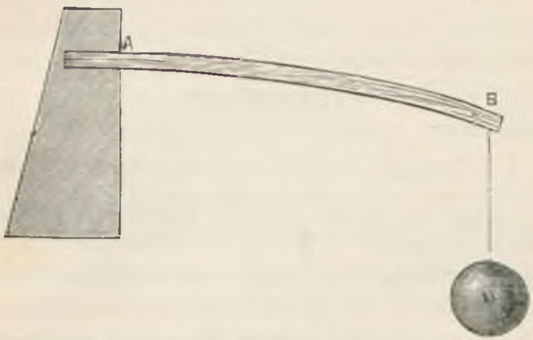

Fig. 55.

Będziemy teraz mieli sposobność zastosowania niektórych z rezultatów, jakie nam dały doświadczenia wykonane w obecnym wykładzie.

WYKŁAD XIII.

Zasady budowy mostów.

Wstęp. — Ciężar utrzymywany przez zawieszenie i podporę. — Most o dwu podporach. — Most o czterech podporach. — Most o dwu zawieszeniach. — Prosta forma mostu kratowego.

WSTĘP.

415. W wykładzie bieżącym i następnym przeprowadzimy doświadczenia nad kilku rodzajami konstrukcyi. Modele prostych robót ciesielskich wyrabiać będziemy z prętów sosnowych o przecięciu 0,5" × 0,5", które łączyć wzajemnie można za pomocą małych przycisków, mających około 3" długości, przedstawionych na fig. 56; ogólny zaś widok modeli tak przygotowanych dają nam fig. 58 i 62.

Fig. 56.

416. Doświadczenie następne wykaże nam, z jaką mocą przyciski te trzymają. Dwa pręty

sosnowe, każdy o wymiarach 12" × 0,5" × 0,5", zeszrubowane są nawzajem, tak, że stykają się między sobą na długości około 2", tworząc w ten sposób pręt na 22" długi. Złożony ten pręt pociągamy teraz ku górze za pomocą bloka złożonego, jak na fig. 49, zawiesiwszy na nim ładunek 224 f. Złączone te przeto pręty znieść mogą naprężenie 224 f., działające w ich kierunku. Skuteczność szrub takich polega głównie na tarciu, któremu też dopomaga niewątpliwie pewne ściśnięcie drzewa, sprowadzające powierzchnie do doskonałego zetknięcia.

417. Pręty sosnowe połączone przyciskami takiemi posiadają wytrzymałość dostateczną zupełnie do doświadczeń, które teraz opisać mamy. Modele w ten sposób zbudowane przedstawiają tę ważną korzyść, że z największą łatwością dają się składać, zmieniać i rozbierać.

Poznaliśmy, że wytrzymałość drzewa przeciw uciskaniu, a bardziej jeszcze wytrzymałość przeciw rozciąganiu, jest znacznie większa, aniżeli wytrzymałość jego poprzeczna. Zasada ta znajduje rozległe zastosowanie w sztukach konstrukcyjnych. Postaramy się tedy za pomocą właściwych kombinacyj zamienić siły poprzeczne na siły uciskające lub rozciągające, a stąd wzmódz wytrzymałość naszych konstrukcyj. Metody takiego postępowania objaśnimy prostemi wzorami robót ciesielskich

Ciężar utrzymywany przez zawieszenie i podporę.

418. Rozpoczynamy badania nasze od urządzenia bardzo prostego, przedstawionego na fig. 57.

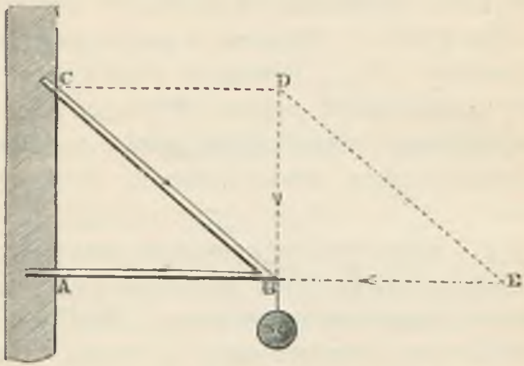

Fig. 57.

A B jestto pręt sosnowy o długości 20". Na rysunku, dla uproszczenia, przedstawiony on jest jako osadzony końcem w podporze; w rzeczywistości wszakże jest on do podpory tej przyszrubowany, a taż sama uwaga tyczy się i kilku innych rysunków, w wykładzie tym przytoczonych. Gdyby pręt *A B* oparty był li tylko w końcu swoim *A*, przełamałby się oczywiście, skorobyśmy w punkcie *B* zawiesili ciężar 10 f., jak to poznaliśmy w ust. 414.

419. Należy nam tedy rozpatrzyć, czyby siła poprzeczna, działająca na *A B*, nie dała się zamienić na siły rozciągające i uciskające. Za pomocą przycisków przyczepiamy pręt *B C* tak, że utrzymuje on pręt *A B*

w zawieszeniu; w takim razie pręt AB nie może się zgiąć ku dołowi pod działaniem ciężaru W, a to dlatego, że na tejże samej podstawie i po jednej jej stronie znajdowałyby się dwa trójkąty, mające boki pozostałe równe, co według zasad geometryi jest niemożebnem. Koniec przeto B pręta jest oparty, i przekonywamy się, że można na nim zawiesić bezpiecznie 112 f., wytrzymałość więc wzmogła się niezmiernie. W samej rzeczy siła poprzeczna zamieniła się tu na siłę uciskającą czyli ugniatającą w kierunku AB i na siłę rozciągającą w kierunku BC.

420. Wielkość sil tych obliczyć możemy. Nakreślmy równoległobok $CDEB$; jeżeli BD przedstawia ciężar W, można go rozłożyć na dwie siły, z których jedna, BC, jest siłą rozciągającą pręt BC, druga zaś, BE, jest siłą uciskającą pręt AB; ciężar przeto W jest na pręcie CB zawieszony, a na pręcie AB oparty. Siły są proporcyonalne do boków trójkąta ABC; w obecnym przypadku:

$$AB = 20'', \quad AC = 18'', \quad BC = 27'',$$

ponieważ zaś W czyni 112 f., rachunek przeto wykazuje, że siła działająca na pręt AB wynosi 124 f., a siła działająca na pręt CB 168 f. Pręt AB wymagałby około 300 f. do zgruchotania go, a CB około 2000 f. do rozerwania go na dwoje, zawieszenie przeto wraz z podporą łatwo dźwigać mogą 112 f. Gdyby wszakże ciężar W wzrósł do 270 f., siła działająca na AB stałaby się zbyt wielką i załamanie nastąpiłoby przez zgruchotanie podpory.

421. Jeżeli budowla obciążona jest tak dalece, że jedna z jej części jest bliską swego załamania, będzie rzeczą korzystną ze względów oszczędności, jeżeli wszystkie inne jej części będą tak dobrane, by jak najbliżej przystępowały do swego punktu załamania. W samej rzeczy, ponieważ budowla ta nie może być zgoła wytrzymalszą aniżeli część jej najsłabsza, dodatkowa przeto wytrzymałość, jaką posiadać mogą części pozostałe, nie powiększa bynajmniej wytrzymałości całej budowli i sprowadza jedynie stratę materyału. Budowla zatem nasza byłaby również wytrzymałą, a zaprojektowaną byłaby korzystniej, gdyby przecięcie pręta *B C* zredukowane było do jednej piątej, wtedy bowiem pręt ten, utrzymujący ciężar w zawieszeniu, złamałby się, gdyby wywarte nań wyprężenie doszło do 400 f. Gdy *W* wynosi 270 f., pręt *A B* ulega uciskowi 300 f., a pręt *B C* wyprężeniu 405 f., i podpora zatem i zawieszenie razem dosięgają łamiących je ciężarów. Zasada należytego ustosunkowania każdej części do obładowania, jakie ma ona dźwigać, stanowi najistotniejszą część pracy inżyniera. W największem z dzieł mechanicznych, w budowie potężnego mostu pod drogę żelazną, rzuconego nad pustą przestrzeń, baczenie na tę zasadę jest naczelnego znaczenia. Most taki dźwigać ma chwilowo ciężar przebiegającego pociągu, ale bezustannie podtrzymywać musi większy daleko ciężar składających go materyałów. Z tego więc względu każda część mostu winna być tak lekką, jak to tylko da się z bezpieczeństwem pogodzić.

Most o dwu podporach.

422. Rozbierzmy teraz budowlę mostu według typu wskazanego na fig. 58.

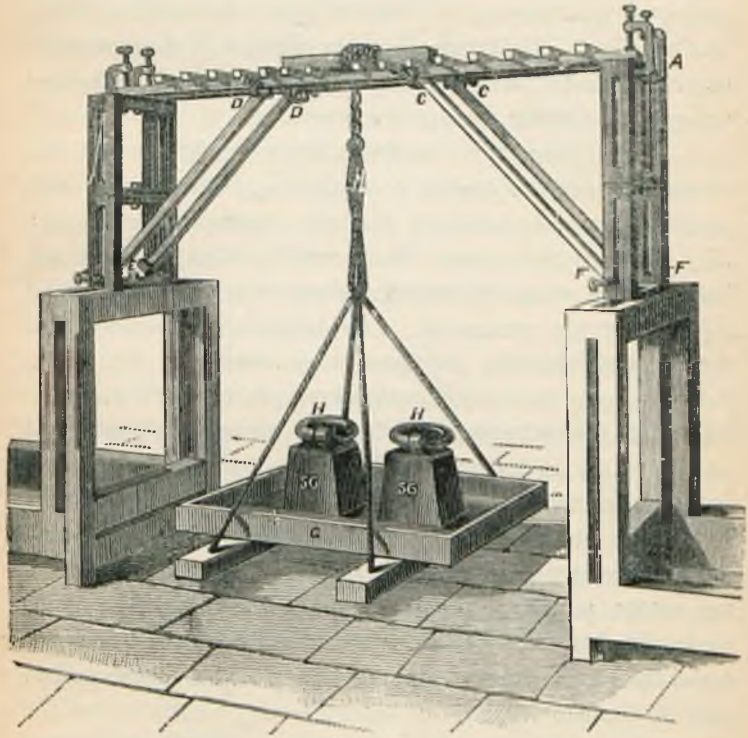

Fig. 58.

Model ten składa się z dwu belek, na 4' długich, umieszczonych równolegle względem siebie w odległości 3,5'' i podpartych w każdym końcu; są one silnie przytwierdzone do podpór, na nich zaś ułożoną jest droga z krótkich prętów. W punktach C i D, dzielących belki na trzy równe części, przytwierdzone są podpory $C\ F$ i $D\ E$, których dolne końce wspierają się na rusztowaniu; podpory te mają po 2' długości i po dwie podtrzymują każdą belkę. Platforma G przyczepiona jest za pośrednictwem łańcucha do mocnej płyty drewnianej, spoczywającej na drodze wpośrodku mostu.

423. Oznaczymy najpierw wytrzymałość mostu tego metodą doświadczalną, a następnie postaramy się wyjaśnić osiągnięte rezultaty zgodnie z zasadami mechaniki. Skrzywienie mostu obserwować możemy za pomocą katetometru, w sposób wyżej opisany (ust. 362). Metodą tą możemy się przekonać, czy obciążenie spowodowało trwałe zmniejszenie się sprężystości budowli (ust. 367). Rozpatrujemy skrzywienie najpierw, gdy ładunek rozdzielony jest jednostajnie, rozkładając ciężary, jak w przypadku fig. 62. Oznaczamy krzyż na jednej z belek i na znak ten nastawiamy lunetę katetometru. Umieszczamy na moście 11 ciężarów 14-funtowych, a katetometr wykazuje, że skrzywienie wynosi zaledwie 0,09", sprężystość zaś mostu pozostaje nienaruszoną, po usunięciu bowiem ciężarów krzyż na belce wraca do pierwotnego swego położenia; most przeto dobrze jest w stanie ciężar podobny dźwigać.

424. Usuwamy z mostu szereg ciężarów i zawieszamy platformę na pokładzie. Zajmuję swe miejsce przy katetometrze, podczas, gdy asystent mój nakłada ciężary $H\ H$ na platformę. Gdy ładunek wynosi 112 f., widzę, że skrzywienie dochodzi do 0,2"; pod 224 f.

skrzywienie powiększa się do 0,43", a most załamuje się wreszcie pod obciążeniem 238 funtów.

425. Postaramy się teraz obliczyć wytrzymałość dodatkową, jaką mostowi nadały podpory. Z tabeli XXIV widzimy, że pręt 40" $\times$ 0,5" $\times$ 0,5" łamie się pod obciążeniem 19 f.; belki zatem mostu przełamałyby się pod obciążeniem 38 f., gdyby końce ich były swobodne. Ponieważ, wszakże, końce belek przytwierdzone były ku dołowi, wnosimy, według ust. 411, że byłoby potrzebne obciążenie podwójne. Możemy tedy być pewni, że ciężar około 80 f. wystarczyłby do przełamania mostu. Wytrzymałość przeto jego, dzięki podporom, wzmogła się trzykrotnie, do sprowadzenia bowiem załamania trzeba było obciążenia 238 funtów.

426. Rezultat taki mogliśmy przewidzieć, punkty bowiem C i D, jako oparte na podporach, mogą być uważane za punkty prawie przytwierdzone; belka załamuje się między C i D, potrzebna przeto siła być musi dostateczną do przełamania belki opartej w punktach C i D, której końce są przytwierdzone. Ale CD jest jedną trzecią długości AB, poprzednio zaś widzieliśmy, że wytrzymałość belki jest odwrotnie proporcyonalną do jej długości (ust. 388); siła przeto konieczna do przełamania belki, gdy ta jest wspartą na podporach, jest trzy razy większa aniżeli do przełamania belki niepodpartej. W ten sposób wyjaśniliśmy wytrzymałość mostu.

427. Ponieważ do przełamania mostu konieczny jest ciężar 238 f., przyczepiony w pobliżu środka, wypływa przeto z zasady ust. 408, że należałoby na pokładzie rozmieścić jednostajnie dwa razy, mniej więcej, znaczniej-

szy ładunek, zanim most uległby zgruchotaniu; rozumiemy też teraz, dlaczego szereg 11 ciężarów 14-funtowych łatwo był przez most dźwigany, nie sprowadzając trwałego zmniejszenia sprężystości budowli. Jeżeli za spółczynnik bezpieczeństwa przyjmiemy 3, widzimy, że most rozważanej tu postaci dźwigać może, przy zwykłym rozkładzie obciążenia, ciężar daleko znaczniejszy aniżeli ładunek, któryby go zgruchotał, gdyby most ten nie był podtrzymywany przez podpory i końce miał swobodne.

428. Wytrzymałość mostu fig. 58 jest w niektórych punktach większa, aniżeli w innych. W punktach *C* i *D* znosić on może najwyższe obciążenie, najsłabsze zaś miejsca mostu przypadają w środkowych punktach odcinków *A C*, *D C* i *D B*. Ładunek przyczepiony za pośrednictwem platformy dźwigany był głównie przez środek odcinka *D C*, ze względu wszakże, że płyta utrzymująca łańcuch ma około 18" długości, obciążenie było w pewnej mierze rozłożone.

Nacisk na podpory nie tak łatwo daje się ściśle obliczyć. Nacisk w kierunku *C F*, naprzykład, jest mniejszy aniżeli w razie, gdyby część *C D* została usuniętą, a połowa ładunku zawieszoną była w *C*. Siła w tym ostatnim razie obliczoną być może według zasad wyżej wyłożonych (ust. 420).

Most o czterech podporach.

429. Też same zasady, jakich użyliśmy przy budowie mostu fig. 58, mogą być zastosowane w wię-

kszej rozciągłości, jak wskazuje rysunek szematyczny fig. 59.

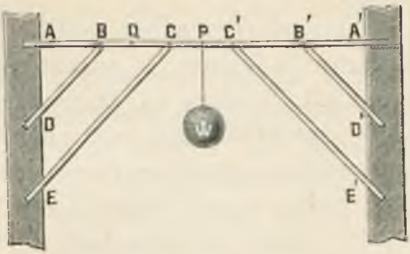

Fig. 59.

Mamy tu dwa pręty poziome 48" × 0,5" × 0,5", których każdy koniec wsparty jest na podporach; jeden z tych prętów wskazany jest na rycinie. Podzielony on jest na pięć równych części w punktach *B*, *C*, *C'*, *B'*. Podpieramy pręt w pięciu tych punktach za pomocą podpór, których drugie końce przytwierdzone są do rusztowania. Punkty *B*, *C*, *C'*, *B'* są utwierdzone, jako podtrzymywane przez podpory; ciężar zatem zawieszony w *P*, któryby przełamać mógł most, musi być dostatecznie wielki, by mógł przełamać odcinek *C C'*, przytwierdzony w końcach; do przełamania pręta *A B* potrzebaby było 38 f., przełamanie zatem odcinka *C C'* wymaga 190 f. Po drugiej stronie mostu znajduje się podobnież belka, do przełamania tedy mostu potrzebaby było 380 f., wtedy wszakże tylko, gdyby siła przyczepiona była dokładnie w środku części *C C'*; jeżeli zaś ciężary rozproszone są na znacznej długości, potrzebny jest ładunek znaczniejszy. W samej rzeczy, gdybym rozłożył ciężary jednostajnie na przestrzeni *C C'*, okazuje się z ust. 408, że do sprowadzenia załamania byłby potrzebny ładunek podwójny.

430. Przełamiemy teraz ten model. Umieszczam na nim 18 ciężarów 14-funtowych, rozkładając je jednostajnie, a katetometr świadczy mi, że most skrzywia się zaledwie o 0,1", sprężystość zaś jego nie ulega osłabieniu. Gdy wprowadzam platformę i most obciążam za jej pośrednictwem, widzę, że pod ciężarem 224 f. występuje skrzywienie 0,15"; pod ciężarem 448 f. skrzywienie dochodzi do 0,72". Wnosimy więc, że most zaczyna już ustępować i ulega wreszcie, gdy ładunek wzrasta do 500 funtów.

Most o dwu zawieszeniach.

431. Zachodzić mogą okoliczności, gdy nie można poniżej mostu otrzymać punktów dogodnych, w których dałyby się osadzić podpory. W takich razach, jeżeli napotkać można punkty właściwe do zawieszenia, zastosowany być może most w postaci, przedstawionej na fig. 60.

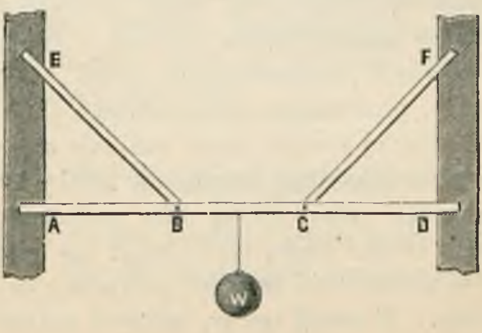

Fig. 60.

A D jestto poziomy pręt sosnowy, 40"×0,5"×0,5"; dzieli się on na trzy równe części w punktach *B* i *C*, od których idą pręty *B E* i *C F*, przytwierdzone do górnych części rusztowania. Pręt *A B* jest zatem utrzymywany w punktach *B* i *C*, które tedy uważać można za punkty przytwierdzone. Z powodów przeto wyżej wyłożonych wytrzymałość mostu powiększona jest prawie trzykrotnie. Pamiętając, że most posiada dwie belki, wiemy, że bez prętów, utrzymujących go w zawieszeniu, załamanie sprowadziłby ciężar około 70 f. lub 80 f., możemy tedy oczekiwać, że gdy belki utrzymywane są w zawieszeniu, potrzeba przeszło 200 f. Wykonywam to doświadczenie, a widzimy, że most ustępuje, gdy ładunek dochodzi 194 f.; jestto nieco mniej aniżeli dało nasze obliczenie,— pochodzi to, jak sądzę, stąd, że jedna ze szrub zsunęła się przed załamaniem.

Prosta forma połączeń belkowych.

432. Często jest rzeczą niedogodną, choćby nawet możebną, utrzymywać most metodami tu opisanemi. Pożądanem przeto będzie rozpatrzenie, czyby nie można obmyśleć sposobu wzmocnienia belki, nadając jej warunki, któreby były równoważne z powiększeniem jej grubości.

433. Opisać tu możemy jedynie kilka bardzo prostych metod, które umożebniają osiągnięcie tego celu. Wspaniałe tego przykłady przedstawiają nam wszystkie mosty dróg żelaznych, zupełne jednak zbadanie zawiłych tych budowli jest zadaniem niemałych trudności, których

rozbiór przekroczyłby zakres naszych wykładów. Zobaczymy wszakże, że odpowiednia kombinacya różnych części budowli nadać jej może opór dostateczny. Najbardziej zawiła krata z belek jest w ogólności tylko siecią zawieszeń i podpór.

434. Niech *A B* (fig. 61) przedstawia nam pręt sosnowy, 40" × 0,5" × 0,5", przytwierdzony w każdym

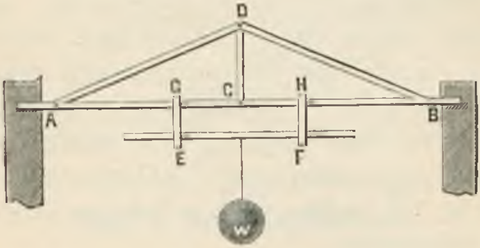

Fig. 61.

końcu. Przyjmiemy, że ciężar przyczepiony jest w dwu punktach, *G* i *H*, w sposób wskazany na rycinie. Ładunek, jaki most dźwigać ma, gdy po nim pociąg przechodzi, rozłożony jest na przestrzeni, wyrównywającej długości pociągu, ciężar zaś samego mostu jest rozmieszczony wzdłuż całego przęsła; ładunek przeto, jaki most dźwiga, jest w każdym czasie mniej lub więcej po nim rozłożony, nigdy zaś całkowicie nieskupiony w środku, w sposób, jak rozważaliśmy wyżej. W doświadczeniu obecnem przyczepimy ciężar łamiący w dwu punktach *G* i *H*, co stanowi odmianę sposobu poprzednio przez nas użytego. *E F* jestto sztaba żelazna, utrzymywana w klamrach *E G* i *F H*. Oznaczmy najpierw, jaki ciężar zdoła belkę przełamać. Zawieszając platformę na *E F*, widzimy, że do przełamania belki wystarcza 48 f.; ciężar ten okazałby się znacznie mniejszym, gdyby końce nie były ściśle przytwierdzone. Przyczepialiśmy już poprzednio ciężar tym sposobem w ust. 406.

435. Dostrzegamy, że belka, jak zwykle, skrzywia się, zanim się załamuje; gdybyśmy mogli uchronić ją od skrzywienia, moglibyśmy słusznie spodziewać się wzmożenia jej wytrzymałości. Jeżeli tedy podeprzemy środek belki *C*, uchronimy ją od skrzywienia. Uczynić to zaś można w sposób bardzo prosty. Przytwierdzamy mianowicie pręty *D A*, *D B*, *D C* do tej belki, a oczywista, że punkt *C* obniżać się nie może, dopóki połączenia przy *A*, *B*, *D*, *C* pozostają silnie spojone. Przekonywamy się też teraz, że nawet pod ciężarem 112 f. na platformie belka pozostaje nieprzełamaną. Urządzenie tego rodzaju używa się często w inżynieryi, albowiem, jak przyjmować można, dźwigać ono jest w stanie ładunek dwa razy przeszło większy, aniżeli belka niepodtrzymywana.

436. Dwa rusztowania tego rodzaju, z przeprowadzonym między niemi pokładem na drogę, utworzyłyby most, a również dobrze odpowiadałyby celowi swemu, gdyby odwrócone były ku dołowi, chociaż oczywiście w tym razie *D A* i *D B* działałyby jako zawieszenia, a *D C* jako podpora; opiszemy wszakże teraz lepsze urządzenie mostu.

Most na rzece Wye.

437. Most bardzo nauczający wzniesiony został przez inżyniera J. Brunela na rzece Wye, dla przeprowadzenia na nim drogi żelaznej. Istotne części mostu tego przedstawione są w modelu fig. 62, który, jak i poprze-

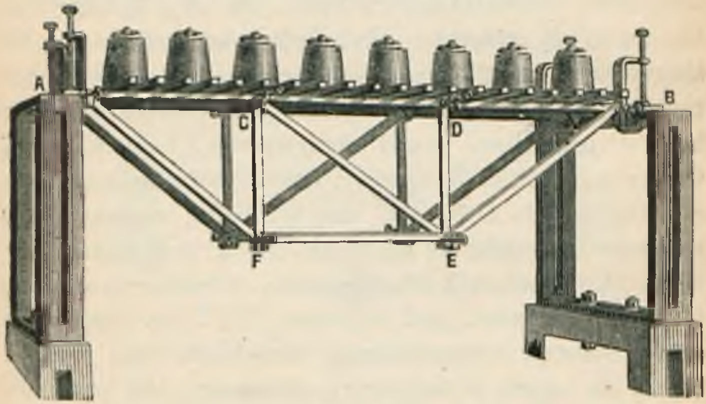

Fig. 62.

dnie, wykonany jest ze złączonych między sobą prętów sosnowych.

438. Model nasz składa się z dwu podobnych rusztowań, z których jedno opiszę. *A B* jestto pręt sosnowy, 48" × 0,5" × 0,5", podparty w każdym końcu. Pręt ten w punktach podziału swego na trzy równe części, *D*, *C*, podtrzymywany jest przez dwa słupy pionowe *D E* i *C F*, gdy punkty *E* i *F* utrzymywane są przez pręty *B E*, *F E* i *A F*; prostokątowi *D E F C* nadaje sztywność pręt *C E*; w rzeczywistej budowli należałoby do-

dać i pręt łączący D z F, w modelu jednak nie jest on wprowadzony.

439. Znaczenie przekątnej $C\,E$ zrozumieć możemy, spojrzawszy na fig. 63. Dajmy, że czworokąt $A\,B\,C\,D$ utworzony jest z czterech prętów drewnianych, połączonych zawiasami w wierzchołkach. Widoczna, że czworokąt ten może być przekształcony przez naciskanie wierzchołków A i C nawzajem ku sobie, albo przez ich rozsuwanie. Choćby nawet w wierzchołkach istniały połączenia ścisłe, byłoby prawie niemożebnem, uczynić czworokąt sztywnym przez wytrzymałość połączeń. Widzicie to na ramie, jaką trzymam w ręce; pręty przytwierdzone są nawzajem do siebie w wierzchołkach, ale jakkolwiek silnie przykręcam szruby, mogę najsłabszem ciśnieniem przekształcać figurę.

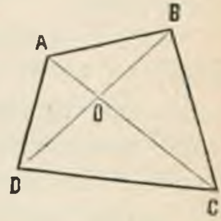

Fig. 63.

440. Winniśmy przeto zdobyć sposób nadania ramie sztywności. Mam tu trójkąt z trzech prętów, które zostały poprostu zeszrubowane przyciskami w wierzchołkach, — trójkąt ten zachowuje postać niezmienną; w samej rzeczy, ponieważ jest rzeczą niemożebną, wystawić dwa różne trójkąty z tych samych trzech boków, jest tedy widoczna, że trójkąt nie może być przekształconym. To prowadzi do zasady przewodniej w budowie mostów. Czworokąt nie jest sztywny, z tychże samych bowiem czterech boków wystawić można ilość niezliczoną różnych czworokątów. Jeżeli wszakże poprowadzę prze-

kątną *A C* czworokąta, zostaje on podzielony na dwa trójkąty, a stąd, jeżeli do czworokąta, który został zeszrubowany w wierzchołkach, przyczepimy pręt dodatkowy w kierunku jednej z przekątni, staje się on niezmiennym w postaci.

441. W czworokącie fig. 63 nakreślilismy dwie przekątnie, *A C* i *B D*; jedna byłaby wprawdzie teoretycznie dostateczną, pożądaną jest wszakże rzeczą mieć obie, a to dla następnego powodu. Jeżeli ciągnę punkty *A* i *C*, wyprężam przekątnię *A C* i uciskam *B D*. Jeżeli ugniatam zarazem punkty *A* i *C*, uciskam linię *A C* i rozciągam *B D*; w jednym zatem z tych przypadków działa *A C* jako zawieszenie, w drugim jako podpora. Wypływa stąd, że we wszystkich przypadkach jedna przekątnia działa jako zawieszenie, druga jako podpora. Jeżeli więc mamy jednę tylko przekątnię, powoływaną jest ona do spełniania naprzemian roli zawieszenia i podpory. To zaś nie jest rzeczą pożądaną, część bowiem budowli, która działać może wybornie jako zawieszenie, może być bardzo nieodpowiednią na podporę, i nawzajem. Jeżeli wszakże wtrącimy obie przekątnie, możemy obie uczynić zawieszeniami lub obie podporami, a układ pozostanie sztywnym. Tak, naprzykład, *A C* i *B D* mogą być cienkiemi prętami z żelaza kutego, które stanowią doskonałe zawieszenia, ale zgoła nieprzydatne są do działania jako podpory.

442. Cośmy powiedzieli o konieczności podziału figury czworokątnej na trójkąty, tyczy się bardziej jeszcze wielokąta o znacznej liczbie boków, a stąd wyprowa-

dzić możemy ogólną zasadę, że każda taka część budowli winna się składać z trójkątów.

443. Wracając do fig. 62, poznajemy teraz przyczynę, dla której do czworokąta *E D C F* wprowadzić należy jedne lub obie jego przekątnie. Ciężar umieszczony naprzykład w *D* dążyłby do obniżenia części *D E*, a stąd do przekształcenia prostokąta, ale po wprowadzeniu przekątni przekształcenie to jest niemożebne.

444. A zatem rusztowanie takie jest prawie również wytrzymałe, jak belka podparta w punktach *C* i *D*, a zatem, według zasad ust. 388, wytrzymałość jej jest trzy razy większa, aniżeli belki niepodpartej.

445. Oba rusztowania, umieszczone jedno obok drugiego i opatrzone w pokład stanowiący drogę, tworzą podziwu godny most, zupełnie niezależny od jakiejkolwiek podpory zewnętrznej, wyjąwszy tylko filarów, na których spoczywają końce rusztowań. Należałoby nadto połączyć oba rusztowania wiązadłami, co wszakże nie jest na figurze wskazane. Model przedstawiony jest jako dźwigający ładunek jednostajnie rozłożony, w różnicy do fig. 58, gdzie ciężar przyczepiony jest w jednym tylko punkcie.

446. Przy ośmiu ciężarach 14-funtowych rozłożonych wzdłuż niego, most fig. 62 nie okazuje zgoła wyraźnego skrzywienia.

WYKŁAD XIV.

Mechanika mostu.

Wstęp. — Belki żelazne. — Most rurowy. — Most wiszący.

WSTĘP.

447. Możnaby sądzić, że rozważane powyżej przez nas budowle nie są najbardziej rozpowszechnione, a mosty, które się zwykle przytaczają, jako pomniki biegłości inżynierskiej, są zupełnie odmiennej konstrukcyi. Każdy z nas zna arkady, a wielu z nas widziało mosty wiszące lub mosty rurowe. Winniśmy przeto zająć się niektóremi z tych budowli, co zamierzamy uczynić w wykładzie bieżącym. Możemy wszakże bardzo pobieżnie tylko rzucić okiem na obszerny ten przedmiot, któremu poświęcone są traktaty starannie opracowane.

Podamy najpierw treściwą wiadomość o zastosowaniu żelaza w sztukach konstrukcyjnych. Wyjaśnimy następnie w sposób prosty zasadę mostów rurowych, jako też i mostów wiszących. Formy bardziej zawiłe przechodzą zakres tych wykładów.

Belki żelazne.

448. Zajmowaliśmy się wyżej badaniem belek, podpartych w każdym końcu, a niekiedy i w punktach pośrednich, a przeznaczonych do dźwigania ciężarów; pręty, na których wykonywaliśmy doświadczenia, zestawione w tabeli XXIV, były to właściwie małe belki sosnowe. Zajmiemy się teraz zastosowaniem do budowli belek żelaznych; największe belki do mostów dróg żelaznych wyrabiają się ze sztab lub płyt żelaznych, ze sobą znitowanych.

449. Rozpatrzymy najpierw zastosowanie żelaza *lanego* do belek i poznamy, jaką postać należy im nadawać.

450. Belka z żelaza lanego, w przypuszczeniu, że przecięcie jej jest prostokątne, posiada wytrzymałość oznaczoną przez też same prawa, co i belka sosnowa. Tak więc, jeżeli dwie belki mają przecięcie jednakie, wytrzymałość ich jest odwrotnie proporcyonalna do ich długości, wytrzymałość zaś belki umieszczonej na boku tak się ma do wytrzymałości tejże belki, gdy jest ułożoną na płask, jak wymiar większy jej przecięcia do wymiaru mniejszego. Prawa te oznaczają wytrzymałość każdej belki prostokątnej z żelaza lanego, gdy znaną jest wytrzymałość jednej takiej belki; należy nam przeto przeprowadzić doświadczenie, by ocenić ciężar łamiący w danym przypadku szczególnym.

451. Biorę tu pręt z żelaza lanego, mający 2 stopy długości, a 0,5" × 0,5" w przecięciu. Podpieram belkę tę w każdym końcu, tak, że odległość między podporami wynosi 20", a następnie do jej środka przywiązuję platformę i ładuję ją ciężarami. Końce belki spoczywają swobodnie na podporach, wprowadziłem wszakże tę ostrożność, że każdy jej koniec przywiązałem kawałkiem drutu, tak, że nie mogą się zsuwać, gdy następuje załamanie. Ładując platformę, widzimy, że belka pęka pod ciężarem 280 funtów.

452. Porównajmy rezultat ten z nr. 8 tabeli XXIV. Znajdujemy tam, że pręt sosnowy, tejże samej wielkości co pręt ten z żelaza lanego, załamuje się pod 36 f.; stosunek 280 do 38 jest prawie 8, belka więc z żelaza lanego jest około 8 razy wytrzymalsza, aniżeli belka sosnowa jednakich z nią wymiarów. Rezultat ten jest nieco większy, aniżeliby wypadł z rozpatrywania tablic wytrzymałości wielkich sztab z żelaza lanego; pochodzić to może stąd, że drobna bryła żelaza lanego, jaką jest nasz pręt, wytrzymalszą jest stosunkowo, aniżeli bryła większa, żelazo bowiem lane nie jest tak jednorodne wskroś znacznej masy.

453. Trzymam tu sztabę żelaza lanego, na 12" długą i o przecięciu 1" × 1"; nie mam pod ręką ciężarów dostatecznych do jej przełamania, możemy wszakże obliczyć na podstawie poprzedniego doświadczenia, ileby do tego trzeba było.

454. Najpierw, na zasadzie prawa, że wytrzymałość jest odwrotnie proporcyonalną do długości, wnosimy, że belka na 12" długa i o przecięciu 0,5" × 0,5"

wymagałaby 20 × 280 : 12 = 467 f. Wiemy też, że belka 12" × 1" × 1" jest również wytrzymałą, jak dwie belki 12" × 1" × 0,5", gdy każda umieszczoną jest na boku; każda zaś z tych ostatnich belek jest dwa razy wytrzymalsza, aniżeli belka 12" × 1" × 0,5" umieszczona na płask, ponieważ wytrzymałość jej, gdy jest umieszczona na boku, tak się ma do wytrzymałości jej, gdy jest umieszczona na płask, jak grubość do szerokości, to jest, jak 2 : 1; istotna zatem nasza belka jest cztery razy wytrzymalsza, aniżeli belka 12" × 1" × 0,5" umieszczona na płask. Ostatnia ta wszakże belka jest dwa razy wytrzymalsza aniżeli belka 12" × 0,5" × 0,5", a stąd widzimy, że belka 12" × 1" × 1" być musi ośm razy wytrzymalsza aniżeli belka o wymiarach 12"×0,5"×0,5". Ponieważ zaś ostatnia ta belka wymaga do przełamania ciężaru 467 f., belka przeto 12" × 1" × 1" wymagałaby 467 × 8 = 3736 funtów, co czyni przeszło 4000 f. u nas używanych.

455. Dla techników pożytecznem być może niekiedy prawidło, że sztaba żelaza lanego, o jednej stopie długości i o jednym calu kwadratowym w przecięciu załamałaby się pod ciężarem około 2500 f. u nas używanych. Jeżeli żelazo jest tejże samej jakości, co żelazo użytego tu przez nas pręta, rezultat ten jest wprawdzie zbyt mały, błąd wszakże przypada po stronie bezpieczeństwa; wytrzymałość istotna byłaby w takim razie w ogólności nieco większa, aniżeli wytrzymałość wedle reguły tej obliczona. Cośmy mówili (ust. 403) pod względem bezpieczeństwa belek drewnianych, tyczy się również i żelaza lanego. Ładunek, jaki belka ma dźwigać

w zwykłych zastosowaniach, winien być drobnym tylko ułamkiem ciężaru, któryby mógł ją przełamać.

456. Przy wyrobie belek jest rzeczą pożądaną dla powodów bardzo ważnych, by tak mała ilość materyału, jak tylko można, była bezużytecznie wprowadzona. Przypomnimy tu tylko, że oprócz ładunku, jaki na niej ma być umieszczony, belka dźwigać musi i własny swój ciężar, a jeżeli belka jest masywna czyli pełna, własny jej ciężar jest poważnym nadmiarem. Z dwu belek, mogących dźwigać jednaki ładunek całkowity, lżejsza, nie mówiąc już o tem, że zużywa mniejszą ilość materyału, dźwigać może znaczniejszy ciężar na niej umieszczony. Dla dwu przeto względów pożądanem jest zmniejszanie ciężaru belek. Uwaga ta tyczy się zwłaszcza materyału takiego, jak żelazo lane, któremu odrazu nadawać można postać, w jakiej jest zdolny do przedstawiania największego oporu.

457. Zasady, które nas prowadzić mogą do oznaczania należytej formy, jaką nadawać wypada belkom z żelaza lanego, dają się wyprowadzić łatwo z tego, cośmy poznali w wykładzie XI i XII. Wiemy, że grubość bardzo jest pożądana, gdy idzie o belkę wytrzymałą. Jeżeli przeto usiłujemy osiągnąć znaczną grubość w lekkiej belce, belka ta być musi bardzo wązka; nadzwyczaj wszakże wązka belka nie byłaby bezpieczną. Przedewszystkiem byłaby giętką i ulegałaby łatwo przesunięciom bocznym; powtóre zaś, zachodzi trudność jeszcze bardziej nieunikniona. Widzieliśmy, że gdy belka drewniana podtrzymuje ciężar, włókna spodniej jej strony rozciągają się, okazują zatem dążność do rozrywania się (ust. 376);

włókna wierzchniej strony belki ulegają ściśnięciu, gdy środek belki pozostaje w stanie naturalnym. Warunki naprężenia w belce z żelaza lanego są zupełnie podobne; części dolne znajdują się w stanie wyprężenia, gdy górne są ściśnięte. Jeżeli przeto belka jest bardzo wązka, materyał niższej jej części być może niedostatecznym do opierania się siłom rozciągającym, i następuje załamanie. Aby tego uniknąć, wzmacniamy spód belki, umieszczając tam materyał dodatkowy. W taki sposób nasunął się nam pomysł cienkich belek, z nadmiarem żelaza u spodu.

458. *EF* (fig. 64) jest cienką belką żelazną, której spód zaopatrzony jest w mocną listwę *CD*. Załamanie nie może się rozpocząć u spodu belki, zanim listwa nie będzie na dwoje rozerwaną; dopóki więc to nie nastąpi, jest rzeczą jasną, że załamanie nie może się rozpocząć na górnej i cienkiej części belki *EF*.

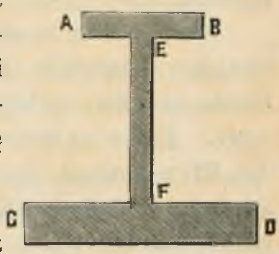

Fig. 64.

459. Belka wszakże, wzdłuż górnej swej strony jest w stanie ściśnięcia, zupełnie jak to ma miejsce w belkach drewnianych, które rozważaliśmy wyżej. Gdyby więc części górne nie były dosyć silne, by uciskowi temu oprzeć się mogły, zostałyby zgruchotane, a belka uległaby załamaniu. Środek przeciw temu źródłu słabości wprost się nastręcza, — szczyt belki otoczyć należy drugą listwą, jak to wskazuje *AB*. Jeżeli jest ona dosyć wytrzymałą, by oprzeć się ściśnięciu, stateczność belki jest zapewniona.

460. Listwa górna jest tu znacznie mniejsza, aniżeli dolna, co wykonano ze względu na własności żelaza lanego. Metal ten mianowicie daleko lepiej opierać się może siłom uciskającym, aniżeli siłom rozciągającym, tak, że na listwę górną użyć trzeba zaledwie szóstą część tej ilości żelaza, jakiej wymaga listwa dolna. Jeżeli przecięcie belki zostało w ten sposób ustosunkowane, belka jest zarówno wytrzymałą na szczycie i na spodzie; dodatek większej ilości materyału do jednej z tych listw, bez współczesnego wzmocnienia drugiej, nie wyjdzie na korzyść belki, ale raczej stanie się źródłem jej słabości, a to wskutek powiększenia się ciężaru, jaki ma utrzymywać.

461. Mam tu małą belkę, wyrobioną z materyału, zwanego pospolicie białą blachą, a który jest jedynie blachą żelazną, pokrytą na powierzchni cienką warstwą cyny. Belka ta ma w przecięciu postać wskazaną na fig. 64, a długość jej wynosi 12". Podpieram ją w każdym jej końcu, a widzicie, że dźwiga 224 f. bez dostrzegalnego skrzywienia.

Most rurowy.

462. Opis zasady tego mostu rozpocznę od wykonania kilku doświadczeń z rurą, którą trzymam w ręce. Jestto rura kwadratowa, o przecięciu 1" × 1", a długa na 38". Wyrobiona jest z białej blachy, a waży znacznie mniej niż funt.

463. Mam tu nadto pręt żelazny tejże samej długości, co powyższa rura, ale zawierający znacznie wię-

kszą ilość metalu. Łatwo to sprawdzić można, oznaczywszy ciężar rury i pręta na wadze. Uważając teraz pręt i rurę za belki, przeprowadzimy doświadczenia nad ich wytrzymałością, a poznamy, że rura, chociaż zawiera mniejszą ilość substancyi aniżeli pręt, jest od niego znacznie wytrzymalsza.

464. Umieszczam pręt na dwu podporach, oddalonych między sobą na 3', i przywiązuję platformę do środka pręta: ciężar 14 f. sprowadza skrzywienie 0,51", a ciężar 42 f. wygina go ku dołowi o 3,18". Jestto skrzywienie znaczne; gdy zaś ciężar usuwam, pręt wraca zaledwie o 1,78", co wskazuje, że pozostało trwałe skrzywienie 1, 40". Pręt więc doznał znacznego uszkodzenia i okazuje się na belkę nieprzydatnym.

465. Teraz umieszczam rurę na tychże samych podporach i postępuję z nią tymże samym sposobem. Obciążenie 56 f. sprowadza zaledwie skyzywienie 0,09", po usunięciu zaś tego ładunku rura wraca do pierwotnego swego położenia; przekonywamy się o tem za pomocą katetometru, krzyż bowiem oznaczony jest na rurze, a obraz jego sprowadzam na nitkę poziomą lunety przed nałożeniem ładunku 56 f. na platformę. Po usunięciu tego ładunku widzę, że krzyż wraca ściśle do miejsca, gdzie był poprzednio, dając tem dowód, że sprężystość rury ujmy nie doznała. Podwajamy obciążenie, kładąc 112 f. na platformę, a skrzywienie dochodzi tylko do 0,26", po usunięciu zaś tego ciężaru przekonywamy się, że rura skrzywiła się trwale o ilość, która z pewnością nie przechodzi 0,004"; to nas uczy, że rura dźwiga łatwo i bez uszkodzenia ładunek dwa razy przeszło większy

aniżeli ciężar, który pospolicie niszczy już pręt z żelaza kutego, zawierający więcej żelaza, aniżeli rura. Obciążamy rurę dalej jeszcze, nakładając dodatkowe ciężary na platformę, a pod 140 f. rura się załamuje; rozerwanie wystąpiło na połączeniu, gdzie rura była zlutowaną, a rzeczywista wytrzymałość rury na złamanie, gdyby była ciągłą, jest niewątpliwie daleko większa. I to wszakże wystarcza dostatecznie do zaświadczenia, jak znacznie wzmaga się wytrzymałość przy postaci rurowej.

466. Przyczynę uderzającego tego rezultatu wyjaśnić możemy za pomocą fig. 64. Gdyby część cienka belki *E F* podzieloną została na dwie części, umieszczone jedna obok drugiej, nie zmieniłoby to zgoła jej wytrzymałości. Jeżeli więc wyobrazimy sobie dalej, że listwa *A B* rozszerza się aż do wymiaru listwy *C D*, obie zaś części składające belkę *E F*, rozsunięte zostaną tak, że wraz z listwami utworzą rurę, belka w tak zmienionej postaci zachowa jeszcze swą wytrzymałość.

467. Rura o przecięciu prostokątnem przedstawia tę korzyść, że posiada znaczniejszą grubość, aniżeli pręt tegoż samego ciężaru; jeżeli zaś spód belki jest dosyć wytrzymały, by oprzeć się rozciąganiu, szczyt jej zaś dosyć wytrzymały, by oprzeć się ściśnięciu, belka będzie sztywną i wytrzymałą.

468. W sławnym moście rurowym na cieśninie Menai, posiadającym olbrzymią rurę, podpartą na każdym końcu mostu i obejmującą przęsło czterystu sześciu stóp, wprowadzono szczególne urządzenia, by wzmocnić wierzchnią stronę tej rury. Utworzona jest z przedzia-

łów, żelazo bowiem kute, w ten sposób rozłożone, jest szczególniej usposobione do opierania się ściśnięciu.

469. Mówiliśmy tu jedynie o rurach prostokątnych; zasady te wszakże tyczą się rur okrągłych lub rur o innem przecięciu, należycie bowiem zbudowane są wytrzymalsze, aniżeli jednaka ilość materyału, wyrobiona w postaci pręta pełnego.

470. Tęż samą zasadę napotykamy i w przyrodzie; kości i pióra są często wydrążone, a to dlatego, by łączyły lekkość z wytrzymałością; dla tegoż samego też powodu łodygi zbóż i innych roślin mają postać rurowatą.

Most wiszący.

471. Gdy idzie o wielkie przęsło, most wiszący przedstawia pewne zalety. Jest on lżejszy, aniżeli most belkowy o takiemże samem przęśle, a zatem tańszy, zarazem zaś osobliwa jego wytworność wyróżnia go korzystnie od budowli cięższych. Z drugiej natomiast strony, most wiszący nie jest tak przydatny do przebiegu pociągów dróg żelaznych, jak most z belek skratowanych.

472. Zasada mechaniczna mostu wiszącego jest prosta. Jeżeli sznur lub łańcuch uczepiony jest na dwu punktach, do których końce jego są przywiązane, zwiesza się on w postaci pewnej linii krzywej, zwanej przez matematyków *linią łańcuchową*. Postać linii łańcuchowej zmienia się wraz z długością łańcucha, niepodobna byłoby wszakże utrzymać go w kierunku linii prostej między obu punktami podpory, a to dla powodów wskazanych

w ust. 20. Jakkolwiek słaba działałaby siła na łańcuch, zawsze będzie on wklęsłym. Gdy łańcuch jest wyprężany, aż obniżenie środkowe stanie się drobnem w porównaniu z odległością między punktami podpory, linia krzywa, chociaż zawsze jest linią łańcuchową, okazuje znaczne bardzo podobieństwo do *paraboli*.

473. Fig. 65 (str. 279) przedstawia model mostu wiszącego. Dwa łańcuchy przytwierdzone są po każdej stronie do punktów E i F, następnie zaś przechodzą przez filary A i D, obejmując przęsło dziewięciu stóp. Linia pionowa w środku $B\,C$ wskazuje największy odstęp, o jaki łańcuch wygięty jest od linii poziomej $A\,D$. Gdy wygięcie środka łańcucha jest dziesiątą mniej więcej częścią odległości $A\,D$, krzywa $A\,C\,D$ uważaną być może do wszystkich celów praktycznych za parabolę. Pokład stanowiący drogę zawieszony jest na łańcuchach za pośrednictwem cienkich pręcików żelaznych, których długość tak jest uregulowana, by droga była, o ile można, poziomą.

474. Droga na modelu obciążona jest 8 ciężarami 14-funtowemi. Rozłożyliśmy je w sposób taki, by przedstawiały trwałe obciążenie, jakie dźwigać ma wielki most wiszący. Szereg ciężarów tak rozmieszczonych sprowadza istotnie tenże sam skutek, jak gdyby w samej rzeczy rozdzielony był jednostajnie po całej długości. W rzeczywistym moście wiszącym ciężar samego łańcucha powiększa znacznie jego naprężenie.

475. Przyjmujemy, że łańcuch zwiesza w postaci paraboli i że obciążenie rozłożone jest jenostajnie wzdłuż mostu. Naprężenie łańcucha jest największe w najwyż-

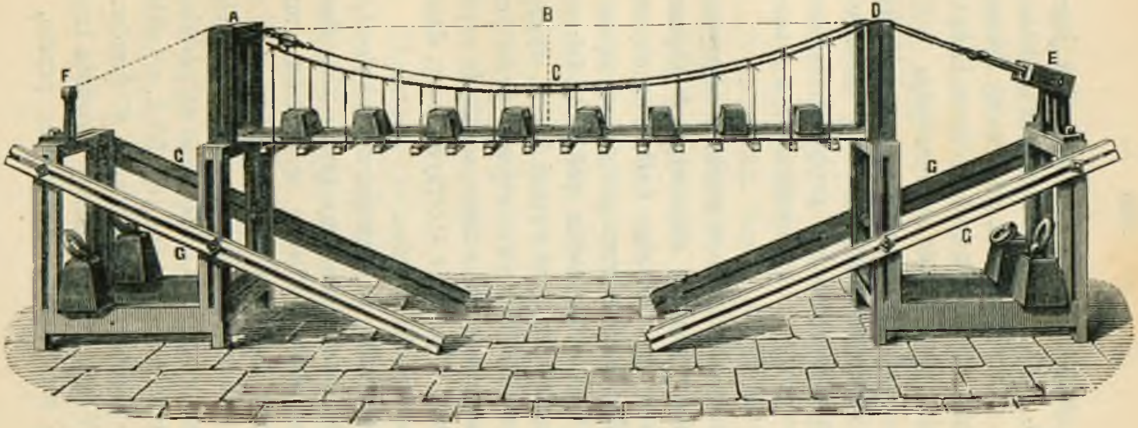

Fig. 65.

szych jego punktach, najmniejsze zaś w jego punktach najniższych, jakkolwiek różnica jest drobna. Wielkość naprężenia obliczyć można, gdy znamy obciążenie, przęsło i wygięcie. Przebiegu tych obliczeń badać tu nie możemy, wymienimy wszakże ich rezultaty.

476. Wielkość naprężenia w najniższym punkcie *C* każdego łańcucha otrzymuje się, mnożąc całkowity ciężar (włączając łańcuchy, pręty zwieszające i pokład) przez przęsło i dzieląc otrzymany iloczyn przez szesnaście razy wzięte wygięcie.

Naprężenie łańcucha w punkcie najwyższym *A* jest od naprężenia w punkcie najniższym *C* większe o ciężar, który otrzymujemy, mnożąc całkowity ciężar przez wygięcie i dzieląc iloczyn przez podwojone przęsło.

477. Całkowity ciężar pokładu, łańcuchów i ładunków w modelu naszym wynosi 120 f., wygięcie zawiera 10", przęsło 108"; iloczyn ciężaru przez przęsło daje 12960, szesnaście razy wzięte wygięcie czyni 160; naprężenie zatem w punkcie *C* otrzymujemy, dzieląc 12960 przez 160, co daje 81 funtów.

Aby otrzymać naprężenie w punkcie *A*, mnożymy 120 przez 10 i iloczyn dzielimy przez 216; iloraz wynosi blisko 6, a dodawszy liczbę tę do 81 f., mamy 87 f., jako naprężenie łańcucha w punkcie *A*.

478. Łańcuch jeden tego modelu przywiązany jest do wagi sprężynowej w *A*; odczytując na podziałce, widzimy, że naprężenie wskazane jest 90 f., co zbliża się dostatecznie do naprężenia obliczonego 87 funtów.

479. Wielki most wiszący posiada łańcuchy naprężoną siłą niezmierną. Konieczna przeto, by końce

łańcuchów tych były nader silnie przytwierdzone. Dobre przywiązanie otrzymujemy, przyczepiając łańcuch do wielkiej kotwicy żelaznej, osadzonej w mocnej skale.

480. W ust. 45 wskazaliśmy, jak obliczyć można wymiary liny, utrzymującej ciężar w zawieszeniu, gdy naprężenie jest znane. Podobne rozumowanie daje nam możność obliczenia wymiarów łańcucha, jaki jest potrzebny do mostu wiszącego, skoro oznaczonem jest naprężenie, jakiemu ma być poddany.

481. Przez próby łatwo ocenić możemy, jaki wpływ na naprężenie łańcucha wywieramy, umieszczając ciężar na moście, w dodatku do trwałego jego obciążenia. Otóż, ciężar 14-funtowy, nałożony na środek mostu, wzmaga naprężenie wagi sprężynowej do 100 f.; naprężenie drugiego łańcucha jest oczywiście takież samo, — poznajemy przeto, że ciężar 14 f. sprowadził dodatkowe naprężenie 10 f. na każdym z dwu łańcuchów. Przy ciężarze 28 f. w środku ogólne napięcie łańcucha wynosi 110 funtów.

482. Dodatkowe te ciężary odpowiadają ciężarom wozów, które most wiszący dźwigać winien. W wielkim moście wiszącym naprężenie powodowane przez przebiegające go ładunki jest zaledwie drobnym ułamkiem obciążenia statecznego.

WYKŁAD XV.

Bieg ciała spadającego.

Wstęp. — Pierwsze prawo ruchu. — Doświadczenie Galileusza na wieży Pizańskiej. — Droga jest proporcyonalna do kwadratu z czasu. — Ciało przebiega 5 m. w ciągu pierwszej sekundy. — Działanie ciężkości jest niezależne od ruchu ciała. — Jak się oznacza siła ciężkości. — Drogą pocisku jest parabola.

WSTĘP.

483. Cynetyka jest gałęzią mechaniki, która zajmuje się działaniem sił na wywoływanie ruchu. Wyda nam się ona znacznie trudniejsza, aniżeli rzeczy, któremi się dotąd zajmowaliśmy; trudności cynetyki pochodzą stąd, że do rachunków wchodzi tu nowy czynnik, *czas*. Zasady cynetyki nieznane były starożytnym. Galileusz wykrył niektóre z jej praw w wieku siedemnastym, a od tego czasu nauka ta szybko się rozwinęła. Ruch ciała spadającego został po raz pierwszy zrozumiany należycie przez Galileusza, od tej też rzeczy należy nam rozpocząć.

Pierwsze prawo ruchu.

484. Prędkość, w mowie zwykłej, mieści w sobie pojęcie szybkiego ruchu. Ścisłe znaczenie wyrazu tego w mechanice jest odmienne. Przez prędkość rozumiemy jedynie *miarę* ruchu ciała, czy to ruch ten jest szybki, czy też powolny. Miarę tę wyrażamy najdogodniej przez liczbę jednostek długości, stóp lub metrów, przebieżonych w ciągu sekundy. Według tego, jeżeli mówimy, że prędkość ciała wynosi 10 metrów, znaczy to, że gdyby ciało poruszało się dalej przez jednę sekundę z prędkością niezmienioną, przebiegłoby w ciągu tego czasu 10 metrów.

485. Pierwsze prawo ruchu wyrażone być może w sposób następujący: *Jeżeli żadna siła na ciało nie działa, w takim razie, jeżeli jest ono w spoczynku, pozostawać zawsze będzie w spoczynku; jeżeli zaś jest w ruchu, będzie dalej poruszać się zawsze z prędkością jednostajną.* Wiemy, że prawo to jest słuszne, a jednak nikt nie przekonał się nigdy o słuszności jego naocznie, a to dla tej prostej przyczyny, że niepodobna urzeczywistnić warunków, których ono wymaga. Nie możemy ciała umieścić w warunkach takich, by było usunięte z pod działania wszelkiej siły. Możemy wszakże przekonać się sami o słuszności tego prawa przy pomocy następnych rozważań. Jeżeli rzucimy kamień po drodze, zatrzymuje się on wkrótce. Ciało opuszcza rękę z pewną prędkością początkową i dalej już działaniu jej nie ulega. A zatem, jeżeli żadna inna siła na kamień nie działa, winniśmy oczekiwać, skoro to pierwsze prawo jest słuszne, że bę-

dzie on biegł zawsze dalej z prędkością pierwotną, jaką posiadał, opuszczając rękę naszą. Ale na kamień działają inne siły; przyciąganie ziemi ściąga go ku dołowi, a odkąd zaczyna podskakiwać i toczyć się po ziemi, występuje wpływ tarcia, które pozbawia kamień jego szybkości i do spoczynku go doprowadza. Pchnijmy wszakże kamień po gładkiej powierzchni lodu; odkąd zaczyna się ślizgać, siła ciężkości zrównoważona jest oddziaływaniem lodu, a na ciało nie działa żadna inna siła krom tarcia, które tu jest nieznaczne. Widzimy też, że kamień toczy się przez dłuższą drogę. Potrzeba zaś niewielkiego wysiłku wyobraźni, by przedstawić sobie równinę, której powierzchnia jest płaszczyzną nieograniczoną i doskonale gładką, przyjmując zarazem, że i kamień jest również doskonale gładki. W takim razie pierwsze prawo ruchu zyskałoby potwierdzenie, kamień bowiem nie zatrzymałby się nigdy.

486. Możemy też, w sali wykładowej, w pewnej przynajmniej mierze sprawdzić słuszność tego prawa za pomocą maszyny Atwooda fig. 66 (str. 285). Maszyna ta obmyśloną została w celu doświadczalnego badania praw ruchu. Składa się ona głównie z bloka *C*, osadzonego tak, że oś jego spoczywa na dwu parach kół, jak widzimy na rycinie; urządzenie to ma na celu umożebnienie jak najswobodniejszego obrotu koła. Dwa równe ciężary, *A* i *B*, przywiązane są do sznurka jedwabnego, przechodzącego przez blok; oba te ciężary równoważą się nawzajem, tak, że gdy są w ruchu, uważać możemy każdy z nich za ciało, na które żadna nie działa siła. Widzimy

też, że poruszają się jednostajnie, dopóki tylko wielkość przyrządu dozwala.

487. Jeżeli wyobrazimy sobie ciało swobodne w przestrzeni, jest rzeczą naturalniejszą przyjąć, że ciało takie, raz w ruch wprawione, biedz będzie zawsze jednostajnie, aniżeli, że prędkość jego uległaby zmianie. Istotnym d o w o d e m pierwszego prawa ruchu jest to, że wszystkie wnioski należycie z niego wyprowadzone, w połączeniu z zasadami innemi, sprawdzają się zupełnie. Astronomia przedstawia najlepsze tego przykłady. Obliczenie chwili zaćmienia oparte jest na prawach, które już w sobie pierwsze prawo ruchu mieszczą; a zatem, skoro niezmiennie widzimy, że zaćmienie na-

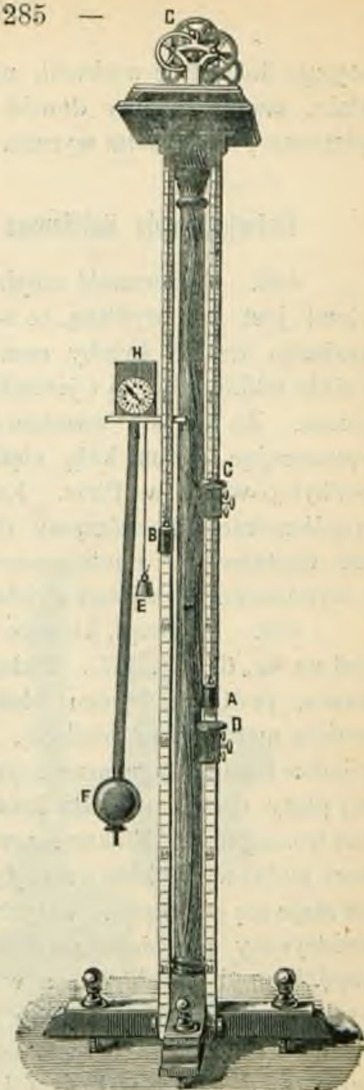

Fig. 66.

stępuje dokładnie w chwili, na którą zapowiedziane zostało, mamy świetny dowód doniosłej prawdy, jaką pierwsze prawo ruchu wyraża.

Doświadczenie Galileusza na wieży pizańskiej.

488. Sprzeczność między ciałami ciężkiemi a lekkiemi jest tak wybitną, że bez potwierdzenia doświadczalnego trudno byłoby nam uwierzyć, że ciało ciężkie i ciało lekkie spadają z jednakiej wysokości w jednakim czasie. Że tak się wszakże dzieje, wykazał Galileusz, opuszczając razem kulę ciężką i kulę lekką ze szczytu pochyłej wieży w Pizie. Kule te dobiegły do ziemi współcześnie. Powtórzymy doświadczenie to w rozmiarze dostatecznie zmniejszonym, by dało się pogodzić z wymiarami naszej sali wykładowej.

489. Przyrząd, którego używamy, przedstawiony jest na fig. 67 (str. 287). Składa się z mocnego rusztowania, podtrzymującego blok *H* w wysokości około sześciu metrów nad podłogą. Blok ten dźwiga sznur, a jeden koniec tego sznura przywiązany jest do trójkątnej płyty drewnianej, do której przytwierdzone są dwa elektromagnesy. Elektromagnes jestto pręt żelazny, postaci podkowy, dokoła owinięty długim drutem. Podkowa staje się magnesem natychmiast, skoro tylko prąd elektryczny przebiega po drucie; pozostaje magnesem, dopóki prąd przebiega, a w chwili przerwania prądu wraca do pierwotnego swego stanu. Gdy zatem mam możność dowolnego przepuszczania i przerywania prądu, mogę też dowolnie wzbudzać i usuwać magnetyzm pręta

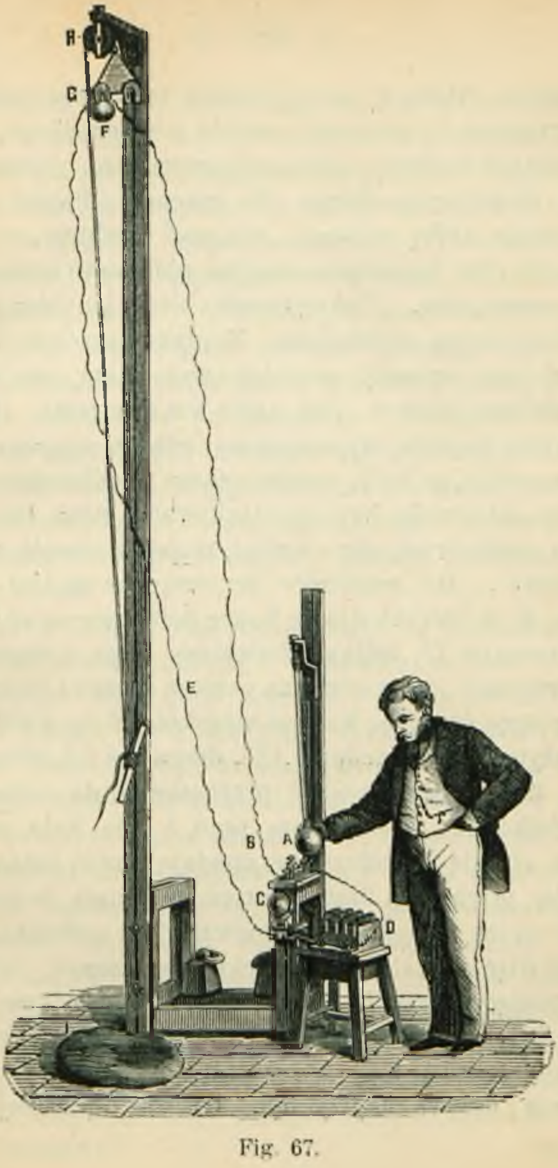

Fig. 67.

żelaznego; widzicie tedy, że kulka ta żelazna pozostaje przyczepioną do magnesu, dopóki prąd przebiega, odpada wszakże w chwili, gdy prąd przerywam. Tenże sam prąd elektryczny obiega oba magnesy; każdy z nich utrzymuje kulkę żelazną, gdy prąd przebiega, w chwili zaś, gdy prąd będzie przerwanym, obie kulki zostaną razem opuszczone. Elektryczność bieży po drucie z niewypowiedzianą szybkością. Mogłaby przebyć tysiące mil w ciągu sekundy; przeciąg zatem czasu, jaki łoży na przebieżenie drutów, jest zgoła bez znaczenia. Kartka cienkiego papieru, wprowadzona między magnesy a kulki, zapewnia, że kulki opadać zaczną współcześnie; gdybyśmy ostrożności tej nie zachowali, jedna lub druga kulka mogłaby się nieco wahać, zanimby zaczęła zbiegać ku dołowi. Do magnesów przyczepione są dwa długie druty, *E*, *B*, których drugie końce połączone są ze stosem elektrycznym *D*; trójkąt drewniany wraz z magnesami utrzymywany jest w górze za pomocą sznura i bloka, magnesy więc dźwigają kule na wysokości 6 m.; z kul przez nas użytych waży jedna 0,125, druga zaś 0,5 kilograma.

490. Jesteśmy teraz przygotowani do rozpoczęcia doświadczenia. Przerywam prąd, a obie kule oswobodzone zostają współcześnie; opadają razem, jedna obok drugiej, przez całą drogę, i razem dobiegają do podłogi, gdzie na ich przyjęcie przygotowana jest poduszka. Widzimy więc, że kula ciężka i lekka wymagają jednakiego przeciągu czasu, by opaść z jednakiej wysokości.

491. Obie te wszakże kule są z żelaza; porównajmy tedy ze sobą kule wyrobione z różnych substancyj, z żelaza i drzewa naprzykład. Gwóźdź o płaskiej głów-

ce wbity jest w kulę drewnianą, mającą około 10 centymetrów w średnicy; za pośrednictwem więc żelaznego tego gwoździa zawiesić mogę kulę na jednym z magnesów, gdy do drugiego przyczepiona jest jedna z dwu kul żelaznych, poprzednio przez nas użytych. Powtarzam doświadczenie w teże sam sposób, a widzimy, że kule również opadają razem. Wreszcie, gdy opuszczamy kulę żelazną i kulę korkową, ta ostatnia pozostaje o pięć lub sześć centymetrów po za ciężką swą towarzyszką, gdy ta ostatnia spadła już na poduszkę, — drobna ta różnica pochodzi stąd, że opór powietrza wywiera wpływ silniejszy na ciało lżejsze. Wątpliwości zaś nie ulega, że w próżni wszystkie ciała, jakiejkolwiekbądź wielkości lub z jakiegokolwiekbądź materyału, opadają ściśle w tymże samym czasie.

492. Jakżeż więc wytłómaczyć się daje ten objaw, że wszystkie ciała spadają w tymże samym czasie. Uważmy najpierw dwie kule żelazne. Weźmy dwie równe cząstki żelaza; rzecz oczywista, że opadają w jednakim czasie. Działoby się tak samo, gdyby były blisko jedna drugiej, choćby się nawet dotykały, albo choćby jednę bryłę tworzyły; a stąd wnosimy, że ciało złożone z dwu lub większej ilości cząstek żelaza wymaga do przebiegu takiegoż samego przeciągu czasu, jak i jedna cząstka (pomijając, oczywiście, wpływ oporu powietrza). Ztąd okazuje się zupełnie uzasadnionem, że dwie kule żalazne, chociaż wielkości nierównej, spadają w jednakim czasie.

493. Przypadek kuli żelaznej i kuli drewnianej wymaga głębszego zastanowienia, zanim pojmiemy dokładnie, czego nas uczy doświadczenie Galileusza. Na-

leży nam najpierw wyjaśnić znaczenie wyrazu *masa* w mechanice.

494. Błędnem jest określenie *masy* przez wprowadzenie pojęcia ciężaru, *masa* bowiem ciała jestto wielkość niezależna od istnienia ziemi, gdy ciężar jest następstwem jej przyciągania. Prawda, że ciężar jest dogodnym sposobem mierzenia *masy;* to wszakże wypływa stąd jedynie, że siła ciężkości, jak to doświadczenie stwierdza, działa na ciało proporcyonalnie do jego *masy.*

495. Obierzmy za jednostkę masy masę bryły platynowej, która waży 1 kilogram w Warszawie; jest wtedy rzeczą widoczną, że masa jakiejkolwiek innej bryły platyny dałaby się wyrazić liczbą kilogramów, jaką zawiera, ale jak oznaczać możemy masę jakiejkolwiek innej substancyi, jak, dajmy, żelaza? Mówimy, że bryła żelaza ma też samą masę co bryła platynowa, jeżeli jedna i taż sama siła, działając na jedno lub na drugie ciało przez tenże sam przeciąg czasu, wywołuje też samą szybkość. Jestto właściwe świadectwo równości mas. Masa jakiejkolwiek innej bryły żelaza wyrażona będzie przez liczbę wskazującą, ile razy zawiera ona w sobie bryłę, równą bryle, jaką porównaliśmy właśnie z platyną. Toż samo, oczywiście, tyczy się i innych substancyj.

496. Wielkość siły, działającej przez czas równy jedności, mierzy się iloczynem masy wprawionej w ruch przez prędkość, jaką masa ta nabyła. Prawda ta, podobnie jak pierwsze prawo ruchu, uzasadnia się dowodami pośredniemi.

497. Według zasad tych wyjaśnimy teraz doświadczenie wykazujące, że kula drewniana i kula żelazna spadają w tymże samym czasie. Siły działają na oba te ciała przez tenże sam przeciąg czasu, ale wielkość sił jest proporcyonalna do iloczynu z masy każdego ciała przez jego prędkość; ponieważ zaś ciała spadają współcześnie, prędkości ich są równe. Siły działające na ciało są przeto proporcyonalne do ich mas; siłą wszakże, jaka tu działa na każde ciało, jest przyciąganie ziemi, a zatem przyciąganie ziemi na różne ciała proporcyonalne jest do ich masy.

498. Możemy też tu zwrócić uwagę na sprzeczność, jaka zachodzi między przyciąganiem ziemi a przyciąganiem magnesu. Magnes przyciąga żelazo silnie, drzewa zaś zgoła nie przyciąga; ziemia pociąga ku sobie wszystkie ciała siłami, zależącemi od ich mas i od ich odległości, a nie od ich składu chemicznego.

Droga opisana przez ciało spadające jest proporcyonalna do kwadratu czasu.

499. Zamierzamy teraz wykryć prawo, według którego oznaczamy drogę, jaką ciało swobodnie spadające przebiega w danym czasie. Nad rzeczą tą doświadczeń bezpośrednich prowadzić niepodobna, w ciągu dwu bowiem sekund ciało przebiega już 20 metrów i zyskuje szybkość bardzo znaczną; możemy wszakże odwołać się do maszyny Atwooda (fig. 66), gdyż daje ona możność zwolnienia tego ruchu. Do celu tego potrzeba nam jeszcze zegara z wahadłem sekundowem.

500. Na jeden z dwu równych walców *A* nakładam mały pręcik miedziany, który walcowi temu nadaje przewagę, wskutek czego on opada. Trzymam obciążony walec w ręce i wypuszczam go współcześnie z uderzeniem wahadła sekundowego. Dostrzegam, że przebiega on 8 centymetrów, zanim nastąpi powtórne uderzenie wahadła. Przesuwam teraz walec do miejsca, od którego bieg swój rozpoczął, a wypuściwszy go znowu, widzę, że aż do następnego uderzenia wahadła przebiegł 32 cm. Podobnież poznajemy, że w ciągu trzech sekund opada o 72 cm. Doświadczenia te ułatwiają się znacznie przez wprowadzenie zastawki *D*, którą przesuwać można w górę i w dół podziałki przyrządu i przytwierdzać do niej w jakiemkolwiek położeniu. Jeżeli więc umieszczamy zastawkę tę w odległościach 8 cm., 32 cm. lub 72 cm. poniżej punktu, od którego walec bieg swój rozpoczyna, zgodność uderzenia wahadła z uderzeniem walca o zastawkę daje się bardzo wyraźnie uchwycić.

501. Trzy te odległości, 8, 32, 72, są między sobą w stosunku liczb 1, 4, 9, to jest, w stosunku kwadratów z liczby sekund 1, 2, 3. Wnosimy więc stąd, że *droga przebieżona przez ciało swobodnie spadające jest proporcyonalna do kwadratu z czasu.*

502. Bieg ciał w maszynie Atwooda jest znacznie powolniejszy, aniżeli bieg ciała spadającego w warunkach zwykłych; prawo wszakże tu podane zarówno jest słuszne w obu przypadkach, tak, że i przy spadku swobodnym w warunkach zwykłych droga przebieżona jest proporcyonalna do kwadratu z czasu. Maszyna Atwooda nie może nam bezpośrednio podać, jaką drogę przebiega

ciało swobodnie spadające w ciągu jednej sekundy. Jeżeli wszakże zdołamy ją oznaczyć innemi sposobami, będziemy już mogli łatwo obliczyć drogę, jaką ciało spadające przebiega w ciągu jakiejkolwiekbądź liczby sekund.

Ciało spadające przebiega 5 metrów w ciągu pierwszej sekundy.

503. Przyrząd, który nam posłużyć może do wykazania ważnej tej prawdy, przedstawiony jest na fig. 67. Część jego użytą już była poprzednio do wykonania doświadczenia Galileusza, teraz wszakże potrzebne nam będą dwie jeszcze inne części, które tu krótko opiszemy.

504. Przy *A* widzimy wahadło, które wykonywa jedno drgnięcie w ciągu sekundy; nie potrzeba go połączyć z urządzeniem zegarowem, któreby ruch ten podtrzymywało, skoro bowiem raz w ruch wprawione zostanie, powtórzy swe kołysania kilkaset razy. Gdy wahadło przypada w środku swego wachnięcia, ciężarek jego czyli soczewka dotyka sprężynki i naciska ją lekko ku dołowi. Prąd elektryczny, który krąży dokoła magnesów *G* (ust. 489), przechodzi przez tę sprężynę, gdy jest w normalnem swem położeniu; gdy wszakże naciśniętą jest ku dołowi przez wahadło, prąd zostaje przerwanym. Skutkiem tego zatem, gdy wahadło kołysze się w jednę i w drugą stronę, prąd przerywa się raz w ciągu każdej sekundy. W obieg prądu wtrącony jest nadto dzwonek sygnałowy *C*, tak urządzony, że gdy prąd przebiega, młotek jest od dzwonka usunięty, gdy zaś prąd ustaje, sprężyna zmusza go do uderzenia o dzwonek. Po zamknięciu

prądu, młotek znowu się usuwa. Wahadło i dzwonek wtrącone są w tenże sam obieg prądu, każde przeto drgnięcie wahadła wywołuje dźwięk dzwonka; dźwięki te zatem uważać możemy jako uderzenia wahadła, dające się słyszeć w całej sali.

505. Zrozumiemy teraz sposób tego doświadczenia. Odchylam wahadło na bok, tak, że prąd przebiega bez przerwy. Przyczepiamy kulę żelazną do jednego z elektromagnesów i podnosimy go zwolna w górę, dopóki kula nie zostanie przesuniętą do wysokości 5 metrów nad podłogę, gdzie umieszczamy poduszkę, mającą przyjąć ciało spadające. Zwróćmyż teraz uważnie wzrok na poduszkę, bacząc zarazem na uderzenia dzwonka. Skoro wszystko jest już tak przygotowane, wypuszczam wahadło, które dotąd trzymałem w słabem odchyleniu. W chwili, gdy wahadło wykonało połowę swego drgnięcia, dotyka sprężyny, wywołuje brzmienie dzwonka i przerywa prąd, który krąży dokoła magnesu; kula więc w tej chwili nie jest już przez magnes utrzymywana i opada tedy na poduszkę. Ale właśnie w chwili, gdy na nią przybywa, wahadło przerywa po raz drugi prąd elektryczny i dostrzegamy, że spadek kuli na poduszkę schodzi się z drugiem uderzeniem dzwonka. Ponieważ zaś uderzenia te powtarzają się w odstępach czasu sekundowych, wypływa stąd, że kula przebiegła 5 m. w ciągu sekundy. Gdyby magnes podniesiony był o metr wyżej, kula dobiegłaby do poduszki później, aniżeliby zabrzmiał głos dzwonka. Gdyby magnes był o metr obniżony, kula opadłaby na poduszkę, zanimby jeszcze dzwonek zabrzmiał.

506. Dowiedzieliśmy się poprzednio, że droga jest proporcyonalna do kwadratów z czasu; teraz widzimy, że gdy czas wynosi sekundę, droga ta czyni 5 metrów. Gdyby zatem czas spadku wynosił dwie sekundy, droga byłaby $4 \times 5 = 20$ metrów; a w ogólności droga przez ciało przebieżona, wyrażona w metrach, równa się iloczynowi z 5 przez kwadrat z czasu, wyrażony w sekundach. Nadmienić należy, że droga przebieżona przez ciało swobodnie spadające w ciągu pierwszej sekundy spadku jest nieco mniejsza nad 5 m., dokładne bowiem badania wykazały, że wynosi ona istotnie 4,9 metra; dla udogodnienia jedynie obliczeń przyjmujemy liczbę przybliżoną 5 metrów.

507. Przy pomocy tej reguły ocenić możemy wysokość pionowej skały lub głębokość studni. Do celu tego dogodnie służy zegar, dający się w każdej chwili zatrzymywać, daje bowiem możność dokładnego mierzenia krótkich czasów; i zwykły wszakże zegarek służyć może dosyć dobrze, po pewnej bowiem wprawie łatwo jest liczyć jego uderzenia, których idzie zwykle pięć na sekundę. Licząc więc ilość uderzeń od chwili, gdy kamień został wypuszczony, dopóki nie zobaczymy lub nie usłyszymy przybycia jego na dno, oznaczamy przeciąg czasu, przez jaki spadek miał miejsce. Kwadrat z liczby sekund (z uwzględnieniem i części ułamkowych) po pomnożeniu przez 5 daje głębokość studni lub wysokość skały w metrach, w przypuszczeniu wszakże, że wysokość ta nie jest zbyt znaczna.

Działanie ciężkości jest niezależne od ruchu ciała.

508. Dowiedzieliśmy się poprzednio, że wpływ ciężkości nie zależy od chemicznego składu ciała; poznamy teraz, że na działanie jej nie ma też zgoła wpływu ruch, jaki ciało posiadać może. Ciężkość pociąga ciało ku dołowi o 5 m. na sekundę, gdy ciało to przechodzi w ruch ze stanu spoczynku. Dajmy jednak, że kamień rzucony został w górę z szybkością 8 m., gdzie się znajdował w końcu sekundy? Gdyby ciężkość na kamień ten nie działała, przypadałby na wysokości 8 m. Zasada, którą tu przytoczyliśmy, twierdzi, że ciężkość posunie kamień ku ziemi o długość 5 m., zupełnie tak samo, jakby się działo, gdyby kamień wyprowadzony był ze stanu spoczynku. Skoro przeto kamień wznosi się o 8 m. wskutek własnej swej szybkości, opada zaś ku dołowi o 5 m. pod działaniem ciężkości, znajdować się przeto będzie w końcu sekundy na wysokości 3 metrów. Gdyby ciało to nie było rzucone pionowo w górę, ale ciśnięte w jakimkolwiek innym kierunku, rezultat byłby takiż sam, ciężkość sprowadziłaby ciało w końcu pierwszej sekundy o 5 m. bliżej ziemi od miejsca, w któremby się znajdowało, gdyby ciężkość nie działała. Tak, naprzykład, jeżeli ciało rzucone zostało pionowo ku dołowi z prędkością 8 m., przebiegłoby w ciągu jednej sekundy drogę 13 metrów.

509. Ważną tę własność wykażemy doświadczeniem. Metoda naszego postępowania będzie następująca: Dajmy, że biorę dwa ciała *A* i *B*. Jeżeli je trzymam w jednakiej wysokości i razem wypuszczam, dobiegną

oczywiście do podłogi w tej samej chwili; i w tym wszakże razie, gdy ciało *A* nie będzie wprost ku dołowi wypuszczone, ale rzucone z prędkością poziomą w tejże samej chwili, kiedy ciało *B* zostaje opuszczone, przekonywamy się, że *A* i *B* razem padają na podłogę.

510. Możemy to sprawdzić bardzo łatwo nawet bez specyalnego przyrządu. W lewej ręce trzymam kulkę marmurową i wypuszczam ją w tejże samej chwili, gdy ręką prawą ciskam poziomo drugą podobnąż kulkę. Widzimy, że obie te kulki razem o posadzkę uderzają.

511. W sposób ściślejszy przeprowadzić możemy doświadczenie to za pomocą urządzenia, przedstawionego na fig. 68.

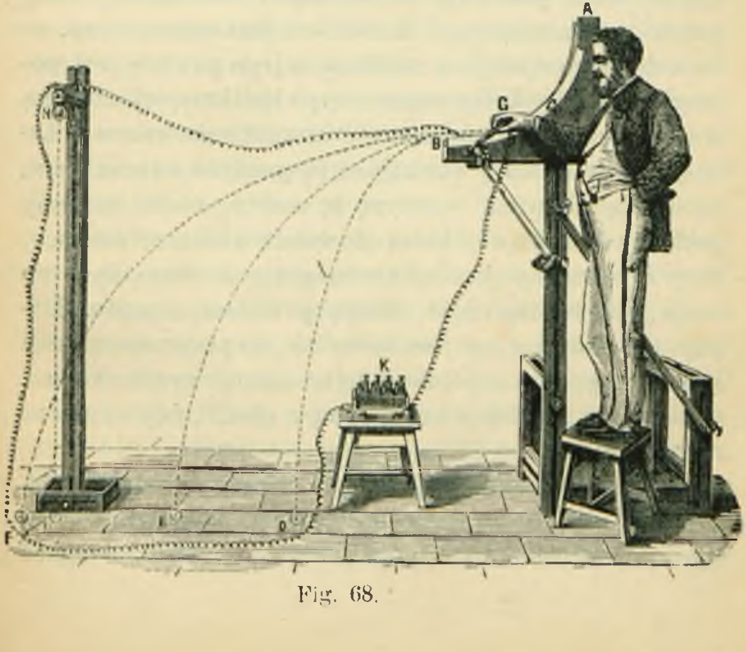

Fig. 68.

Mamy tu urządzenie, które nas zapewnia, że kulka jedna zostaje opuszczoną właśnie wtedy, gdy druga zostaje rzuconą. *A B* jestto płyta drewniana, mająca około 5 cm. grubości; część kołowa (o promieniu 60 cm.) posiada wyżłobienie rowkowate, w którem spoczywa kulka tak, że dotyka jedynie brzegów, ale usunięta jest od dna rowka. Każdy brzeg rowka pokryty jest cynfolią *C*, ale pasy cynfolii po obu stronach nie powinny między sobą pozostawać w związku. Brzeg jeden połączony jest z jednym biegunem stosu *K*, a brzeg drugi z drugim biegunem, prąd wszakże przebiegać nie może, dopóki między obu brzegami nie nastąpi połączenie przewodnikiem. Most taki tworzy kulka *G*, pokryta jest bowiem cynfolią; dopóki więc pozostaje w zetknięciu z brzegami, obieg prądu jest zamknięty. Rowek tak jest umieszczony, że linia do niego styczna w najniższym jego punkcie jest pozioma; gdy więc kulka stacza się po linii krzywej, rzuconą zostaje przy jej opuszczeniu w kierunku poziomym. Do rzucania kulki służy otaczająca ją sprężyna kauczukowa; pociągając bowiem sprężynę tę wstecz, nadać możemy pociskowi szybkość, którą dowolnie zmieniać możemy. Przy *H* osadzony jest elektromagnes, a otaczający go zwój drutu tworzy część obiegu powyższego prądu. Magnes ten umieszczony jest nadto tak, że przyczepiona doń kulka przypada zupełnie w tejże samej wysokości nad podłogą, co i kulka pokryta cyną w chwili, gdy opuszcza rowek.

512. Rozumiemy już teraz metodę doświadczenia. Dopóki kulka *G* pozostaje na krzywej, połączenie elektryczne jest zamknięte, prąd przebiega, a elektromagnes

utrzymuje kulkę *H*; w chwili wszakże, gdy kulka *G* opuszcza rowek, kulka *H* zostaje oswobodzoną i opada. Otóż, przekonywamy się niezmiennie, że z jakąkolwiekbądź prędkością jest kulka *G* rzuconą, pada na podłogę w tejże samej chwili, gdy przybywa na nią i kulka *H*. Różne linie kropkowane na figurze wskazują rozmaite drogi, któremi kulka *G* przebiedz może; ale, czy to ona pada w punkcie *D*, czy w *E*, czy też w *F*, czas jej przebiegu jest takiż sam, jak i czas spadku kulki *H*. Oczywiście, gdyby kulka *G* nie była rzucona poziomo, nie otrzymalibyśmy takiego rezultatu; twierdzimy bowiem, że jakikolwiek byłby bieg ciała, będzie ono zawsze (jeżeli nie ma przeszkód), w końcu sekundy o pięć metrów bliżej powierzchni ziemi, aniżeliby się znajdowało, gdyby ciężkość nie działała. Jeżeli ciało rzucone jest poziomo, spadek jego zależy od ciężkości jedynie, a prędkość pozioma nie powoduje ani jego przyspieszenia, ani też opóźnienia. Doświadczenie to daje przeto dowód, że gdy ciało prędkość pewną posiada, nie wpływa to zgoła na działanie ciężkości.

513. Widzieliśmy wprawdzie tylko, że prędkość pozioma na działanie ciężkości nie wpływa, ale również nie wpływa na nie prędkość w jakimkolwiek innym istniejąca kierunku. Sprawdza się to, podobnie jak i pierwsze prawo ruchu, zgodnością zachodzącą między wnioskami, z zasady tej wyprowadzonemi, a obserwacyą.

514. Rezultaty przeto powyżej otrzymane streścić możemy w ten sposób, że z jakiejkolwiekbądź substancyi składa się ciało, czy to jest ciężkie czy lekkie, czy jest w ruchu czy też w spoczynku, jeżeli na ciało to przez *t*

sekund nie działa żadna inna siła, prócz ciężkości, będzie ono wtedy o $5t^2$ metrów bliżej ziemi, aniżeliby się znajdowało, gdyby ciężkość nie działała.

515. Wyłożyć tu możemy jeszcze twierdzenie, posiadające doniosłe znaczenie. Przyjmijmy pewną prędkość i pewną siłę. Niech prędkość będzie taka, że punkt wyruszający z A, fig. 69, posunąłby się jednostajnie

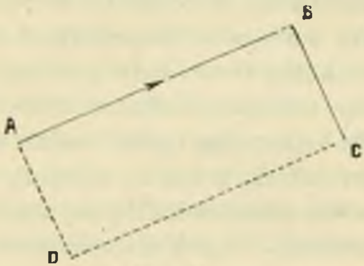

Fig. 69.

w ciągu sekundy do B. Niech siła będzie taka, że gdyby działała na cząstkę, znajdującą się początkowo w spoczynku w punkcie A, przesunęłaby ją w ciągu sekundy do D; jeżeli więc siła działa na cząstkę posiadającą prędkość, gdzie znajdować się będzie cząstka ta na końcu sekundy? Uzupełnijmy równoległobok $ABCD$, a cząstka znajdzie się w C. Według tego, mianowicie, cośmy powiedzieli, siła zawsze stara się powinność swoję spełnić, jakąkolwiek byłaby prędkość początkowa ciała. Siła przeto przesunie cząstkę daną na odległość równą i równoległą do AD, bez względu na to, w jakiem położeniu pozostawałaby ta cząstka, gdyby siła nie działała. Gdyby zaś siła nie działała, cząstka znajdowałaby się w B; a zatem, gdy siła działa, cząstka znaleźć się musi w C, jeżeli linija $B\,C$ jest równa i równoległa do $A\,D$.

Jak się oznacza siła ciężkości.

516. Ze wzoru

$$\text{droga} = 5t^2$$

wnosimy, że ciało w ciągu 2 sekund opada o 20 metrów; ponieważ zaś wiemy, że w ciągu pierwszej przebiega 5 m., przebiegać przeto musi 15 m. w ciągu drugiej sekundy. Zastanówmy się nad tem bliżej. Spadając przez jednę sekundę, ciało nabiera pewnej prędkości, a z prędkością tą rozpoczyna ruch w sekundzie drugiej. Według zaś zasady, którą poznaliśmy właśnie, ciężkość podczas drugiej sekundy działa zgoła niezależnie od prędkości, jaką ciało to początkowo posiadać może. W ciągu drugiej przeto sekundy ciężkość sprowadza ciało ku dołowi o 5 m., ale w ciągu tego czasu ciało przebiegło razem 15 m.; a zatem przesunęło się ono o 10 m. wskutek prędkości, jaką mu nadała ciężkość podczas pierwszej sekundy. Poznajemy stąd, że gdy ciężkość działa przez sekundę, wytwarza prędkość taką, że gdyby ciało mogło się poruszać dalej z tą prędkością nabytą, przebiegłoby 10 m. w ciągu jednej sekundy.

517. W ciągu trzech sekund ciało opada o 45 m., a zatem przez trzecią tylko sekundę przebiega

$$45 \text{ m.} - 20 \text{ m.} = 25 \text{ m.},$$

ale z tych 25 m. jedynie tylko 5 m. zależy od działania ciężkości, wywartego w ciągu tej sekundy; reszta zaś

$$25 \text{ m.} - 5 \text{ m.} = 20 \text{ m}$$

zależy od prędkości, z jaką ciało ruch swój w trzeciej sekundzie rozpoczęło.

518. Widzimy zatem, że po przeciągu dwu sekund ciężkość nadała ciału prędkość 20 m. na sekundę; w takiż sam sposób przekonać się możemy, że na końcu trzeciej sekundy ciało posiada prędkość 30 m., a w ogólności na końcu t sekund prędkość $10t$. W ten sposób wykrywamy ważne prawo, że *prędkość wzbudzona przez działanie siły ciężkości jest proporcyonalna do czasu.*

519. Prawo to wskazuje nam nadto, że najwłaściwszy sposób mierzenia siły ciężkości daje nam prędkość, nabyta przez ciało spadające na końcu jednej sekundy. Dlatego też mówi się zwykle, że g (jak się siła ciężkości powszechnie oznacza) wynosi 10 m. (a dokładniej 9,8 m.). Poznamy dalej, w wykładzie o wahadle (XVIII), jak wartość g otrzymać można dokładnie. Z dwu tych równań $v = 10t$ i $s = 5t^2$ łatwo wyprowadzić można inny jeszcze, również dobrze znany wzór $v^2 = 20s$.

Droga pocisku jest parabolą.

520. Widzieliśmy wyżej, w doświadczeniach przedstawionych na fig. 68, że ciało rzucone poziomo opisuje w przebiegu swym ku ziemi drogę krzywą, należy nam przeto jeszcze oznaczyć charakter geometryczny tej linii krzywej. Ponieważ ruch jest szybki, niepodobna śledzić pocisku wzrokiem, tak, by można ująć dokładnie postać tej drogi; musimy przeto odwołać się do odpowiedniego urządzenia, które jest wskazane na fig. 70 (str. 303).

B C jestto kwadrant drewniany, mający około 5 cm. grubości; zawiera on rowek, po którym toczy się kulka, gdy zostanie opuszczoną. Szereg pierścieni z grubego papieru rozłożony jest odpowiednio na czarnej desce, a kulka, gdy opuści kwadrant, przebiegnie przez wszystkie te pierścienie, żadnego z nich nie dotykając, i wpa-

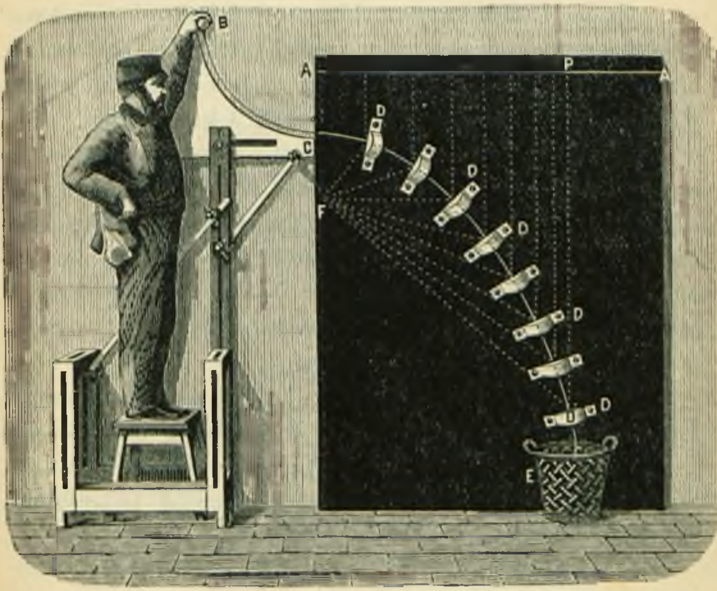

Fig. 70.

dnie wreszcie do kosza, na przyjęcie jej przygotowanego. Kwadrant winien być mocno przytwierdzony, kulkę zaś wprawiać należy w ruch zawsze z tegoż samego ściśle miejsca. Pierścienie łatwo osadzić można na właściwych miejscach przez próby. Dozwalając, mianowicie, kulce staczać się z kwadranta dwa lub trzy razy, dostrzedz możemy, gdzie umieścić trzeba pierwszy pierścień w należytem położeniu, i przytwierdzamy go tam szpilkami; potem przez kilka dalszych prób, regulujemy położenie dalszego pierścienia, a toż samo powtarzamy ze wszystkiemi ośmioma.

521. Linija krzywa, idąca od dolnego końca kwadranta i przechodząca przez środki pierścieni, jest drogą, którą kulka przebiega; krzywa ta jest parabolą, której punkt F jest ogniskiem, linija zaś $A\ A$ kierownicą.

Własność zasadnicza paraboli na tem polega, że odległość któregokolwiek jej punktu od ogniska równa się odległości prostopadłej tego punktu od kierownicy. Widzimy to na figurze. Tak, naprzykład, linija kropkowana $F\ D$, poprowadzona od F do środka najniższego pierścienia D, równa się linii prostopadłej $D\ P$, wyprowadzonej z D do kierownicy $A\ A$.

522. Kierunek, w jakim kulka zostaje rzuconą, jest w tym razie poziomy, ale jakikolwiek byłby kierunek rzutu, droga pocisku jest zawsze parabolą. Można tego dowieść matematycznie, jako wywód twierdzenia ust. 515.

WYKŁAD XVI.

Bezwładność.

Bezwładność. — Młot. — Gromadzenie energii. — Koło rozpędowe. — Maszyna do przebijania metali.

Bezwładność.

523. Ciało, niepoddane działaniu siły, pozostawać będzie zawsze w spoczynku, lub też zawsze poruszać się będzie jednostajnie po linii prostej. Zasadę tę wyraża pierwsze prawo ruchu (ust. 485). Zwykło się nazywać *bezwładnością* własność wszelkiej materyi, przez którą rozumiemy, że materya sama przez się nie może zmienić stanu swego spoczynku lub ruchu. Zmiana zatem każda wymaga siły.

W wykładzie obecnym zajmiemy się doniosłego znaczenia badaniami nad działaniem sił, dążących do wyprowadzenia ciała ze stanu spoczynku lub do zmiany szybkości jego, gdy pozostaje w ruchu. W wykładzie następnym rozpatrzymy działanie siły, gdy zmusza ciało do oddalania się od linii prostej.

524. W wykładach poprzednich zajmowaliśmy się stosowaniem siły bądź do dźwigania ciężarów bądź do pokonywania tarcia. Obecnie rozważyć mamy stosowanie siły nie w celu dźwigania ciał, ani też do posuwania ich wbrew oporowi, stawianemu przez tarcie, ale jedynie tylko do wytwarzania szybkości. Na nieszczęście, zachodzi tu trudność praktyczna przy wykonywaniu doświadczeń tak ściśle, jakbyśmy pragnęli. Potrzebowalibyśmy posiadać masę, oswobodzoną zarazem i od działania ciężkości i od tarcia, ale tego właśnie osiągnąć nie możemy, a przynajmniej, osiągnąć nie możemy dokładnie. Posiadamy wszakże sposób prosty, który nam do takiego oswobodzenia ciała wystarczy w obecnem naszem zadaniu. Jest tu ciężka bryła żelazna, ważąca około 10 kilogramów, a zawieszona na drucie żelaznym, uczepionym u sufitu, w wysokości około 10 m. nad posadzką (ob. fig. 82). Ciężar ten poruszać możemy ręką w jednę i drugą stronę. Jest on zupełnie wolny od tarcia, możemy bowiem obecnie nie zwracać uwagi na słaby opór, jaki stawia powietrze. Ciężkość przeto tej bryły uważać możemy, jako zniesioną przez utrzymującą ją siłę drutu, a skoro teraz ciało to zwiesza spokojnie, możemy je uważać za ciało oswobodzone od działania jakiejkolwiek siły.

525. Aby kuli tej nadać szybkość poziomą, czuję, że muszę na nią wywrzeć siłę. Stanie się to dla was wszystkich widocznem, gdy siłę wywierać będę za pośrednictwem sprężyny kauczukowej. Jeżeli sprężynę tę

pociągam silnie, dostrzegacie, jak bardzo się rozciąga; poznajecie tedy, że ciało nie poruszy się żywo, dopóki nie wywrę na nie znacznej siły. Wypływa stąd, że samo już tylko wytworzenie ruchu w tej masie wymaga siły.

526. Tak samo też, gdy ciało jest w ruchu, jak to się teraz dzieje, nie mogę go zatrzymać bez użycia siły. Widzimy, jak sprężyna kauczukowa jest wyprężona i jak przeto silnemu ulega pociągnięciu, gdy staram się ciało ruchu pozbawić. Zwrócić też należy uwagę na to, że gdy siła, działając dostatecznie długo, sprowadza ciało do spoczynku, to natomiast, by spoczynek szybko wywołać, użyć potrzeba siły znacznej.

527. Jestto powszechne prawo przyrody, że działanie i oddziaływanie, czyli akcya i reakcya, są sobie równe. Jeżeli zatem czynnik jakikolwiek usiłuje ciało przeprowadzić ze stanu spoczynku do ruchu, albo też ruch jego w jakikolwiek sposób zmienić, ciało oddziaływa na ten czynnik, a siła ta nazwaną została *oddziaływaniem cynetycznem* czyli *reakcyą cynetyczną*.

528. Tak, naprzykład, gdy pociąg kolejowy wyrusza, lokomotywa wywiera siłę na wagony, a szybkość wytworzona w ciągu jednej sekundy sumuje się z szybkością wywołaną w ciągu sekundy następnej. Reakcya cynetyczna pociągu jest przyczyną, że maszyna parowa osiąga pełną swą szybkość później, aniżeliby ją zyskała, gdyby wolną była od pociągu.

Młot.

529. Działanie młota i innych narzędzi, służących do uderzeń, polega na bezwładności. Olbrzymi młot zagłębić może gwóźdź jedynie tylko ciężarem swoim, gdy się na gwoździu tym opiera; przy pomocy wszakże bezwładności wbijamy gwóźdź i małym młotem. Przywołujemy tu bezwładność do pomocy, by wytworzyć siłę, mogącą przezwyciężyć znaczny opór, jaki stawia drzewo przeciw zagłębianiu gwoździa. Aby gwóźdź wbić, potrzeba w ogólności siły jakich kilkuset kilogramów, a to wytworzyć możemy łatwo, zatrzymując nagle szybkość małego, poruszającego się ciała.

530. Teoryę młota objaśnia przyrząd fig. 71 (str. 309). Jestto trójnóg, na którego szczycie, w wysokości około 3 m. od podstawy, osadzony jest mocny blok *C*; sznur ma około 5 m. długości, a do każdego jego końca *A* i *B* przyczepione są ciężary. Każdy z tych ciężarów wynosi najpierw 5 kg. Podnoszę ciężar *A* w górę do bloka, pozostawiając *B* na podłodze; następnie puszczam sznur, ciężar zatem *A* opada, wskutek czego prostuje się sznur luźno puszczony, a wreszcie, gdy ciężar *A* znajduje się w odległości około metra od podłogi i sznur jest już wyprężony, ciężar *B* doznaje gwałtownego wstrząśnięcia i wznosi się w górę. Jakaż przyczyna go dźwignęła? Nie może nią być jedynie ciężar bryły *A*, jest on bowiem równy ciężarowi *B*, mógłby więc go tylko zrównoważyć, ale niedostateczny jest, by go unieść. Inna zatem musiała tu działać siła, która dźwignęła ciężar *B*; musiała ona być nieco większa, aniżeli ciężar *A*, i wytworzyła się,

gdy ruch doznał przeszkody. Ciężar *A* nie zatrzymał się zupełnie, utracił tylko nieco ze swej szybkości; jakakolwiek wszakże utrata szybkości nie może nastąpić bez działania siły. Siła zaś ta wywartą została za pośredni-

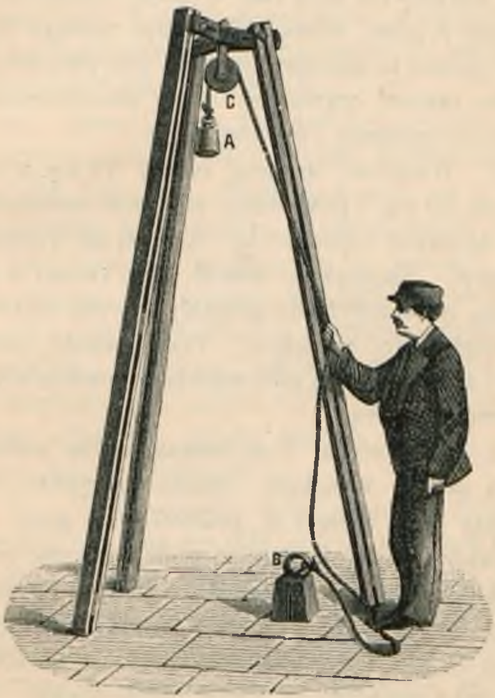

Fig. 71.

ctwem sznura, utrzymującego ciężar *A*, a powstałe stąd naprężenie wystarczyło do pociągnięcia ciężaru *B* w górę.

531. Usuńmy teraz ciężar 5 kg. z *B*, a w jego miejsce przywiążmy ciężar 10 kg., pozostawiając przy *A* tenże sam, co poprzednio, ciężar 5 kg. Podnoszę znów ciężar *A* do bloka i dozwalam mu opadać. Widzicie, że ciężar *B*, jakkolwiek dwa razy większy, aniżeli *A*, znowu podrywa się w górę, skoro tylko sznur zostaje wyprężonym. Wyjaśnić to możemy jedynie przypuszczeniem, że naprężenie sznura, wywołane przez zatamowanie ruchu *A*, wynosi co najmniej 10 kilogramów.

532. Wreszcie, usuńmy ciężar 10 kg. z *B*, przyczepmy tam 20 kg. i powtórzmy toż samo doświadczenie; widzicie, że nawet ciężar 20 kg. podnosi się o kilkanaście centymetrów. Naprężenie zatem, tym razem w sznurze wzbudzone, wystarczyło do przezwyciężenia ciężaru cztery razy większego, aniżeli *A*. Przy pomocy zatem bezwładności zyskujemy na sile, mniejszą bowiem siłą pokonać możemy większą.

533. Gdy ciężar *B* po wstrząśnięciu podniesiony zostaje na pewną wysokość, opada następnie, a jeżeli znaczniejszy jest aniżeli *A*, podnosi go w górę. Wysokość do jakiej ciężar *B* zostaje podniesionym, jest oczywiście takaż sama, jak wysokość, o jaką *A* opada. Mogliśmy też dostrzedz, że wysokość, na jaką dźwignięty został ciężar 10 kg., była znacznie większa, aniżeli wysokość, na jaką podniesiony został ciężar 20 kg. Wyprowadzić stąd możemy wniosek, że gdy ciężar *A* pozbawiony zostaje prędkości swej w przejściu przez drogę krótką, powstrzymywany być musi przez silę większą, aniżeli w razie, gdy prędkość swą traci stopniowo, w przebiegu przez drogę dłuższą. Jestto okoliczność na-

der ważna. Przypuszczając, że potrzeba mi przywiązać 40 kg. do końca sznura *B*, mógłbym mieć pewną wątpliwość, czy sznur byłby dosyć wytrzymały, by zniósł takie naprężenie; chociaż wszakże *A* waży tylko 5 kg., ciężar *B* podniesie się pomimo to cokolwiek w górę. W tym razie zatem ciężar *A* byłby pozbawiony swej prędkości na drodze bardzo krótkiej, do zatrzymania go wszakże należałoby użyć siły bardzo znacznej.

534. Rzecz jasna, że wywody powyższe nie uległyby istotnej zmianie, gdyby ciężar *A* zatrzymany został jakąkolwiek inną siłą, działającą nań nie z góry, ale z dołu; możemy tedy przyjąć, że sznur zostaje usuniętym, *A* zaś jest młotem, opadającym na gwóźdź osadzony w bryle drzewa. Uderzenie zmusiłoby gwóźdź do zagłębienia się na małą odległość, a wszystka prędkość ciężaru *A* zostałaby zniesioną podczas ruchu jego przez tak małą odległość, siła zatem wywierana między główką gwoździa a młotem byłaby bardzo znaczna. To nam tłómaczy skutek uderzenia.

535. W przypadku, który tu przypuściliśmy, ciężar działał tylko na gwóźdź, ale takaż sama jest zasada młota w maszynach, służących do wbijania pali. Pal jestto wielki pręt drewniany, zaostrzony i obity żelazem na jednym końcu, który zagłębić należy w ziemię. Pale potrzebne są do różnych celów w robotach inżynierskich. Służyć one mają często do podtrzymywania fundamentów gmachu; należy je przeto zagłębiać tak daleko, dopóki opór, jaki grunt przeciwstawia dalszemu ich wdzieraniu się, nie da rękojmi, że będą one zdolne do dźwigania żądanego ładunku.

536. Maszyna do wbijania pali zwana kafarem, składa się w istocie rzeczy z ciężkiej masy żelaza, która zostaje podniesioną do pewnej wysokości, skąd opada na pal. Opór, jaki pokonać tu trzeba, zależy od głębokości i natury gruntu; pal wbity być może na pięć lub sześć centymetrów każdem uderzeniem, ale im mniejsza jest głębokość, na jaką się za każdym razem pal wdziera, tem większem jest ciśnienie, jakiem uderzenie napiera je ku dołowi. W młotku zwyczajnym siła ręki nadaje mu prędkość, która się sumuje z prędkością zależną od spadku; działanie przez to wywołane jest zupełnie takież samo, jak gdyby młot spadał ze znaczniejszej wysokości.

537. Na inny jeszcze szczegół zwrócić tu winniśmy uwagę. Gwóźdź wedrzeć się może w drzewo wtedy tylko, gdy gwóźdź i drzewo są naciskane nawzajem ku sobie z siłą dostateczną. Gwóźdź ulega działaniu młota; jeżeli drzewo złożone jest na ziemi, opór gruntu nie dozwala się drzewu usuwać, a gwóźdź się zagłębia. W innych razach udział *czasu* ma znaczenie przeważne. Gdyby bryła drzewa była ciężka, wbiłaby gwóźdź siła mniejsza od siły, którąby zdołała bryłę tę dosyć szybko poruszyć. Gdyby bryła drzewa była lekka i niepodparta, do posunięcia jej byłaby potrzebną siła mniejsza, aniżeli do wbicia gwoździa. Jest więc rzeczą jasną, jak temu zaradzić. Trzeba tylko tuż poza drzewem umieścić ciężką masę; gwóźdź wedrze się wtedy w drzewo, powiększona bowiem masa nie może już ustępować tak szybko, jak przedtem.

Gromadzenie energii.

538. Badania nasze nad tym przedmiotem ułatwić się dadzą pewnemi uwagami, opartemi na zasadach energii. W doświadczeniu przedstawionem na fig. 71 niech A będzie ciężarem 5 kg., a B na podłodze ciężarem 20 kg. Jeżeli sznur ma 5 m. długości, A znajduje się w wysokości 1 m. nad podłogą, a zatem o 2 m. poniżej bloka. Podnoszę A aż do bloka, a na wykonanie tego wyłożyć muszę $5 \times 2 = 10$ kilogrammetrów. Energia nie ginie nigdy, mogę się przeto spodziewać, że zasób ten odzyskam. Dozwalam ciężarowi A opadać; gdy opadł o 2 m., znajduje się w tychże samych zupełnie warunkach, co przed podniesieniem, wyjąwszy, że posiada znaczną szybkość, nabytą przy spadku. W samej rzeczy, wyłożona ilość energii 10 kilogrammetrów zużytą została na nadanie szybkości ciężarowi A. Ciężar B zostaje wtedy podniesiony na wysokość x, co pochłania $20 \times x$ tychże jednostek energii. W chwili, gdy B znajduje się u kresu swego wzniesienia x, A przypada w odległości $2 + x$ metrów od bloka; ilość zatem pracy wykonana przez A wynosi $5\,(2 + x)$. Praca ta wszakże równą być musi pracy wyłożonej na dźwignięcie B, a zatem

$$5\,(2 + x) = 20\,x,$$

skąd $x = {}^2/_3$. Gdyby więc nie było straty z powodu tarcia, ciężar B zostałby podniesiony na $^2/_3$ metra; z powodu wszakże tarcia, a niewątpliwie i dla niedoskonałej giętkości sznura, skutek nie jest tak znaczny. Możemy tedy pracę wyłożoną na podniesienie ciężaru A uważać za takąż samą ilość energii w nim nagromadzonej, a gdy ciężar ten ma swobodę opadania, energia odtwarza się w postaci przeinaczonej.

539. Zasadę tę energii odnieśmy do maszyny, służącej do wbijania pali, o której mówiliśmy (ust. 536), a da nam ona możność obliczenia wielkości siły, rozwiniętej przy uderzaniu. Dajmy, że „baba," to jest ciężka bryła opadająca, waży 200 kg., a dwu ludzi podnosi ją za pomocą korby na wysokość 5 m. Wykonywają to w ciągu kilku minut, a wyłożona przez nich energia gromadzi się i daje zasób 200 $\times$ 5 $=$ 1000 kilogrammetrów. Gdy baba spada na wierzchołek pala, przenosi nań wszystką tę prawie ilość 1000 jednostek energii, która się wykłada na zagłębienie pala w ziemię. Dajmy, że pal wdziera się na 4 cm.; w takim razie oddziaływanie pala być musi tak znaczne, że liczba jednostek energii pochłoniętych na długości 4 cm. wynosi 1000. Oddziaływanie to jest zatem 1000 : 0,04 $=$ 25000 kg. Gdyby reakcya nie dochodziła do tego stopnia, baba nie zostałaby doprowadzoną do spoczynku na drodze tak krótkiej. Oddziaływanie tedy pala na babę, a zatem i działanie baby na pal, wynosi około 25 tysięcy kilogramów; jestto ciśnienie przy uderzeniu wywarte.

540. Jeżeli grunt, do którego pal się wdziera, jest bardziej oporny, aniżeli przyjęliśmy, — jeżeli, naprzykład, pal do zagłębienia się weń wymaga ciśnienia 40 tysięcy kilogramów, — taż sama baba przy tejże samej wysokości spadku mogłaby jeszcze wystarczyć, pal wszakże nie przeniknąłby tak daleko za każdem uderzeniem. Wymagane ciśnienie wynosi w tym razie 40000 kg.; ciśnienie to wywarte na przestrzeni $^1/_{40}$ m. czyni 1000

kilogrammetrów; pal zatem zagłębi się na 2,5 cm. Im większy jest opór, tem mniej zagłębia się pal pod każdem uderzeniem. Pal, przeznaczony do dźwigania bardzo znacznego ładunku trwałego, wbity być winien tak daleko, dopóki pod każdem uderzeniem nie zagłębia się już bardzo nieznacznie tylko.

541. Porównywając kafar do wbijania pali z maszynami prostemi, dostrzegamy podobieństwo pod jednym względem, sprzeczność zaś pod innym. W obu razach mamy maszyny, które otrzymują energię i oddają ją w zmienionej formie większej siły wywieranej na przestrzeni krótszej; gdy wszakże maszyny proste przywracają na jednym swym końcu energię współcześnie z otrzymywaniem jej na końcu drugim, kafar jest zbiornikiem do gromadzenia energii, który ją przywraca w postaci żądanej.

542. Posiadamy przeto katagoryę maszyn, za których typ uważać możemy młot, a które polegają na gromadzeniu energii; energia ręki, gromadząca się w młocie, gdy nim miotamy, przenosi się natychmiastowo na gwóźdź przy uderzeniu. Bezwładność jest własnością ciał, która się do celu tego nadaje. Energia rozwija się przy wybuchu prochu w armacie. Energia ta przenosi się na pocisk, z którego znów w znacznej mierze przechodzi na wykonanie pracy, zwróconej przeciw przedmiotowi uderzonemu. W tym razie widzimy energię nagromadzoną w szybko poruszającem się ciele, a do tego przypadku należy nam jeszcze wrócić.

543. Energia gromadzoną być może w różny sposób; powiedzieć możemy, że proch jest zbiornikiem

energii w postaci zagęszczonej i do działania gotowej. Gdy wtłaczamy powietrze do wiatrówki, wysiłek nasz na to wyłożony przechowuje się w niej jako energia, by był odzyskany następnie przy pewnej liczbie strzałów. Gdy w ciągu kilku sekund nakręcamy zegarek, nadajemy sprężynie drobny ładunek energii, który się wydatkuje oszczędnie w ciągu następnej doby. Gdy posługuję się łukiem, energia moja gromadzi się w nim, odkąd rozpoczynam cięciwę naciągać, aż do chwili, gdy strzałę wypuszczam.

544. Różne maszyny powszedniego użytku polegają na tychże zasadach. W zegarach zapotrzebowanie energii do podtrzymywania ruchu jest stateczne, gdy dostarczanie jej ma miejsce tylko od czasu do czasu; w innych natomiast razach dostarczanie energii jest ciągłe, żądanie zaś jej zachodzi jedynie w pewnych odstępach czasu. Przytoczymy tu przykład tego ostatniego przypadku. Dajmy, że zachodzi potrzeba podnoszenia *od czasu do czasu* znacznych ciężarów na pewną wysokość. Gdyby do tego używany był potężny motor parowy, byłby on bezczynnym, prócz czasu, gdy ciężary są podnoszone; gdyby zaś maszyna pozostawała przez czas długi bezczynną, strata opału na utrzymywanie ognia podczas tych przerw czyniłaby często całe urządzenie nieekonomicznem. Korzystniej przeto służyć tu będzie motor niewielki, a chociaż byłby on niezdolny do bezpośredniego podnoszenia ciężarów z dostateczną szybkością, to wszakże, utrzymując motor w bezustannej działalności i gromadząc energię, możemy w ciągu doby wytworzyć

dostateczną jej ilość do podniesienia wszystkich ciężarów, które należało w ciągu czasu tego dźwignąć.

545. Dajmy, że wydobywać mamy łupek z dna kopalni na powierzchnię ziemi. Wielki blok osadzony jest na szczycie kopalni, a przez blok ten przechodzi sznur, dźwigający na każdym swym końcu kubeł, tak, że gdy jeden z nich jest na dnie kopalni, drugi jest u jej szczytu, wymiary zaś ich, również jak i wymiary bloka, tak są dobrane, że jeden obok drugiego przechodzi bezpiecznie. Na szczycie kopalni, w jednym poziomie z blokiem, umieszczony jest zbiornik wody, a motor, w ciągłym pozostający ruchu, pompuje wodę z dna kopalni do zbiornika. Kubeł każdy składa się w części z wielkiego rezerwoaru, który łatwo być może wodą napełniany i wypróżniany. Kubeł dolny napełnia się łupkiem, a gdy jest już do wydobycia przygotowany, robotnik na szczycie wypełnia wodą rezerwoar kubła górnego, który zatem staje się tak ciężki, że opada i podnosi łupek. Skoro cięższy ten kubeł dosięga dna, woda z niego przeprowadza się do rezerwoaru dolnego, skąd ją motor pompuje, łupek zaś wydobywa się z kubła, który go wydźwignął. Wszystko jest wtedy przygotowane już do powtórzenia tejże operacyi. Jeżeli łupek wydobywa się w odstępach czasu dziesięciominutowych, energia motora parowego będzie dostateczna, jeżeli praca jego w ciągu dziesięciu minut wypompować może w górę ilość wody wystarczającą do napełnienia zbiornika jednego kubła; przy pomocy przeto takiego urządzenia mamy możność gromadzenia na jednę czynność wszystkiej energii, dostarczanej przez motor w ciągu dziesięciu minut.

Koło rozpędowe.

546. Jednym z najlepszych sposobów gromadzenia energii jest wprawianie ciężkiej bryły w szybki ruch. Przykład tego przytoczyliśmy już wyżej w pocisku armatnim. Aby metodę tę uczynić pożyteczną w zastosowaniu do budowy maszyn, ciężkiej bryle nadaje się postać koła rozpędowego, a udzielany jej szybki ruch staje się wtedy obrotem dokoła jej osi. Bardzo znaczny zasób energii może być tym sposobem gromadzony w postaci do rozporządzenia dogodnej.

547. Wyjaśnimy zasadę tę za pomocą przyrządu fig. 72. Składa się on z żelaznego koła rozpędowego,

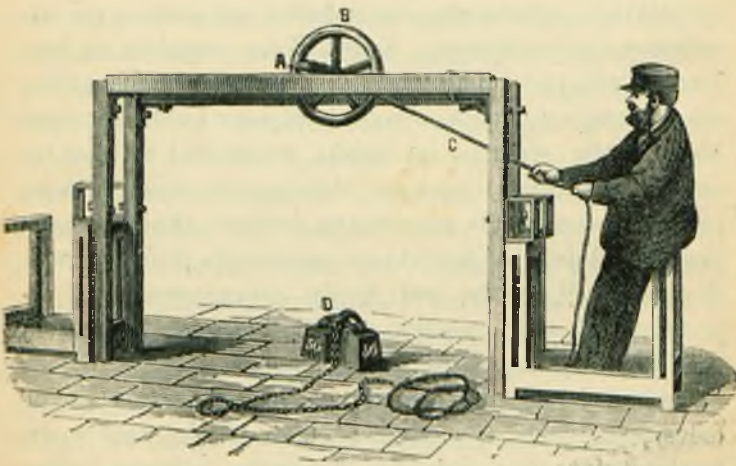

Fig. 72.

o średnicy 46 cm., a ważącego 12 kg.; koło to osadzone jest na wale z żelaza kutego o średnicy 2 cm. Nagromadzimy w kole tem pewną ilość energii, wprawiwszy je w szybki ruch, a następnie zobaczymy, jak można odzyskać energię, w sposób ten kołu udzieloną.

548. Na wale nawinięty jest sznur tak, że ciągnąc go, obracamy koło; sznur przeto jest pośrednikiem, który energię naszą przenosi na koło. Aby działanie to dokładnie zmierzyć, przywiązuję sznur do haka wagi sprężynowej (fig. 9), a ująwszy pierścień jej w rękę, poznaję z położenia wskazówki wielkość siły, jaką wywieram. Widzę tedy, że gdy chodzę wstecz dosyć szybko i ciągnę wciąż sznur, podziałka wagi wskazuje napięcie około 25 kg. Aby koło w szybki ruch wprawić, odciągam około 6 m. sznura od osi; udzieliłem tedy kołu mniej więcej $25 \times 6 = 150$ kilogrammetrów energii. Sznur przyczepiony jest do koła, a gdy całkowicie został rozwinięty, koło, szybko się teraz obracając, okręca go znowu. Mierząc czas, w ciągu którego koło okręca pewną liczbę razy sznur na wale, poznaję, że dokonywa ono okolo 600 obrotów na minutę.

549. Zobaczmy teraz, jak nagromadzona w ten sposób energia ujawnić się daje. Pręt sosnowy o wymiarach 60 cm. $\times$ 2,5 cm. $\times$ 2,5 cm., którego oba końce są podparte, wymaga do przełamania siły około 120 kg., przyczepionej w środku, jak to wnosimy, zestawiając wymiary jego z rezultatami doświadczeń, podanych w tabeli XXIV. Taki pręt sosnowy umieszczam w pobliżu koła. Gdy wał okręca się sznurem, wszelka zawada, którahy usiłowała powstrzymać ruch, doznałaby straszliwego wstrząśnięcia. Gdybym przywiązał koniec sznura do pręta sosnowego, wstrząśnięcie to spowodowa-

łoby rozerwanie sznura; przyczepiam tedy do sznura koniec łańcucha, długiego na 3 m., a którego koniec drugi przywiązuję dokoła środka pręta drewnianego. Koło najpierw okręca się sznurem, następnie łańcuch wykonywa kilka obrotów zanim się wypręży, a wreszcie pręt sosnowy pęka. Koło nie ma wyboru; musi bądź to się zatrzymać, bądź też zgruchotać pręt; sama wszakże forma jego zatrzymać mu się nie dozwala, chyba pod działaniem potężnej siły, ale pręt nie jest dostatecznie wytrzymały, by siłę tak wielką mógł mu przeciwstawić. Teraz również na wprawienie koła w ruch nie wywierałem siły większej nad 25 kg., koło wszakże nagromadziło energię moję tak, że wytworzyło siłę 120 kg., która, w każdym razie, wywartą została na przestrzeni bardzo krótkiej.

550. Możemy też doświadczenie to wykonać w inny jeszcze sposób, który jest właśnie na fig. 72 przedstawiony. Widzimy, że łańcuch jest tu przywiązany do dwu ciężarów 56-funtowych, które razem czynią nieco więcej nad 50 kg. Doświadczenie wykonywamy zresztą tak samo, jak poprzednio. Okręcam najpierw sznur dokoła wału, a następnie ciągnąc go, wprawiam koło w obrót; koło wtedy zaczyna się znowu okręcać sznurem, a gdy łańcuch wypręża się, ciężar 50 kg. zostaje dźwignięty na wysokość przeszło metra. I w tym więc razie energia została nagromadzona i odzyskana. Chociaż wszakże koło rozpędowe przechowuje w ten sposób energię, czyni to z pewną stratą, zasób bowiem energii rozprasza się bezustannie przez tarcie i opór powietrza; w samej rzeczy, energia roztrwoni się zupełnie

w krótkim czasie, a koło przejdzie do spoczynku. Dlatego też ze względów ekonomicznych należy koło wyrabiać tak, by otrzymaną energię przywracać mogło tak szybko, jak tylko być może.

551. Zasady te tłómaczą zadanie koła rozpędowego w maszynie parowej. Ciśnienie pary na tłok zmienia się, stosownie do różnych jego położeń w cylindrze maszyny, ale koło rozpędowe usuwa niedogodność, jakaby z tej niejednostajności wynikała. Znaczna bezwładność tego koła sprawia, że szybkość jego niewiele się tylko wzmaga pod nadmiernem działaniem tłoka, gdy ciśnienie jest największe, ale też utrzymuje ruch swój i wtedy, gdy tłok poparcia mu nie daje. Koło rozpędowe jest obszernym zbiornikiem, do którego maszyna parowa energię swą przelewa, przyczem nagłe przybory zachodzą naprzemian z posuchą; kolejne te wszakże zmiany następują tak szybko jedne po drugich, a powierzchnia zbiornika tak jest rozległa, że poziom pozostaje widocznie jednostajnym, a zasoby przesyłane odbiorcom są regularne i niezmienne. Odbiorcami energii nagromadzonej w kole rozpędowem są maszyny w młynie; otrzymują ją za pośrednictwem wałów przesuniętych przez budynek, które ruchem swoim przenoszą energię, nagromadzoną pierwotnie w węglu kamiennym, a oswobodzoną z niego przy spalaniu.

Maszyna do przebijania metali.

552. Gdy energia nagromadzoną jest w kole rozpędowem, może się z niego oswobodzić, bądź jako słaba

siła, działająca przez drogę wielką, bądź też jako siła znaczna na drodze małej. W tym ostatnim przypadku koło rozpędowe działa jak maszyna prosta i w postaci tej ma zastosowanie w maszynie bardzo ważnej, którą teraz opiszemy. Model maszyny do wybijania otworów, czyli dziurawnicy, przedstawiony jest na fig. 73.

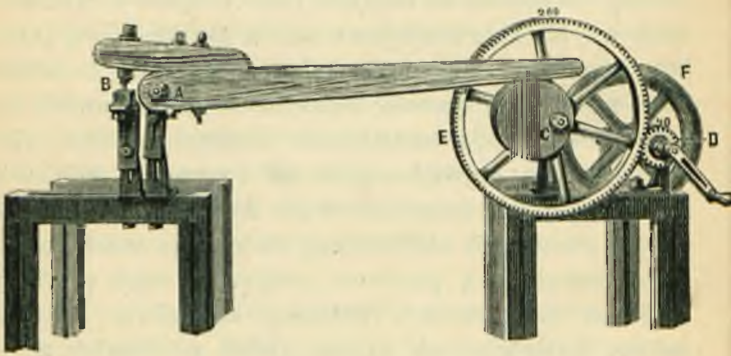

Fig. 73.

Maszyna do wybijania otworów jest zwykle wprawiana w ruch motorem parowym, mały wszakże nasz model obracać będziemy korbą. Korba wywołuje obrót wału, na którym osadzone jest koło rozpędowe *F*. Na tymże wale znajduje się małe kółko zębate *D* o 40 zębach, które działa na koło wielkie *E* o 200 zębach, tak, że gdy koło rozpędowe wraz z kółkiem *D* obróci się 5 razy, koło *E* wykona jeden obrót. *C* jestto krążek drewniany, posiadający między środkiem a obwodem otworek wskroś przewiercony; otworkiem tym krążek osadzony jest na tejże osi, co i koło zębate *E*, do którego jest mocno przytwierdzony, tak, że razem obracać się muszą. *A* jestto drążek pierwszego rodzaju, mający punkt podpory w *A*; bardziej oddalony koniec drążka spoczywa na krążku *C*, koniec zaś drugi zawiera stempel. Gdy koło *E* obraca się, pociąga za sobą i krążek *C*, który podnosi drążek i wtłacza stempel ku dołowi w płytę metalową, dokładnie pod nim umieszczoną. Płyta poddana działaniu wprowadza się pod stempel, zanim on zostaje przez krążek *C* pchnięty ku dołowi; pod ciśnieniem zaś drążka stempel przebija płytę i wytłacza z niej bryłkę metalu. Model nasz, jak widzimy, przebijać ma zwykłą cynę.

553. Rozbierzmy sposób tego działania. Maszyna zastosowaną jest do szybkiego obrotu, a stempel zostaje pchniętym ku dołowi raz na każde 5 obrotów koła rozpędowego; opór, jaki metal stawia przebijaniu, jest niewątpliwie bardzo znaczny, drążek wszakże działa z dwunastokrotnem wzmożeniem siły. Gdy stempel, obniżając się, dochodzi aż do powierzchni metalu, jedna z trzech okoliczności nastąpić musi: albo ruch zostanie nagle zatrzymany, albo maszyna ulegnie stłoczeniu i uszkodzeniu, albo też metal zostanie przebitym. Ruch wszakże nagle powstrzymać się nie może, zanim bowiem mogłoby to nastąpić, rozwinęłaby się siła nieskończenie wielka, którąby musiała zawadę jakąkolwiek pokonać. Jeżeli przeto konstrukcya maszyny jest dosyć mocna, aby się oprzeć mogła, metal musi być przebitym. Tego rodzaju zatem maszyny budowane być winny dostatecznie silnie, by łatwiej zachodziło przebijanie metalu, aniżeli rozbicie maszyny.

554. Na podstawie rezultatów otrzymanych dawniej w ust. 248 obliczyć możemy wielkość siły potrzebnej do przebijania. Dowiedzieliśmy się tam, że do przekrajania sztaby żelaznej, mającej cal kwadratowy, czyli prawie 6,5 centymetra kwadratowego w przecięciu, potrzebne jest ciśnienie około 50000 f., to jest przeszło 22500 kg., co czyni około 3460 kg. na przecięcie 1 centymetra kwadratowego. Przebijanie o tyle odpowiada przekrawaniu, że w każdym razie pewien obszar powierzchni ma być przecięty; powierzchnia zaś przebijana mierzy się powierzchnią walca żelaza, który zostaje usunięty.

555. Dajmy, że wybić mamy otwór o średnicy $1^1/_4$ cm. wskroś płyty grubej na 2 cm.; powierzchnia żelaza, która ma być wskroś przeciętą, wynosi $^{22}/_7 \times {}^5/_4 \times 2 = 7{,}86$ centymetra kwadratowego; ponieważ zaś do przecięcia potrzeba 3460 kg. na centymetr kwadratowy, przebicie zatem otworu wymaga $3460 \times 7{,}86 = 27200$ kg. prawie. Tak znaczna przeto siła wywartą być musi na stempel, co wymaga, by krążek *C* działał na koniec drążka siłą przeszło 2200 kg. Jakkolwiek żelazo ma być przebite w grubości 2 cm., widoczna wszakże, że zaledwie tylko stempel wedrze się poza powierzchnię żelaza, walec musi być już całkowicie wyciętym i zaczyna wysuwać się z drugiej strony płyty. Nie popełnimy zapewne istotnej pomyłki, jeżeli przypuścimy, że przebijanie jest już ukończone, zanim jeszcze stempel przeniknął do głębokości 0,5 cm., i że na tej tylko długości wywarte było tak wielkie ciśnienie 27200 kg.; odtąd zaś wystarczało już słabe ciśnienie dla przezwy-

ciężenia tarcia, opierającego się ruchowi walca żelaznego. Chociaż więc tedy tak wielkie wymagane było ciśnienie, liczba wszakże jednostek energii zużytej nie jest tak znaczna, wynosi bowiem $\frac{1}{200} \times 27200 = 136$ kilogrammetrów.

Energia przeto, istotnie potrzebna do przebicia otworu o średnicy $1\frac{1}{4}$ centymetra wskroś płyty grubej na dwa centymetry, jest mniejsza, aniżeli ilość energii, jakąby wyłożyć trzeba było na podniesienie 150 kg. do wysokości jednego metra.

556. Koło rozpędowe porównać można ze zbiornikiem z ust. 545. Przeciąg czasu, w którym rzeczywiście dokonywa się przebijanie, jest nader krótki, a nagły wydatek 136 jednostek energii przywraca się stopniowo przez motor. Jeżeli koło rozpędowe zawiera, dajmy, 6000 jednostek energii, ujęcie 136 takich jednostek nie wpływa wyraźnie na jego szybkość. W maszynie zatem do przebijania metali jest rzeczą korzystną zastosowanie ciężkiego koła rozpędowego, utrzymywanego w znacznej szybkości.

WYKŁAD XVII.

Ruch obrotowy.

Natura ruchu obrotowego. — Ruch obrotowy w cieczach. — Zastosowania ruchu obrotowego. — Osie trwałe.

Natura ruchu obrotowego.

557. Aby zmusić ciało do usuwania się od ruchu po linii prostej, użyć trzeba siły. W wykładzie bieżącym zbadamy prosty stosunkowo przypadek obrotu ciała po okręgu koła.

558. Gdy ciało porusza się biegiem jednostajnym po okręgu koła, stosować trzeba siłę bezustannie, a pierwsze pytanie, jakie nam rozebrać wypada, tyczy się kierunku tej siły. Wykażemy tę okoliczność ważną, że jest ona statecznie zwróconą ku środkowi.

559. Kierunek siły wykazany być może drogą doświadczalną, wielkość zaś jej będziemy mogli współcześnie należycie ocenić z rozciągnięcia sprężyny. Użyjemy w tym celu przyrządu wskazanego na fig. 74 (str. 327).

Zasadnicza część maszyny tej składa się z dwu kul *A* i *B*, mających po 5 cm. w średnicy; są to kule wydrążone, o cienkich ścianach z mosiądzu posrebrzonego. Osadzone są na ramionach *PA* i *QB*, przyczepionych

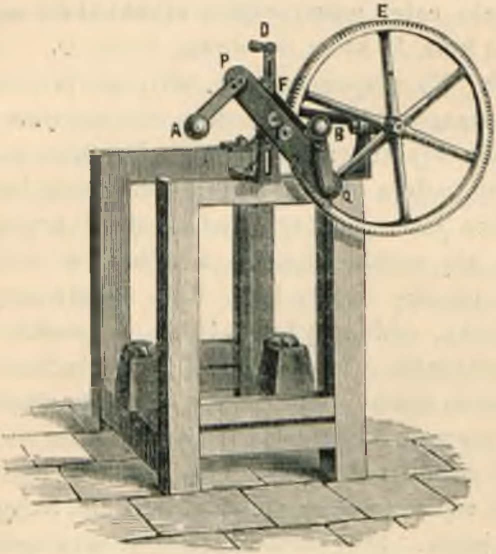

Fig. 74.

do płyty drewnianej *PQ*, która obracać się może na czopku *C*. Ramię jedno, *AP*, jest silnie przytwierdzone do *PQ*, drugie zaś, *BQ*, obracać się może dokoła osi w punkcie *Q*. Ruchome to ramię połączone jest nadto sprężyną kauczukową *F* z płytą *PQ* tak, że jeden koniec tej sprężyny przyczepiony jest do ramienia *BQ*, drugi do płyty PQ. Jeżeli więc ramię BQ obraca się tak, że B oddala się od C, sprężyna musi się rozciągać.

Małe kółko zębate osadzone jest na tejże samej osi C, co i płyta PQ; znajduje się ono poza płytą, na rycinie zatem jest niewidoczne; urządzenie to ma na celu wprawianie całej maszyneryi w szybki obrót za pomocą wielkiego koła E, które się obraca korbą D.

560. Po przyciemnieniu izby, na przyrząd nasz rzucamy smugę światła Drumonda, otrzymywanego przez rozżarzenie bryłki wapna w płomieniu tleno-wodornym; światło to odbija się od kul posrebrzonych i wywołuje w nich dwa jasne punkty. Gdy korbę D kręcimy, kule obracają się szybko dokoła, a odbite w nich punkty świetlne opisują okręgi kół. Kula B, gdy znajduje się w spoczynku, oddaloną jest o 10 cm. od punktu C, kula A zaś przypada od tego punktu C w odległości 20 cm.; okrąg przeto opisany przez B jest mniejszy aniżeli okrąg opisany przez A. Przedstawia nam to pozór dwu świetlnych kół współśrodkowych. Gdy szybkość obrotu wzrasta, koło wewnętrzne rozszerza się, aż oba okręgi zlewają się w jeden. Przy dalszem jeszcze wzmaganiu szybkości widzimy, że okrąg, którego średnica się rozszerza, przechodzi już poza koło stałe, a wymiary jego rosną wciąż dalej, dopóki nie nadajemy maszynie najwyższej szybkości, jakiej dla względów bezpieczeństwa przekraczać już nie należy.

561. Jakżeż to wyjaśnić możemy? Ramię A jest przytwierdzone, a odległość AC zmieniać się nie może, dlatego też A opisuje okrąg stateczny. Ramię B, natomiast, nie jest przytwierdzone, kula B przeto oddalać się

może od *C*; przekonywamy się też, że im szybszy jest obrót, tem dalej ona ustępuje. Im większe koło opisuje *B*, tem bardziej rozciąga się sprężyna i tem większą jest siła, z jaką kula *B* pociągana jest ku środkowi *C*. Doświadczenie to uczy tedy, że siła potrzebna do utrzymania ciała na drodze kołowej wzrasta, gdy szybkość wzrasta.

562. Widzimy stąd, że ruch jednostajny ciała po okręgu koła wywołany być może jedynie przez siłę jednostajną, skierowaną ku środkowi.

Jeżeli ruch, chociażby nawet kołowy, ma prędkość zmienną, prawo siły nie jest tak proste.

563. Za pomocą tegoż samego przyrządu zmierzyć możemy i wielkość siły. Kula *B* waży 50 gramów; przekonywam się zaś, że dla przesunięcia jej do odległości 10 cm. od *C*, to jest, do tejże samej odległości, w jakiej się *A* od *C* znajduje, cisnąć ją muszę siłą 1,5 kg. A zatem, jeżeli średnice okręgów, po których kule się poruszają, są równe, siła dośrodkowa wynosi 1,5 kg., jest przeto mniej więcej trzydzieści razy większa od siły ciężkości.

564. Konieczność siły dośrodkowej daje się w następny sposób wykazać. Wyobraźmy sobie, że ciężar przywiązany do nitki obraca się po okręgu koła, którego część przedstawia fig. 75 (str. 330). Dajmy, że ciężar jest w *S* i posuwa się ku punktowi *P*, w którym poprowadźmy styczną do okręgu. Obierzmy na okręgu dwa punkty, *A* i *B*, bardzo bliskie punktu *P*, a drobny łuk *A B* nie odstępuje wyraźnie od części *A B* linii stycznej; a zatem, gdy poruszająca się cząstka przybywa do *A*, jest rzeczą obojętną, czy posuwa się po łuku *A B*, czy

wzdłuż prostej AB. Dajmy, że porusza się w kierunku tej linii prostej. Według pierwszego prawa ruchu cząstka, poruszająca się po linii prostej, posuwać się będzie

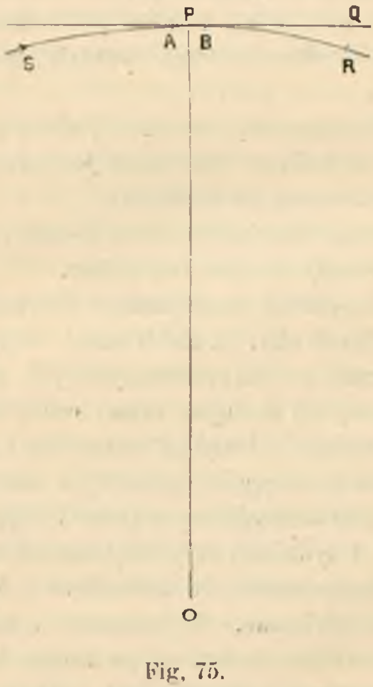

Fig. 75.

dalej w tymże kierunku; gdyby więc cząstka była swobodna, posunęłaby się do Q; nie ma wszakże swobody poruszania się do Q i znajduje się w R. Musiała więc być od kierunku prostolinijnego usuniętą działaniem pewnej siły.

565. Siła ta dostarczana jest za pośrednictwem nitki, do której ciężar jest przyczepiony. Bezustanne odstępowanie ciężaru od ruchu prostolinijnego wymaga ciągłego działania siły, która jest zawsze skierowana ku środkowi. Jeżeli nitka zostaje wypuszczoną, ciało odbiega dalej w kierunku stycznej do okręgu koła w punkcie, który ciało zajmowało w chwili wypuszczenia nitki.

566. Siła dośrodkowa wzrasta w stosunku kwadratu z prędkości. Jeżeli podwajam szybkość, z jaką ciężar obracany jest po okręgu koła, powiększam czterokrotnie siłę, jaką nitka wywierać musi na ciało. Jeżeli prędkość wzmaga się trzykrotnie, siła powiększa się dziewięć razy, i tak dalej. Jeżeli prędkości, z jakiemi dwie równe masy toczą się po dwu kołach, są równe, siła dośrodkowa w kole mniejszem jest większa od siły dośrodkowej w kole większem, w stosunku promienia koła większego do promienia koła mniejszego.

Wpływ ruchu obrotowego na ciecze.

567. Mam tu drobny kubeł, prawie całkowicie wodą wypełniony, do jego zaś rękojeści przywiązana jest nitka. Gdy obracam kubeł wokoło w płaszczyźnie pionowej dostatecznie szybko, widzicie, że woda nie wypływa, chociaż kubeł zwrócony jest górną stroną ku dołowi raz podczas każdego obrotu. Pochodzi to stąd, że woda nie ma *czasu* opadać w ciągu tak krótkiej chwili. W ciągu dwudziestej części sekundy ciało, wyprowadzone ze

stanu spoczynku, nie przebiega nawet piętnastu milimetrów.

568. Wpływ ruchu obrotowego na ciecze wykazać można doświadczeniem przedstawionem na fig. 76.

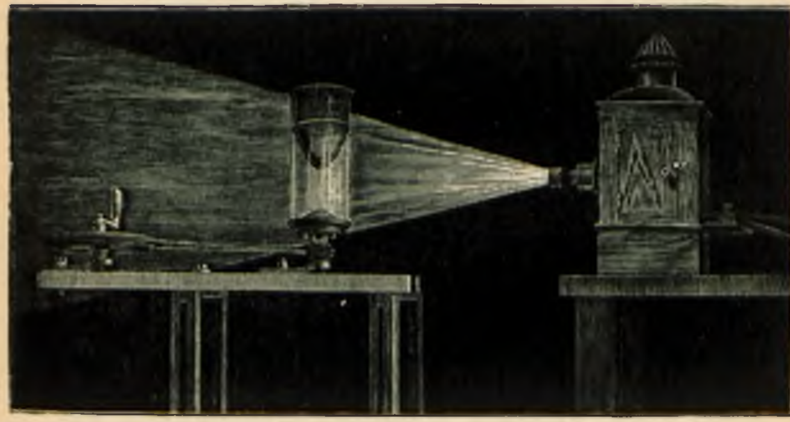

Fig. 76.

Puhar szklany, do połowy mniej więcej napełniony wodą, osadzony jest tak, że może być wprawiany w szybki ruch obrotowy. Ruch ten otrzymuje za pośrednictwem wielkiego koła, poruszanego korbą, jak widzimy na rycinie. Skoro się obrót rozpoczyna, dostrzegamy, że woda podnosi się w górę obok ściany szklanej, tworząc zagłębienie wpośrodku.

569. Aby uwidocznić to dobrze, zwracam na naczynie smugę światła Drummonda. W wodzie rozpuściłem poprzednio drobną ilość chininy, światło zaś lampy przechodzi przez grubą płytę szkła niebieskiego. Gdy

światło tak zabarwione pada na roztwór wodny chininy, ciecz ta świeci blaskiem niebieskawym. Szczególna ta własność chininy, zwana fluorescencyą, dozwala nam widzieć wyraźnie zagłębienie wywołane przez obrót.

570. Dostrzegamy, że gdy szybkość obrotu staje się większą, zagłębienie się wzmaga, a gdy obracam koło dostatecznie prędko, woda wyrzuconą zostaje z naczynia. Postać, jaką powierzchnia wody przybiera, jest taka, jakaby się utworzyła przez obrót *paraboli* dokoła jej osi.

571. Wyjaśnienie tego jest proste. Skoro tylko naczynie zaczyna się obracać, tarcie ścian jego nadaje rychło wodzie ruch wirowy; ale w tym razie nie ma tu żadnej zawady, którąby powstrzymywała cząstki blisko środka, jak to sprawia nitka przy obrocie ciężaru, ciecz więc podnosi się na ścianach szklanki.

572. Możecie wszakże zapytać, dlaczego *wszystkie* cząstki wody nie przechodzą ku obwodowi, pokrywając w takim razie wewnętrzną stronę ściany naczynia walcem wydrążonym, gdy tymczasem tworzą postać paraboli. Dzieje się to dlatego, że układ taki nie mógłby istnieć w cieczy poddanej działaniu ciężkości. Dolne części walca znosić muszą ciśnienie górnych warstw wody, a stąd mają silniejszą dążność do spłaszczania się, aniżeli części wierzchnie. Dążności tej przezwyciężyć nie może jakikolwiek wpływ ruchu, wpływ bowiem ten jest jednaki na wszystkie części wody, znajdujące się w tej samej od osi odległości.

573. Bardzo piękne doświadczenie w celu badania obrotu cieczy, usuniętej od wpływu ciężkości, obmyślił Plateau.

Przyrząd do doświadczeń tych służący przedstawiony jest na fig. 77. Szklane naczynie sześcienne, o kra-

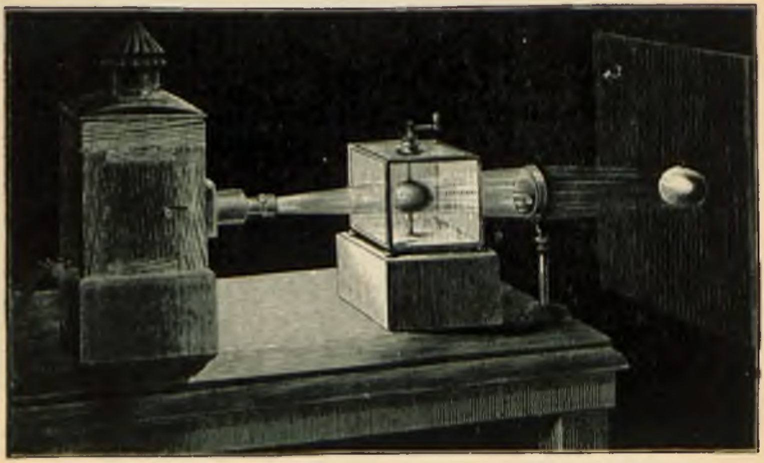

Fig. 77.

wędzi 20 cm., napełnione jest mieszaniną alkoholu z wodą. Ilości obu tych cieczy tak winny być ustosunkowane, by mieszanina miała tenże sam ciężar właściwy, co oliwa, która jest cięższa od alkoholu, a lżejsza od wody. Dokładne wszakże przygotowanie cieczy takiego składu okazuje się tak trudnem praktycznie, że najlepszą drogą jest przyrządzenie dwu mieszanin alkoholowych, tak, że oliwa na jednej z nich właśnie co pływa, w drugiej zaś właśnie co tonie. Dolna część naczynia zapełnia się mieszaniną gęstszą, górna zaś połowa lżejszą. Jeżeli wtedy wprowadzimy ostrożnie oliwę za pomocą lejka, utworzy ona wpośrodku naczynia piękną kulę, jak widzimy na rycinie. Jak więc poznajemy stąd, masa ciekła, oswobodzona od wpływu przyciągania ziemskiego, przyjmuje postać kulistą, a to wskutek wzajemnego przyciągania się jej cząstek.

Przez ciecz przechodzi oś pionowa, opatrzona w połowie swej długości w mały krążek, dokoła którego kulka oliwy rozkłada się sama symetrycznie. Do końca osi przytwierdzona jest korba. Gdy korbę obracamy zwolna, tarcie krążka i osi nadaje ruch wirowy kulce oliwy. Mamy więc tu sferoidalną masę cieczy, obdarzoną ruchem wirowym, możemy tedy badać wpływ ruchu na jej postać. Widzimy najpierw, że kula spłaszcza się na swych biegunach, a nabrzmiewa na swym równiku. Aby zjawisko to wszyscy zobaczyć mogli, nie zbliżając się do stołu, rzucam obraz kuli na ekran za pomocą smugi światła i soczewki. Obraz ten ukazuje się najpierw jako żółte koło; następnie zaś, skoro się obrót rozpoczyna, koło przeobraża się stopniowo w elipsę. Bardzo uderzająca zmiana następuje, gdy korbę obracamy nieco prędzej. Elipsoida spłaszcza się stopniowo coraz bardziej, aż wreszcie, przy pewnej szybkości obrotu, ciecz przerywa się przy biegunach i odpływa ze wszech stron od osi. Ostatecznie zaś przybiera ciecz postać zupełnego pierścienia, którego obraz na ekranie przedstawia fig. 78.

Fig. 78.

574. Wyjaśnienie rozwoju pierścienia wymaga kilku uwag

dodatkowych. Gdy kulka oliwy wiruje w cieczy, ruch jej powierzchni doznaje opóźnienia z powodu tarcia, tak, że gdy szybkość dochodzi do pewnego stopnia, części wewnętrzne kuli, pozostające w sąsiedztwie z osią, odrzucane są od środka między części zewnętrzne. Pełnego wszakże przebiegu tego zjawiska wyłożyć tu nie możemy.

575. Ziemia, jak się zdaje, była pierwotnie w stanie płynnym. Posiadała przytem, jak i teraz posiada, obrót dobowy, a ruch ten obrotowy sprowadził słabe nabrzmienie jej na równiku, zupełnie w ten sposób, jak kulka oliwy nabrzmiała w podobnychże warunkach.

576. Ciała, znajdujące się na ziemi, wirują codziennie po wielkiem kole. Gdyby więc nie istniała siła, pociągająca je ku środkowi, odbiegłyby po stycznych. Część przyciągania ziemskiego zużywa się na ten cel, część zaś pozostała, stanowiąca ciężar pozorny ciał, zmniejsza się stąd o pewną ilość, która wzrasta od bieguna aż do równika (ust. 86).

Zastosowania ruchu obrotowego.

577. Zasady te znajdują różne zastosowania w sztukach mechanicznych; przytoczymy tu dwa z nich. Pierwszem jest regulator w maszynie parowej, drugiem sposób rafinowania cukru.

Gdy motor wprawia w ruch pewną liczbę maszyn w wielkiej fabryce, winien on działać jednostajnie. Nieregularności ruchu sprowadzać mogą stratę i różne zakłócenia. Motor zaś może działać nieregularnie bądź z powodu zmian w wytwarzaniu się pary, albo z powodu żądań, by pracował ze zmiennem natężeniem. Chociażby pierwsze z tych źródeł nieregularności usunięte było starannie, rzecz jasna, że drugiego tak usunąć niepodobna. Niektóre maszyny w młynie mogą być niekiedy zatrzymywane, inne znów tylko w pewnym czasie w ruch wprawiane, motor zaś w ogólności usiłuje poruszać się tem prędzej, im mniejszą wykonywać ma pracę. Konieczna przeto wprowadzić środki, któreby utrzymywały szybkość w ciasnych granicach, a nadto jest oczywiście pożądanem, by przyrządy do celu tego zastosowane działać mogły automatycznie czyli samodzielnie. Potrzebne nam są, jednem słowem, urządzenia, któreby dopuszczały większą ilość pary do cylindra, gdy motor porusza się zbyt wolno, mniejszą zaś ilość pary, gdy porusza się zbyt szybko. Klapa przeto, która dopływ pary reguluje, winna być poruszana przez pewien czynnik, który sam od szybkości motoru zależy; wskazuje to zarazem, że odwołać się należy do ruchu obrotowego, siła bowiem przez ciało wirujące wywierana od prędkości jego zawisła. Taki to ciąg rozumowań doprowadził do szczęśliwego wynalazku regulatora odśrodkowego, wskazanego na fig. 79 (str. 338).

A B jestto oś pionowa, wprawiana w obrót przez motor, opatrzona w osadę *P P*, silnie do niej przytwierdzoną i która się wraz z nią obraca. *P W*, *P W* są to ramiona zakończone kulami żelaznemi *W W*, zwykle bardzo ciężkiemi; ramiona obracać się mogą swobodnie na osiach osadzonych w *P P*. Przy *Q Q* umieszczone są pierścienie, połączone z inną osadą *R R*, która może się swobodnie przesuwać w górę i na dół, wzdłuż pręta *A B*. Gdy więc oś ta wiruje, kule *W* i *W* oprowadzane są dokoła, a stąd odbiegają na zewnątrz od osi, przyczem oczywiście pociągać muszą w górę osadę *R R*. Pojąć zaś łatwo możemy urządzenie, któreby zamykało lub otwierało klapę dopuszczającą parę, stosownie do tego, czy osada *RR* się podnosi, czy też obniża. Zadanie jest więc rozwiązane, gdy bowiem motor zaczyna biedz zbyt prędko, kule odbiegają dalej, tak samo, jak to się działo na fig. 74; ruch zaś ten pociąga w górę osadę *R R*, co zmniejsza dopływ pary, a tem samem zwalnia szybkość. Gdy natomiast motor działa zbyt wolno, kule opadają ku dołowi osi *A B*, osada *R R* schodzi niżej, klapka się otwiera i dopuszcza obfitszy dopływ pary. Zarzucać można regulatorowi temu, że miarkuje wprawdzie, ale nie znosi zupełnie nieregularności. Istnieją wszakże i inne regulatory, niekiedy stosowane, polegające również na ruchu obrotowym; niektóre z nich bardziej są czułe,

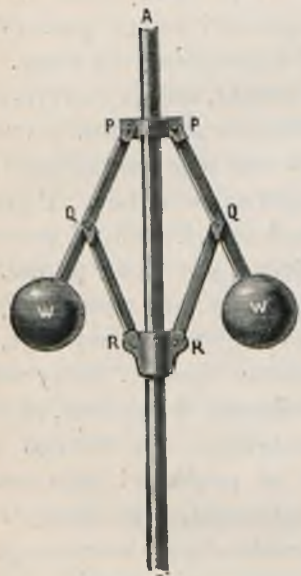

Fig. 79.

aniżeli opisany tu regulator, ale są to maszyny zawiłe, w wyjątkowych tylko używane okolicznościach.

578. Zastosowanie ruchu obrotowego do rafinowania cukru jest wynalazkiem bardzo pięknym; aby je wyjaśnić, należy nam krótko proces rafinowania opisać.

Cukier surowy rozpuszczony jest w wodzie, roztwór zaś ten oczyszcza się cedzeniem i filtrowaniem przez węgiel zwierzęcy. Syrup poddaje się następnie gotowaniu. Dla zachowania barwy cukru i uchronienia od strat gotowanie dokonywa się w próżni, w takim bowiem razie temperatura potrzebna do zagotowania cieczy jest niższa, aniżeli pod zwykłem ciśnieniem atmosferycznem.

Gdy parowanie jest ukończone, kryształy tworzą się w całej masie syrupu. Należy teraz kryształy te od cieczy oddzielić, a do roboty tej używa się pomocy ruchu obrotowego. Pewną ilość mieszaniny wprowadza się do wielkiego walca żelaznego, którego ściany pokryte są drobnemi otworkami. Walec ten wprawia się w obrót nader szybki, a wtedy zawartość jego odrzuconą zostaje natychmiast ku obwodowi, przyczem części ciekłe znajdują ujście przez otworki ścian, kryształy wszakże pozostają w walcu. Następnie dolewa się do cukru, gdy ten wiruje, niewielką ilość jasnego syrupu, który spłukuje z kryształów ostatnie ślady cieczy zabarwionej i wydostaje się przez otworki; gdy ruch się kończy, wnętrze walca zawiera warstwę zupełnie czystego i białego cukru, o kilku calach grubości, gotowego do handlu.

579. Obrót wirowy wybornie się do celu powyższego nadaje, każda bowiem cząstka usiluje tak daleko usuwać się od osi, ile to jest tylko możebne. Działanie

to wywiera na cukier wpływ zgoła odmienny, aniżeliby się działo, gdyby masa poddaną była ciśnieniu za pośrednictwem prasy szrubowej, lub innego podobnego urządzenia. Cząsteczki, bezpośrednio ciśnienia tego doznające, musiałyby je przenosić na cząstki dalsze, a skutkiem tego, gdy kryształy w częściach zewnętrznych ulegałyby skruszeniu i zniszczeniu, woda niedostatecznie tylko mogłaby się z wnętrza wydobyć; pozostałaby przeto ukrytą w odstępach międzycząsteczkowych, które się utrzymują pomimo ciśnienia.

580. Przy ruchu natomiast obrotowym woda uchodzi nie dlatego, by miała być przez kryształy wytłaczana, ale dla własnej bezwładności; może zaś być zupełnie usuniętą przy szybkości obrotu, która nie wystarcza jeszcze do wywołania ciśnienia tak znacznego, by krystały mogły się nawzajem uszkodzić.

Osie trwałe.

581. Pozostały nam do rozważenia niektóre jeszcze ciekawe własności ruchu obrotowego. Rozpatrzymy je za pomocą przyrządu fig. 80 (str. 341). Składa się on z dwu kół *B* i *C*, dających możność udzielania znacznej szybkości osi poziomej. Oś ta wprawia w obrót koło pionowe *D*, które ze swej strony wprawia w obrót kółko poziome, posiadające oś pionową *F*. Maszyna porusza się za pośrednictwem korby *A*, przedmiot zaś poddawany doświadczeniu zawiesza się na osi *F*.

582. Biorę najpierw krążek drewniany o średnicy 40 cm., posiadający otworek, wywiercony na brzegu;

w otworku przywiązany jest sznur, którym krążek przyczepiony być może do osi *F*. Krążek zwiesza oczywiście w płaszczyźnie pionowej.

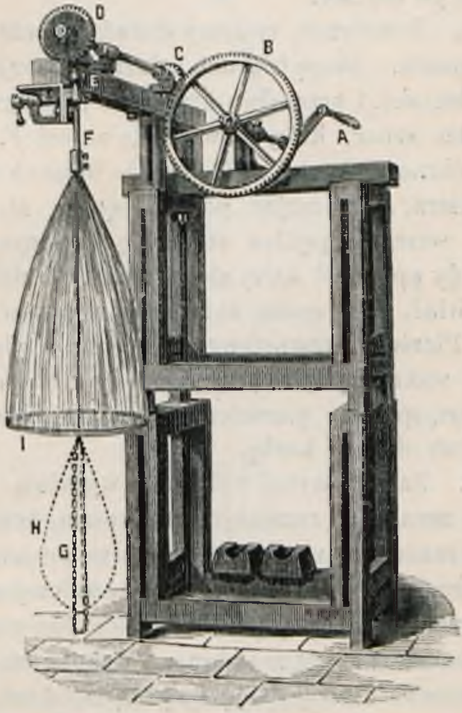

Fig. 80.

583. Wprawiam teraz korbę w obrót powolny, a dostrzegacie, że krążek zaczyna wirować dokoła osi pionowej; gdy wszakże prędkość wzrasta, ruch staje się nieco chwiejnym, a wreszcie, gdy korbę obracam bardzo

szybko, krążek przeskakuje nagle do położenia poziomego, tak, że przybiera pozór jakby powierzchni stołu; sznur wiruje dokoła w powierzchni stożkowej tak szybko, że trudno go dojrzeć.

584. Powtórzyć możemy doświadczenie to w inny jeszcze sposób. Biorę łańcuch żelazny *G*, mający około 60 cm. długości, i przez dwa krańcowe jego ogniwa przeprowadzam sznur, który zawieszam na osi *F*. Gdy zaczynam obracać korbę, widzicie, że łańcuch stopniowo się roztwiera, przyjmując postać pętlicy *H*; gdy zaś szybkość wzrasta, pętlica staje się zupełnym pierścieniem. Gdy prędkość dalej się wzmaga, pierścień zaczyna się chwiać, aż wreszcie układa się w płaszczyźnie poziomej. Pierścień utworzony z łańcucha w płaszczyźnie poziomej wskazany jest przy *I*. Gdy ruch bardziej się jeszcze przyspiesza, pierścień kołysze się gwałtownie, przestaję też obracać korbę.

585. Zasady wyżej wyłożone wyjaśnią nam uderzające te rezultaty; rozważymy tu zresztą tylko zachowanie się łańcucha, wytłomaczy nam to bowiem zarazem i ruchy krążka drewnianego. Rozpoczniemy od chwili, gdy łańcuch zwiesza pionowo. Skoro się ruch rozpoczyna, łańcuch zaczyna się obracać dokoła osi pionowej; części łańcucha usuwają się na zewnątrz od osi, zupełnie jak usuwa się na zewnątrz kula na fig. 74, a to jest przyczyną postaci pętlicowatej, jaką łańcuch przybiera. Gdy szybkość wzrasta, pętlica otwiera się stopniowo coraz bardziej, tak samo, jak średnica koła fig. 74 powiększa się wraz z szybkością. Należy nam wszakże zbadać przyczynę osobliwej zmiany, jakiej położenie łańcucha

ulega; nie wiruje już bowiem dalej dokoła osi pionowej, ale układa się w płaszczyźnie poziomej. Zrozumiemy to łatwo przy pomocy fig. 81. Niech *O P* przedstawia

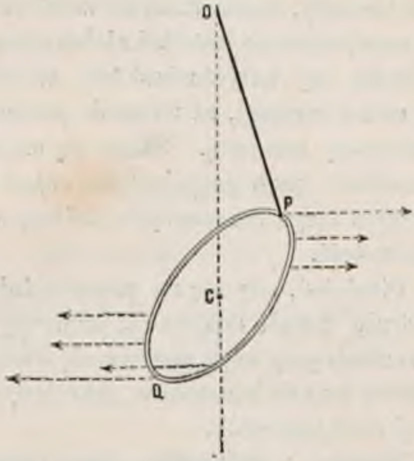

Fig. 81.

sznur przywiązany do łańcucha, *O C* zaś niech będzie osią pionową. Dajmy, że pierścień obracał się dokoła osi *O C*, gdy *O C* była średnicą; jeżeli wtedy, dla jakiegokolwiek powodu, pierścień uległ drobnemu przemieszczeniu, dostrzegamy łatwo, że ruch obrotowy dążyć będzie do dalszego usuwania pierścienia od płaszczyzny poziomej. Niech pierścień znajduje się w położeniu, przedstawionem na figurze; wtedy, ponieważ wiruje dokoła linii pionowej *O C*, części jego *P* i *Q* dążą do oddalania się na zewnątrz w kierunku strzałek, a to zmierza oczywiście do sprowadzenia pierścienia na płaszczyznę poziomą.

586. W ust. 103 wyjaśniliśmy, co rozumiemy przez równowagę stałą i niestałą; poznaliśmy tu analogiczny zupełnie objaw w ruchu. Obrót pierścienia dokoła jego średnicy jest niestały, najdrobniejsze bowiem odchylenie pierścienia z tego położenia jest dlań niebezpieczne; okoliczności kombinują się natychmiast tak, że odchylenie to wzmaga się coraz bardziej, aż wreszcie pierścień podnosi się na płaszczyznę poziomą. Skoro się na płaszczyźnie poziomej znajdzie, ruch jego jest już odtąd stały, gdy bowiem pierścień ulega przesunięciu, usiłuje na płaszczyznę poziomą wrócić.

587. Pierścień, gdy się na płaszczyźnie poziomej znajduje, wiruje trwale dokoła osi pionowej, przez środek jego przechodzącej; oś ta nazywa się trwałą, w różnicy od wszelkich innych kierunków, jako jedyna tylko oś, dokoła której ruch jest stały.

588. Możemy z łańcuchem inne jeszcze okazać doświadczenie, jeżeli, zamiast przeprowadzać sznur przez końcowe ogniwa, przesuwam go przez środek łańcucha, tak, że końce łańcucha zwieszają ku dołowi. Obracam korbę, a natychmiast części łańcucha usuwają się na zewnątrz, tworząc postać skrzywioną; gdy zaś szybkość wzrasta, części łańcucha układają się prawie w linję prostą.

WYKŁAD XVIII.

Wahadło proste.

Wstęp. — Wahadło kołowe. — Zależność trwania wachnięcia od długości. — Oznaczenie siły ciężkości za pomocą wahadła. — Cykloida.

WSTĘP.

589. Jeżeli ciężar przywiązany jest do nitki, której drugi koniec zawieszony jest w punkcie nieruchomym, mamy to, co się nazywa wahadłem prostem. Wahadło jest przyrządem nader ważnego znaczenia zarówno w nauce, jak i dla praktycznego zastosowania do mierzenia czasu. W wykładzie bieżącym i następnym zajmiemy się ogólnemi jego własnościami, wykład zaś ostatni poświęcimy praktycznym jego zastosowaniom. Rozpoczniemy od wahadła prostego, wyżej określonego, i wyprowadzimy doświadczalnie godną uwagi własność, wykrytą przez Galileusza. Wahadło proste nazywa się też niekiedy wahadłem kołowem.

Wahadło kołowe.

590. Poddamy najpierw doświadczeniu wahadło znacznej długości. Nasza sala wykładowa jest na 9,75 m. wysoka, od sufitu zaś zwiesza drut o długości 8 m., który na drugim swym końcu dźwiga kulę z żelaza lanego, ważącą 12 kg. Drut ten, gdy pozostaje w spoczynku, wisi pionowo w kierunku *O C* (fig. 82).

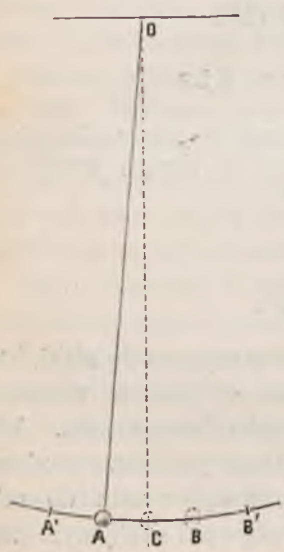

Fig. 82.

Usuwam kulę z położenia jej równowagi do *A*. Gdy ją wypuszczam, wraca ona zwolna do pierwotnego swego położenia *C*; następnie zaś porusza się dalej na drugą stronę do *B* i wraca znów do mej ręki przy *A*. Kula — albo, mówiąc ściślej, środek kuli — porusza się po okręgu koła, mającego środek w punkcie *O* na suficie, gdzie drut jest zawieszony.

591. Jakaż przyczyna powoduje ruch wahadła, skoro ciężar swobodnie jest puszczony? Jest nią siła ciężkości; przesuwając bowiem kulę do *A*, podnoszę ją nieco, a zatem, skoro ją wypuszczam, ciężkość znagla ją do powrotu do *C*, zawieszenie zaś dozwala jej w ten tylko sposób opadać. Gdy wszakże dosięgła już pierwotnego swego położenia w *C*, dla-

czegóż dalej ruch swój przedłuża? Dlatego, że ciężkość działa na kulę i podczas jej wędrówki od *C* do *B*. Wyjaśnia nam to pierwsze prawo ruchu (ust. 485). Przebiegając od *A* do *C*, nabyła kula pewnej szybkości, ma tedy dążność do dalszego posuwania się, a dopiero w czasie, gdy przybywa do *B*, siła ciężkości zatrzymuje jej szybkość i zaczyna ją do powrotu zmuszać.

592. Widzimy, że kula porusza się wciąż w jedne i drugą stronę przez czas długi, wahając się, czyli oscylując, jak się mówić zwykło. W samej rzeczy, wahałaby się już do nieskończoności, gdyby nie było oporu powietrza i gdyby nie zachodziła pewna strata energii w punkcie zawieszenia.

593. Przez czas wachnięcia czyli trwanie wachnięcia rozumieć będziemy przeciąg czasu, jakiego wahadło potrzebuje na przejście od *A* do *B*, bez drogi powrotnej. Trwanie wachnięcia długiego naszego wahadła wynosi prawie trzy sekundy.

594. Co się tyczy czasu wachnięcia, zawdzięczamy Galileuszowi ważne odkrycie. Poznał on mianowicie, że, czyto wahadło kołysze się po łuku *A B*, czy też zostało usunięte do punktu *A'* i stąd opisuje łuk *A' B'*, czas wachnięcia pozostaje niemal jednakim. Łuk, po jakim się wahadło kołysze, nazywa się jego obszernością czyli amplitudą, powyższą więc prawdę wyrazić możemy twierdzeniem, że *czas wachnięcia jest prawie niezależny od obszerności.* Sposób, w jaki Galileusz to wykazał, z trudnością zapewne mógłby być w czasach nowszych przyjętym. Dozwolił on wahadłu wykonać pewną liczbę wachnięć, dajmy 100, po łuku *A B*, i liczył uderzenia

swego tętna w ciągu tegoż czasu; odchylił następnie wahadło dalej od jego położenia równowagi i policzył znowu uderzenia tętna, podczas gdy wahadło zakołysało się 100 razy po łuku *A' B'*, a przekonał się, że liczba uderzeń tętna w obu razach była jednaka. Przyjmując, co prawdopodobnie miało miejsce, że tętno Galileusza biło jednostajnie podczas tego doświadczenia, rezultat ten uczy, że wahadło potrzebuje takiegoż samego czasu na dokonanie 100 drgań, czyto buja po łuku *A B*, czy też po łuku *A' B'*. Odkrycie to dopiero nasunęło pomysł użycia wahadła, jako sposobu mierzenia czasu.

595. Przyjmiemy tu inną metodę do wykazania, że trwanie wachnięcia od obszerności jego nie zależy. Urządzenie nasze przedstawia fig. 83 (str. 349). Składa się ono z dwu wahadeł *A D* i *B C*, z których każde ma 4 m. długości, a zawieszonych w dwu punktach *A* i *B*, o 3 decymetry mniej więcej między sobą oddalonych, na tejże samej linii poziomej. Każde z tych wahadeł dźwiga ciężar jednakiej wielkości, są więc zupełnie identyczne.

596. W każdą rękę ujmuję jednę z tych kul. Jeżeli każdą z nich usuwam z położenia równowagi na odległość jednakową i razem je wypuszczam, obie kule wracają do rąk mych w tejże samej chwili. Tego mogliśmy oczekiwać z powodu tożsamości warunków.

597. Usuwam teraz ciężar *C* prawą ręką na odległość 3 dm., ciężar zaś *D* ręką lewą na odległość 6 dm., i wypuszczam je współcześnie. Cóż się dzieje? Trzymam swe ręce statecznie w temże samem położeniu i przekonywam się, że oba ciężary wracają do nich w tejże samej chwili. Jakkolwiek zatem jeden z tych cięża-

rów przebiegał obszerność 6 dm. ($C\,E$), drugi zaś obszerność 12 dm. ($D\,F$), czasy zużyte przez każdy z nich na

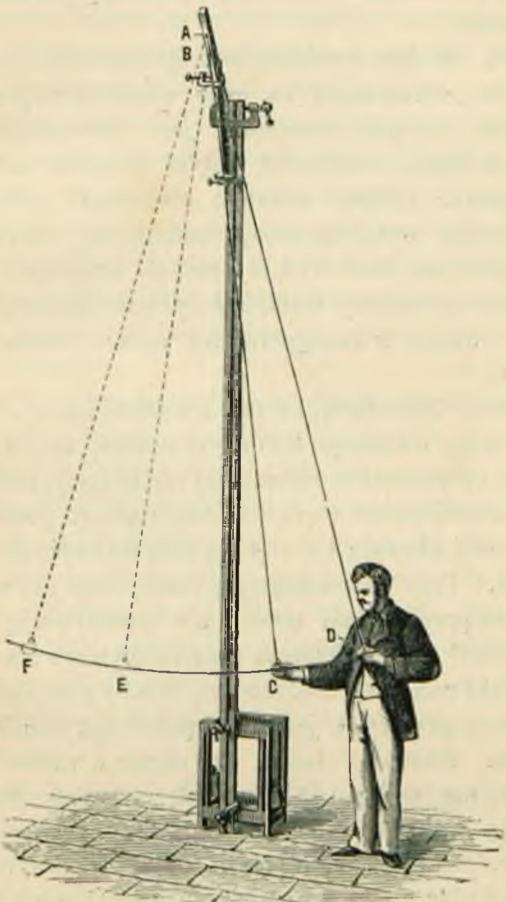

Fig. 83.

dokonanie dwu wachnięć były jednakie. Jeżeli kulę ręki prawej usuwam na 9 dm., gdy kulę ręki lewej tylko na 3 dm. od położenia równowagi, otrzymuję jeszcze tenże sam rezultat.

598. W dwu wachnięciach nie dostrzegamy żadnego wpływu obszerności na czas, możemy więc słusznie powiedzieć, że gdy obszerność jest niewielkim tylko ułamkiem długości wahadła, wpływ jej zgoła jest niedodostrzegalny. Gdyby wszakże obszerność jednego wahadła bardzo była znaczna, poznalibyśmy, że czas jego wachnięcia jest nieco większy aniżeli drugiego, chociaż wykazanie tej różnicy wymagałoby sprawdzenia bardzo czułego. Jedno z następstw tej uwagi podamy dalej (ust. 655).

598*. Zasada ta, zwana izochronizmem albo równoczesnością wachnięć, tem się tłomaczy, że gdy wahadło dalej od położenia równowagi odchylamy, naruszamy niejako silniej prawa ciężkości, która przeto gwałtowniej wpływ swój ujawnia i z większą siłą wahadło do powrotu znagla. Przy znaczniejszem odchyleniu ma wahadło dłuższą do przebieżenia drogę, ale przebywa ją też prędzej, aniżeli drogę krótszą przy odchyleniu mniejszem, tak, że łuki rozmaitej obszerności, byleby nie przekraczające pewnej granicy, w jednakim przebiega czasie.

599. Zbadamy teraz, czy ciężar u wahadła przywieszony ma wpływ jakikolwiek na czas drgnięcia. Używając wahadeł 4-metrowych fig. 83, zawieszam ciężar 6 kg. na jednym, a ciężar 8 kg. na drugim haku. Usuwam każdy z nich jedną ręką, wypuszczam je następnie, a wracają do rąk mych w tej samej chwili. Czyto

usuwam ciężary o łuki długie, czy też o łuki krótkie, równe czy też nierówne, powracają niezmiennie razem, oba przeto posiadają jednaki czas wachnięcia. Stosując inne ciężary żelazne, potwierdzamy toż samo prawo, wnosimy więc stąd, że, podobnie jak czas wachnięć niezależny jest od obszerności, tak też niezależny jest i od ciężaru.

600. Zobaczmy wreszcie, czy materyał wahadła wpływać może na czas wachnięcia. Zawieszam kulę drewnianą na jednym drucie, żelazną zaś na drugim; wprawiam je w ruch wahadłowy, jak poprzednio, a drgania dokonywają się jeszcze w czasach równych. Kula ołowiana kołysze się w tymże samym czasie, co kula mosiężna, obie zaś w tymże samym czasie, co kula żelazna lub drewniana.

601. Przypomina nam to doświadczenia nad działaniem siły ciężkości, które nam wykazały, że wszystkie ciała spadają na ziemię w równych czasach, jakiejkolwiek są wielkości, lub z jakichkolwiek materyałów. Oba te objawy prowadzą nas do wniosku, że siła ciężkości działa na wszystkie ciała proporcyonalnie do ich masy, chociaż składają się z różnych substacyj. Za pośrednictwem właśnie doświadczeń z wahadłem wykazał Newton, że ciężkość posiada tę własność, która jest jedną z najbardziej uderzających praw przyrody.

Prawo tyczące się zależności czasu wachnięcia od długości.

602. Widzieliśmy, że czas wachnięcia czyli czas drgnięcia danego wahadła nie zależy ani od jego obszerności, ani od materyału, ani też od ciężaru; wypada nam tedy zbadać jeszcze, od czego czas ten *zależy*. Zależy

on od długości wahadła. Jeżeli wahadło jest krótsze, czas wachnięcia jest mniejszy. Drogą doświadczalną wykryjemy związek, zachodzący między czasem a długością liny, na której wahadło jest zawieszone.

603. Mam tu (fig. 84) dwa wahadła AD, BC,

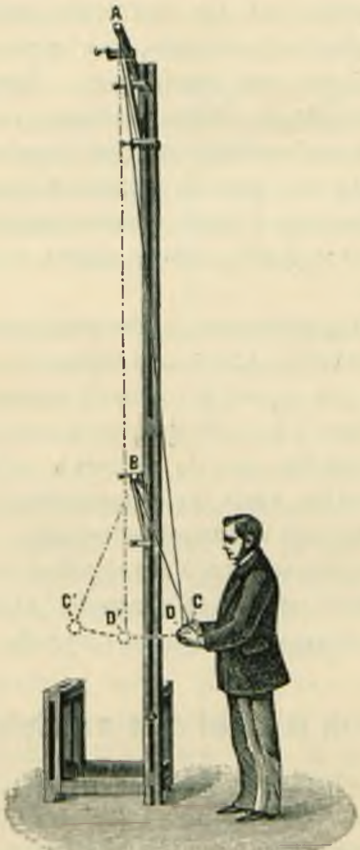

Fig. 84.

z których jedno ma 4 m., a drugie 1 m. długości; zawieszone są jedno obok drugiego, ciężary zaś przypadają w jednakiej odległości od podłogi. W każdą rękę ujmuję jeden z tych ciężarów i usuwam je do jednakiej odległości od położenia równowagi. Wypuszczam kule te jednocześnie; *C* porusza się prędzej, przybywa do końca *C'* swej drogi, gdy *D* dobiega zaledwie do *D'* i wraca do mej ręki w chwili właśnie, gdy kula *D* ukończyła jedno drgnięcie. Nie chwytam kuli *C*, wymyka się więc znowu i wraca w tejże chwili, gdy *D* dobiega do mej ręki. Kula *C* ukończyła przeto cztery wachnięcia, podczas gdy kula *D* wykonała ich dwa tylko. Dowodzi to, że gdy długość jednego wahadła wynosi tylko czwartą część długości drugiego, czas wachnięcia wahadła krótszego jest dwa razy mniejszy, aniżeli wahadła dłuższego.

604. Powtórzymy toż samo doświadczenie z wahadłem innem, mającem 9 m. długości, zawieszonem u sufitu, i drgania jego porównamy z drganiami wahadła, na 1 m. długiego. Usuwam ciężary na jednę stronę i wypuszczam je, jak poprzednio, a widzicie, że krótkie wahadło wróciło już dwa razy do mej ręki, gdy długie jest jeszcze nieobecne; ale, jeżeli rękę swą trzymam wciąż w jednem miejscu przez cały ciąg doświadczenia, wahadło długie wraca wreszcie współcześnie z trzecim powrotem wahadła krótszego. Poznajemy więc, że wahadło mające 9 m. długości łoży trzy razy więcej czasu na dokonanie jednego drgnięcia, aniżeli wahadło 1-metrowe.

605. Długości trzech wahadeł, z któremi prowadziliśmy doświadczenia, są w stosunku liczb 9 : 4 : 1; czasy zaś wachnięć są proporcyonalne do liczb 3 : 2 : 1,—

poznajemy zatem, że *trwanie wachnięcia jest proporcyonalne do pierwiastku kwadratowego z długości wahadła.*

606. Czas wachnięcia zależeć wszakże musi i od ciężkości, wahadło bowiem kołysze się jedynie pod wpływem siły ciężkości. Widoczna, że gdyby się siła ciężkości zwiększyła, wszystkie ciała spadałyby ku ziemi więcej niż o 5 metrów w ciągu pierwszej sekundy. Podobnież i kula wahadła, pod wpływem zwiększonej siły ciężkości, poruszałaby się prędzej od D do D' (fig. 84), trwanie zatem wachnięcia uległoby zmniejszeniu.

Rachunki wykazały, a rezultaty potwierdziło doświadczenie, że czas wachnięcia wyraża się wzorem:

$$\text{czas} = 3{,}1416 \sqrt{\frac{\text{długość}}{\text{siła ciężkości}}}.$$

607. Dokładna wartość natężenia siły ciężkości w Warszawie jest 9,81195; czas przeto wachnięcia wahadła pewnej długości wynosi $1{,}003 \sqrt{\text{długość}}$, długość zaś wahadła sekundowego, to jest wahadła, którego wachnięcie trwa sekundę, wynosi w Warszawie 0,994 metra.

Oznaczenie siły ciężkości za pomocą wahadła.

608. Wahadło nastręcza dogodny sposób mierzenia siły ciężkości. Widzieliśmy, że czas wachnięcia wyrażony być może przez długość i siłę ciężkości; nawzajem więc, jeżeli długość i czas wachnięcia są znane, oznaczyć można siłę ciężkości, a mianowicie ze związku

$$\text{siła ciężkości} = \text{długości} \times \left(\frac{3{,}1416}{\text{czas}}\right)^2.$$

609. Czasu jednego wachnięcia z koniecznym stopniem ścisłości oznaczyć niepodobna; dajmy jednak, żeśmy obserwowali znaczną liczbę wachnięć, niech będzie 100, i oznaczyli czas potrzebny do ich wykonania, a możemy stąd otrzymać czas jednego wachnięcia, dzieląc cały ten okres przez 100. Obszerności wachnięć mogą się zmniejszać, dokonywają się wszakże w jednakim czasie; jeżeli zatem jesteśmy pewni, żeśmy nie popełnili błędu przechodzącego jednę sekundę w ciągu całego czasu obserwacyi, to czas jednego wachnięcia nie może być dotknięty błędem, przewyższającym 0,01 sekundy. Biorąc pod uwagę większą jeszcze liczbę wachnięć, możemy trwanie wachnięcia oznaczyć ze ścisłością jak największą; ta zatem część badań znacznej trudności nie przedstawia.

610. Należy wszakże oznaczyć i długość wahadła, a to jest zadaniem daleko mozolniejszem. Wahadło idealne, którego długość jest tu żądana, składa się, jak przyjmujemy, z nici nader cienkiej, doskonale giętkiej, a dźwigającej na końcu punkt ciężki, nieposiadający wielkości dostrzegalnej; wahadło takie bardzo się wszakże różni od wahadła, jakiem się posługiwać musimy. Nie jesteśmy pewni ścisłego położenia punktu zawieszenia, a chociażby nawet ciężar przez nas użyty był doskonałą kulą, odległość między jej środkiem a punktem zawieszenia nie jest tąż samą rzeczą, co długość wahadła prostego, któreby się z niem kołysało jednocześnie. Dla tych okoliczności zmierzenie wahadła połączone jest ze znacznemi trudnościami; zdołano je wszakże pokonać me-

todami genialnemi, które opiszemy w wykładzie następnym.

611. Wykonamy tu jednak, w sposób bardzo prosty, doświadczenie dla oznaczenia siły ciężkości. Mamy tu nitkę jedwabną, zawieszoną przez przytwierdzenie między dwiema osadami drewnianemi. Do jedwabnej tej nitki przyczepiona jest kulka z żelaza lnnego, mająca 6,44 cm. w średnicy. Odległość od punktu zawieszenia nitki aż do kulki, zmierzona jak najstaranniej, wynosi 61,14 cm. Odległość od punktu zawieszenia aż do środka kulki czyni przeto 64,36 cm.; długość wszakże wahadła idealnego, któreby z tem wahadłem kołysało się równocześnie, jest prawie o 0,08 cm. większa, wynosi tedy 64, 44 cm.

612. Skoro w ten sposób znamy już długość wahadła, oznaczyć teraz winniśmy trwanie wachnięcia. Do celu tego użyjemy zegara, który może być zatrzymany natychmiast, za dotknięciem małego guziczka; zegar ten wskazuje czas z przybliżeniem do jednej piątej sekundy. Koniecznie nadto zważać należy, by wahadło bujało się w małym łuku, inaczej bowiem drgania jego nie będą ściśle izochroniczne. Dostateczną zupełnie obszerność otrzymujemy, dozwalając kuli przesuwać się w jednę i drugą stronę o dwa lub trzy centymetry.

613. Aby ruchy wahadła obserwować łatwo, osadziłem małą lunetę, przez którą widzieć mogę górną część kuli. W okularze lunety rozciągnięty jest drucik pionowy, a każde wachnięcie liczę właśnie w chwili, gdy nitka jedwabna przechodzi przez drucik pionowy. Wziąwszy zegar w rękę, wypowiadam głośno położenie jego

skazówek i spoglądam przez lunetę. Widzę, jak wahadło zwolna przesuwa się w jednę i drugą stronę, schodząc się za każdym drgnięciem z drucikiem pionowym; w pewnej chwili, gdy właśnie schodzi się z drucikiem, naciskam guzik i zatrzymuję zegar. Dozwoliłem wahadłu wykonać 300 drgnięć, a gdy nitka po raz trzechsetny doszła do drucika pionowego, zatrzymałem nagle zegar. Widzę, że od początku obserwacyi do chwili zatrzymania zegara upłynęło 240,6 sekund. Aby uniknąć błędu, powtarzam to doświadczenie, które wydaje tenże sam rezultat: wykonanie 300 wachnięć wymagało znowu 240,6 sekund.

614. Jest rzeczą pożądaną, by drgania liczone były od chwili, gdy wahadło znajduje się w połowie swej drogi, a nie wtedy, gdy przybywa do jej kresu. W pierwszym bowiem razie wahadło porusza się z szybkością większą, chwila zatem zgodności nitki jedwabnej z drucikiem pionowym uchwycona być może ze szczególną dokładnością.

615. Trwanie jednego wachnięcia otrzymamy tedy, dzieląc 240,6 przez 300, co daje 0,802 sekundy. Tak oznaczony przeciąg czasu dokładny jest niewątpliwie z przybliżeniem do tysiącznej części sekundy. Wnosimy tedy, że wahadło o długości 0,644 m. kończy swe drgnięcie w ciągu 0,802 sekundy, a stąd otrzymujemy, że siła ciężkości w Warszawie wynosi $0{,}644 \times \left(\frac{3{,}1416}{0{,}802}\right)^2 = 9{,}880$, Rezultat ten jest nieco większy od liczby podanej wyżej, a oznaczonej z badań ściślejszych.

Inną metodę mierzenia siły ciężkości za pomocą wahadła opiszemy w wykładzie następnym (ust. 637).

Cykloida.

616. Jeżeli obszerność drgań wahadła kołowego jest znaczną w stosunku do jego długości, czyli do promienia, czas wachnięcia staje się nieco większym, aniżeli przy obszerności małej. Zasada równoczesności czyli izochronizmu wachnięć rzetelną jest tylko przy łukach drobnych.

617. Istnieje wszakże linija krzywa, mająca tę własność, że poruszające się po niej ciało wykonywa swe wachnięcia w czasie zawsze jednakim, jakąkolwiek byłaby obszerność. Krzywa ta nazywa się *cykloidą*. Jest to droga, jaką opisuje gwóźdź wbity w koło, gdy koło to toczy się po ziemi. Tak, mianowicie, jeżeli koło toczy się poniżej linii $A\ B$ (fig. 85), punkt jej okręgu opisuje cykloidę $A\ D\ C\ P\ B$. Dolna część tej linii krzywej nie

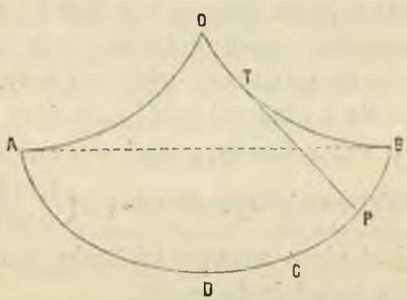

Fig. 85.

odstępuje znacznie od okręgu koła, którego środkiem jest pewien punkt *O*, powyżej tej krzywej.

618. Dajmy, że mamy drut, zgięty starannie w postać krzywej cykloidalnej, *A D C P B*, i że po drucie tym ślizgać się może *bez tarcia* pierścień, a przekonalibyśmy się, że, czyto pierścień ten spadłby od punktu *C*, *P* czy też *B*, dobiegałby do *D* w jednakim zawsze czasie, a następnie posuwałby się po drucie na drugą stronę punktu *D* do takiej od niego odległości, z jakiej został pierwotnie opuszczony. W wahaniach po cykloidzie obszerność jest bez żadnego zgoła wpływu na trwanie wachnięć.

619. Ponieważ drut bez tarcia jest niemożliwy, metody tej użyć niepodobna; możemy wszakże zbudować wahadło cykloidalne inną drogą, korzystając z pewnej własności tej krzywej. Linia *O A* (fig. 85) jest połową cykloidy; w samej rzeczy, *O A* jest zupełnie tąż samą krzywą, co *B D*, ale umieszczoną w innem położeniu, jak również i *O B*. Jeżeli nitka długości *O D* zawieszona jest w punkcie *O* i dźwiga ciężarek do niej przyczepiony, ciężarek ten opisywać będzie cykloidę pod warunkiem, że nitka sama nawijać się będzie na łuki *O A* i *O B*; tak mianowicie, że gdy ciężarek przesunął się od *D* do *P*, nitka jest nawinięta wzdłuż krzywej na przestrzeni *O T*, a tylko część *T P* jest swobodna. Urządzenie takie zmusza zawsze punkt *P* do poruszania się po łuku cykloidalnym.

620. Mamy tedy możność sprawdzenia doświadczalnego, czy rzeczywiście czas wachnięcia po cykloidzie jest niezależny od obszerności. Do celu tego posłuży

nam przyrząd, przedstawiony na fig. 86. *D C E* jest łuk cykloidy; w punkcie *O* przywiązane są dwie nitki, utrzymujące równe ciężarki *A* i *B*; *C* jest najniższym punktem

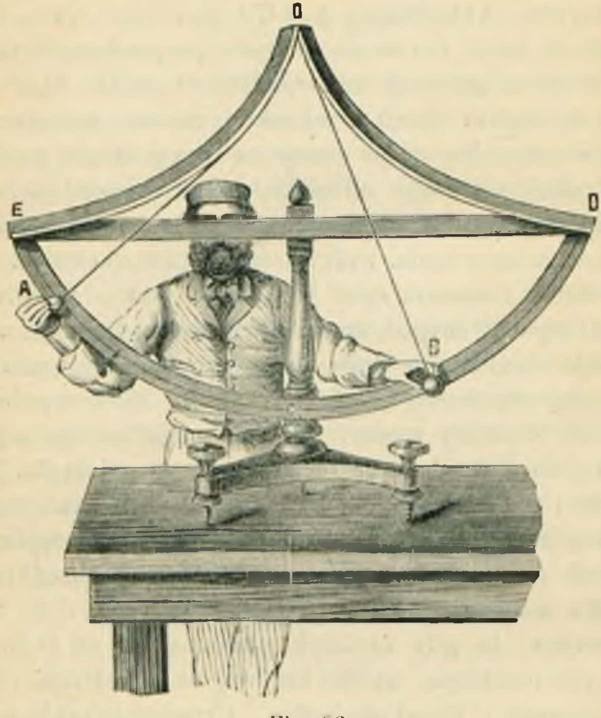

Fig. 86.

krzywej. Przeciąg czasu, jakiego potrzebuje ciężarek *A* do przebieżenia łuku *A C* jest oczywiście połową czasu wachnięcia. Jeżeli tedy wykazać zdołam, że ciężarki *A* i *B* łożą czas jednaki na spadek do *C*, potwierdzę, że drgania są izochroniczne czyli równoczesne.

621. Trzymając więc, jak wskazuje rycina, kulkę *A* w jednej, a kulkę *B* w drugiej ręce, wypuszczam je współcześnie, a dostrzegacie, że obie spotykają się w *C*; chociaż nawet sprowadzam kulkę *A* aż do *E*, a kulkę *B* utrzymuję nisko, tuż w pobliżu *C*, rezultat jest jednaki. Ruch kulki *A* jest tak szybki, że przybywa do punktu *C* w tymże samym czasie, co kulka *B*. Gdy obie kulki sprowadzam na jednę stronę punktu *C* i wypuszczam je współcześnie, *A* dosięga *B* w chwili, gdy właśnie przechodzi przez punkt *C*. We wszelkich zatem okolicznościach czasy spadku są równe.

622. Należy zwrócić jeszcze uwagę, że nitka utrzymująca kulkę *B*, w położeniu wskazanem na rycinie, jest prawie tak swobodną, jak gdyby zawieszoną była jedynie w punkcie *O*; wtedy bowiem tylko, gdy kulka przypada w znaczniejszej odległości od punktu najniższego, łuki boczne wywierają wpływ wyraźny na skrzywienie nici. Kulka więc od *B* do *C* kołysze się prawie po okręgu koła, którego środek przypada w *O*. Dlatego to w wahadle kołowem drgania o drobnej obszerności są równoczesne, w tym bowiem razie cykloida i okrąg koła zbiegają się niemal zupełnie.

WYKŁAD XIX.

Wahadło złożone i składanie drgań.

Wahadło złożone. — Środek wachnięć. — Środek uderzenia. — Wahadło stożkowe. — Składanie drgań.

623. Zajmowaliśmy się dotąd wahadłem prostem, składającem się z ciężarka i z nici; należy nam teraz rozpatrzeć ruch wahadłowy i w innych formach. Jakiekolwiek ciało, wirować mogące dokoła osi, wprawione być może w ruch wahadłowy działaniem siły ciężkości. Ciało w ten sposób drgające nazywa się *wahadłem złożonem.* Forma idealna wahadła, polegająca na ciężarku nieskończenie małym, przyczepionym do nitki doskonale giętkiej i nieważkiej, jest abstrakcyą, która w sposób tylko przybliżony naśladowaną być może w rzeczywistości. Wypływa stąd, że każde wahadło, do doświadczeń naszych użyte, jest, ściśle mówiąc, złożonem.

624. Pierwszem wahadłem tej kategoryi, jakie tu przytoczymy, jest wahadło zastosowane w zwykłych zegarach (fig. 87). Składa się ono z pręta drewnianego lub stalowego *A B*, do którego przyczepiona jest soczewka mosiężna lub ołowiana. Wahadło to zawieszone jest za pośrednictwem sprężyny stalowej *CA*, która, jako bardzo giętka, dozwala wahadłu wykonywać ruchy ze znaczną swobodą. Znaczenie szruby, znajdującej się na końcu, wyjaśnimy w ust. 664. Wahadło takie drga izochronicznie, gdy obszerność jest mała; niełatwo wszakże oznaczyć ściśle, jaką jest długość wahadła prostego, któreby się równocześnie z niem kołysało. Przedewszystkiem pozostajemy w niepewności co do właściwego punktu zawieszenia, sprężyna bowiem, jakkolwiek giętka, nie poddaje się w punkcie *C* również łatwo, jak nitka; dlatego też właściwy punkt zawieszenia przypadać musi cokolwiek poniżej *C*. Koniec drugi bardziej jest jeszcze niepewny, ciężar bowiem nie jest tu pojedynczym tylko punktem i nie przypada nadto wyłącznie w sąsiedztwie soczewki, cały bowiem pręt wahadła posiada masę, której pomijać nie można. Taka przeto

Fig. 87.

postać wahadła nie może być użytą w razach, gdy długość ściśle oznaczona być winna.

625. Gdy długość wahadła ma być zmierzoną, nie można go tedy zawieszać za pośrednictwem sprężyny, ale użyć należy innego sposobu podpory; przy udziale bowiem sprężyny nie mamy oznaczonego ściśle punktu, od którego mierzyć należy. Aby wykazać sposób, jaki tu będzie odpowiedni, biorę pręt żelazny długości 2 m., a w przecięciu mający kwadrat o boku 2 cm., który waży 6 kg. Mamy go zawiesić na jednym końcu tak, aby mógł się kołysać swobodnie, zarazem zaś posiadał stanowczy punkt zawieszenia. Posłużą nam do tego dwa małe graniastosłupy czyli pryzmaty stalowe *E* (fig. 88), przytwierdzone do osady mosiężnej; ściany graniastosłupów zawierają między sobą kąty 60° i tworzą ostrza, dokoła których dokonywają się wahania, osada ta bowiem z ostrzami może być umieszczana na końcu pręta i przytwierdzana do niego dwiema szrubami. Osada daje się łatwo przesuwać, można ją więc przytwierdzać w różnych punktach pręta. W przyrządach, używanych do doświadczeń, wymagających jak największej ścisłości, ostrza przytwierdzone do wahadła opierają się na płytach agatowych; są one doprowadzone do jednej linii poziomej, a wahadło istotnie kołysze się dokoła tej linii, jak doko-

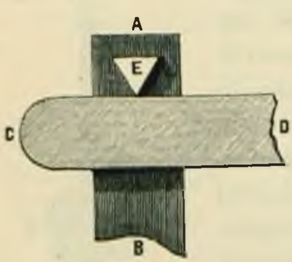

Fig. 88.

la osi. Do celu naszego wystarczy wszakże oparcie ostrzy na płytkach stalowych. *A B*, fig. 88, przedstawia jednę stronę górnej części pręta żelaznego; *E* jestto graniastosłup wysunięty przed pręt i osadzony tak, że ostrze jego jest do pręta prostopadłe. *C D* jestto płyta stalowa, która na górnej swej powierzchni dźwiga to ostrze; płyta ta stalowa jest silnie przytwierdzona do rusztowania, stanowiącego podporę. Po drugiej stronie znajduje się oczywiście podobne urządzenie, na którem się opiera drugie ostrze. Pręt, tak starannie zawieszony, skoro raz w ruch wprawiony zostanie, kołysze się w jednę i drugą stronę przez godzinę, ponieważ tarcie zachodzące między ostrzami a podpierającemi je płytami jest nader słabe.

626. Ogólny widok całego przyrządu, gdy jest złożony, daje fig. 89 (str. 366). *A B* jestto pręt, przy *A* zaś widzimy ostrza, podobnie jak i podpierające je płyty stalowe, które znów wsparte są na belce poziomej, przytwierdzonej do słupów pionowych. Rzut oka na rycinę wyjaśni urządzenia, wprowadzone w celu zapewnienia stateczności przyrządu; widzimy tu przy *B* drugą jeszcze parę ostrzy, których znaczenie podamy za chwilę (ust. 635).

627. Pręt ten, jak widzicie, kołysze się w jednę i drugą stronę; mamy zaś oznaczyć długość wahadła prostego, któreby drgało w jednakim z nim okresie czasu. Długość tę obliczyć możemy według ust. 606, jeżeli oznaczymy najpierw czas wachnięcia. Byłby to zapewne najwłaściwszy sposób postępowania, wolałem tu wszakże przyjąć metodę bezpośrednią, która nie wymaga obliczeń. Wahadło proste, złożone z cienkiego sznurka i drobnej

kulki żelaznej, zawieszone jest poza ostrzem, fig. 89. Punkt, w którym sznurek jest przyczepiony, przypada dokładnie w linii obu ostrzy, a odpowiednie urządzenie dozwala sznurek ten dowolnie przedłużać lub skracać.

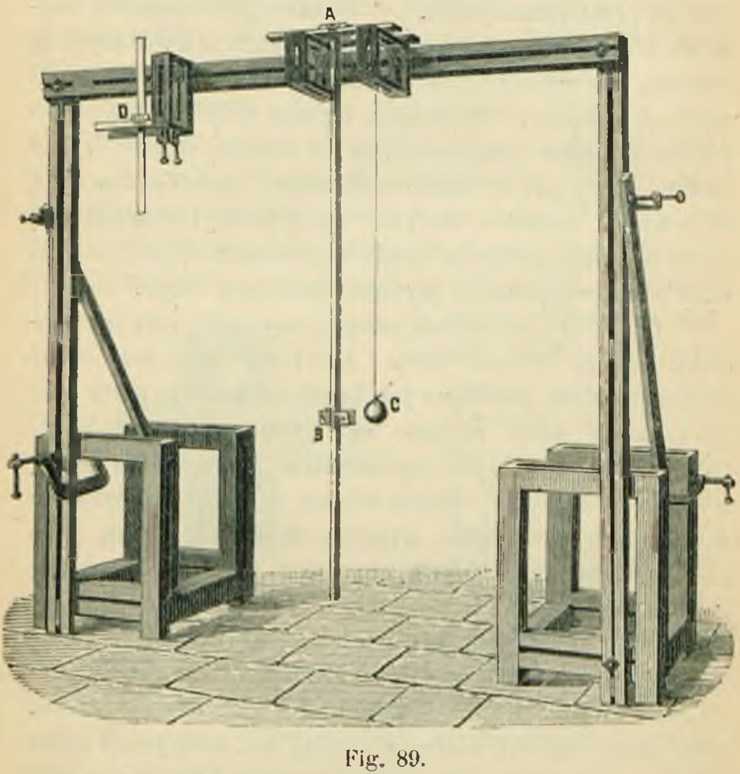

Fig. 89.

628. Poddajemy najpierw próbie sznurek, mający 2 m. długości, tak, by wahadło proste miało długość tęż samą, co pręt. Ujmując tedy kulkę w jedne, a pręt

w drugą rękę, usuwam je na bok, a dostrzegacie, że skoro je wypuszczam, pręt kończy dwa wachnięcia i wraca do mej ręki wcześniej, aniżeli kulka. Długość zatem wahadła prostego, któreby się z prętem tym kołysało równocześnie, jest niewątpliwie od długości tego pręta mniejsza; wahadło bowiem jednakiej z nim długości porusza się zapowolnie.

629. Skracam teraz sznurek tak, że ma tylko połowę długości pręta; powtarzając zaś powyższe doświadczenie, przekonywamy się, że kulka wraca wcześniej aniżeli pręt, wahadło więc proste jest teraz zakrótkie. Poznaliśmy przeto, że żądane wahadło izochroniczne jest większe od połowy długości pręta, a mniejsze od całej jego długości.

630. Nadajmy więc wreszcie wahadłu prostemu długość, równą dwu trzecim częściom długości pręta. Wykonywam doświadczenie, a dostrzegacie, że kulka i pręt wracają do mej ręki ściśle w tejże samej chwili. A zatem dwie trzecie długości pręta dają długość równoczesnego z nim wahadła prostego.

631. Możemy przeto twierdzić w ogólności, że *czas wachnięcia pręta jednostajnego, kołyszącego się dokoła jednego ze swych końców, równa się czasowi wachnięcia wahadła prostego, którego długość czyni dwie trzecie długości pręta.* Zapewne, pręt przez nas użyty nie jest zupełnie jednorodny, a to z powodu dodanych doń ostrzy; przy położeniu wszakże, jakie zajmują, wpływ ich na trwanie wachnięcia jest zgoła nieznaczny.

632. Aby się wszakże zasada ta potwierdzała, potrzeba koniecznie, by ostrza należycie na pręcie umiesz-

czone były; dla przekonania się o tem rozpatrzmy drgania mniejszego pręta, przedstawionego przy *D*. Jestto pręt również żelazny, o wymiarach 60 cm.$\times$1 cm.$\times$1 cm., a zawieszony za pomocą dwu ostrzy w pobliżu swego środka; gdyby ostrza umieszczone były tak, by środek ciężkości pręta przypadał w linii ostrzy, pręt pozostawałby obojętnie w każdem położeniu, jakieby mu nadano, nie wahałby się zatem wcale. Gdy więc ostrza znajdują się bardzo blisko środka ciężkości, pojąć możemy łatwo, że drgania być mogą bardzo powolne, a to się właśnie dzieje z prętem *D*. Przy pomocy zegara, którego bieg zatrzymywać można, znajduję, że pręt ten wykonywa sto drgań w ciągu 248 sekund, każde przeto drgnięcie trwa 2,48 sekundy. Długość wahadła prostego, którego wachnięcie dokonywa się w ciągu 2,48 sekundy, wynosi przeszło 6 m. Gdyby zaś ostrza osadzone były na końcu pręta, długość równoczesnego z nim wahadła prostego wynosiłaby

$$60 \text{ cm.} \times {}^2/_3 = 40 \text{ cm.}$$

Pręt o długości 2 m., jeżeli ostrze znajduje się w odległości 42, 2 cm. od jednego końca, wykonywać będzie swe drgania w czasie krótszym, aniżeli przy umieszczeniu ostrzy w którymkolwiek innym punkcie. Długość odpowiedniego wahadła prostego wynosi 115,5 cm.

Środek wahań.

633. Poznaliśmy więc, że każdemu wahadłu złożonemu odpowiada pewna długość właściwa, równa długości równoczesnego czyli izochronicznego wahadła pro-

stego. Tak, naprzykład, wyżej opisanemu prętowi 2-metrowemu odpowiada wahadło proste długości 1,333 m. Jeżeli odległość tę 1,333 m. odmierzymy od ostrzy i oznaczymy punkt ten na pręcie, to nazywa się on *środkiem wahań*. W ogólności zaś środek wahań otrzymujemy, kreśląc linię równą długości izochronicznego wahadła prostego, od punktu zawieszenia przez środek ciężkości.

634. W pręcie *D* środek wahań przypadałby w odległości 6 m. poniżej ostrzy, a w ogólności położenie środka wahań zmienia się wraz z położeniem ostrzy.

635. W pręcie 2-metrowym jest *B* środkiem wahań. Biorę inną parę ostrzy i umieszczam je na pręcie tak, że linia ostrzy przechodzi przez ten punkt *B*. Zdejmuję teraz pręt ostrożnie i, odwróciwszy go, opieram ostrza *B* na płytach stalowych. W położeniu więc tem jedna trzecia część pręta przypada powyżej osi zawieszenia, a dwie trzecie poniżej. Punkt *A* jest oczywiście teraz na dolnym końcu pręta i przypada w jednym poziomie z kulką *C*; wahadło wprawiamy w ruch drgający dokoła ostrzy *B*, trwanie zaś wachnięcia oznaczyć możemy z przybliżeniem przez porównanie z kulką *C*, jak wyżej wyjaśniliśmy. Gdy więc wprawiam razem w drgania kulkę *C* i pręt, widzę, że wykonywają swe wachnięcia zupełnie w jednakim czasie. Pamiętamy, że gdy kulka zawieszona była na nici, długiej na 133 cm., wahania jej były równoczesne z wahaniami pręta, gdy był zawieszony na ostrzach *A*. Teraz, kulka *C* zmianie żadnej nie uległa, ale pręt kołysze się na osiach *B*, a przekonywamy się, że czas wachnięcia pręta *B* jest pomimo to jeszcze takiż sam, jak kulki *C*. Czy to więc pręt kołysze się

dokoła osi A, czy dokoła osi B, trwanie wachnięcia jest w obu razach jednakie. Gdy tedy pręt drga dokoła A, jego środek wahań oddalony być musi od tego punktu o 133 cm., co znaczy, że przypadać musi w B; gdy zaś pręt zawieszony jest w punkcie B, jego środkiem wahań jest A. Jestto ciekawe twierdzenie dynamiczne. Można je wyrazić treściwiej, że *środek wahań i punkt zawieszenia są to punkty wzajemne.*

636. Jakkolwiek podany tu przez nas dowód tego prawa tyczy się jedynie pręta jednorodnego, jest ono wszakże prawdziwem w ogólności, jakąkolwiek byłaby natura wahadła złożonego.

637. Nadmieniliśmy w poprzednim wykładzie, że dokładne zmierzenie długości wahadła prostego nastręcza znaczne trudności; wzajemność wszakże środka wahań i punktu zawieszenia nasunęła kapitanowi Katerowi pomysł metody, która daje możność unikania tych trudności. Należy nam więc zasadę tę wyjaśnić. Umieśćmy jednę parę ostrzy w A, drugę zaś parę B przesuńmy, jak można najbliżej, do środka wahań. Możemy się przekonać, czy ostrza B umieszczone zostały należycie, przeciąg bowiem czasu, jakiego potrzebuje wahadło do wykonania 100 drgnięć dokoła A, winien być takiż sam, jak przeciąg czasu potrzebny do wykonania 100 drgnięć dokoła B. Jeżeli czasy te nie są zupełnie równe, należy ostrza B zwolna przesuwać, dopóki czasy nie zostaną doprowadzone do równości. Długość zaś izochronicznego wahadła prostego równa się wtedy odległości między ostrzami A i B, a dokładne zmierzenie tej odległości nie przedstawia żadnej z tych trudności, jakie przytoczyliśmy wyżej,

i daje się ściśle przeprowadzić. Skoro zaś znamy długość wahadła i czas jego wachnięcia, obliczyć możemy natężenie siły ciężkości sposobem wyżej podanym (ust. 608).

638. Osadziłem oba ostrza na pręcie 2-metrowym tak blisko środka wahań i środka zawieszenia, jak tylko uczynić to mogłem, i zajmiemy się teraz sprawdzeniem dokładności tych położeń. Zawieszam najpierw pręt na ostrzach *A* i wprawiam go w ruch wahadłowy. Biorę zegar wyżej przytoczony (ust. 612) i notuję położenie jego skazówek. Następnie umieszczam palec swój na guziku i dokładnie w chwili, gdy pręt przypada wpośrodku jednego ze swych wachnięć, zegar puszczam w ruch. Liczę 100 wachnięć, a gdy znowu wahadło znajduje się w połowie swej drogi, zatrzymuję zegar, i widzę, że okazuje on przeciąg czasu 115,9 sekundy. Trwanie przeto jednego wachnięcia wynosi 1,159 sekundy. Odwróciwszy wahadło tak, że teraz kołysze się dokoła poprzedniego środka wahań, liczę wahania w ten sam sposób, co poprzednio, i znajduję, że czas potrzebny na dokonanie 100 wachnięć czyni 115,5 sekundy, trwanie zatem jednego wachnięcia dokoła punktu *B* wynosi 1,155 sekundy. Oba więc te okresy wachnięć są prawie równe, różnią się bowiem zaledwie o $^1/_{250}$ część sekundy.

639. Trudno byłoby doprowadzić czasy wachnięć do zupełnej równości przez samą tylko zmianę położenia ostrzy *B*. W wahadle Katera obie pary ostrzy umieszczają się najpierw tak, aby okresy wachnięć były, o ile można, równe; ostateczne zaś uregulowanie osiąga się przez przesuwanie drobnego ciężarka, osadzonego na

pręcie, dopóki czasy wachnięć dokoła jednego i drugiego ostrza nie okażą się zupełnie jednakowemi. Poprawki tak czułej nie możemy oczywiście użyć w doświadczeniu prelekcyjnem, poprzestaniemy więc na wartości średniej obu liczb otrzymanych, co daje 1,157 sekundy. Odległość obu ostrzy A i B wynosi 1,333 m., siłę przeto ciężkości obliczamy z wyrażenia (ust. 608):

$$1{,}333 \times \left(\frac{3{,}1416}{1{,}157}\right)^2$$

Wyprowadzona stąd wartość wynosi 9,83 m., nieco zatem więcej nad podaną wyżej, rzeczywistą wartość natężenia siły ciężkości w Warszawie.

640. Jeżeli wahadło Katera wyrobione jest z należytemi ostrożnościami, dawać może rezultaty nader dokładne. Jest ono tak uregulowane, by nie dawało wyraźnej różnicy w liczbie wachnięć, dokonanych w ciągu dwudziestu czterech godzin, czy to osią zawieszenia są jedne, czy drugie ostrza; odległość ostrzy oznacza się wtedy z najwyższym stopniem ścisłości, przez porównanie z odpowiednią miarą.

Środek uderzenia.

641. Środek wahań ciała wirującego swobodnie dokoła stałej osi identyczny jest z innym, uwagi godnym punktem, który się nazywa *środkiem uderzenia*. Zbadamy teraz niektóre własności ciała tak zawieszonego, ze względu na skutki uderzenia. W doświadczeniach tych

wszakże metoda zawieszania na ostrzach jest zupełnie nieodpowiednia.

642. Użyjemy najpierw pręta zawieszonego na sztyfcie, dokoła którego może on wirować. *A B*, fig. 90, jestto pręt sosnowy o wymiarach 1,5 m.×2 cm.× 2 cm., mogący się swobodnie obracać dokoła *B*. Dajmy, że pręt ten zwiesza pionowo w spoczynku. Biorąc laskę w rękę, uderzam pręt, a gwałtowne wstrząśnięcie udziela się natychmiast sztyftowi *B*; wpływ wszakże przez to na *B* wywarty będzie bardzo różny, stosownie do miejsca, gdzie pręt trąconym zostaje. Jeżeli uderzam górną część pręta w *D*, pręt ten wywiera na sztyft *B* ciśnienie na lewo; jeżeli uderzam część dolną w *A*, sprowadza to ciśnienie na prawo. Jeżeli zaś uderzam punkt *C*, odległy od *B* o dwie trzecie długości pręta, sztyft żadnego nie doznaje ciśnienia. Jednem słowem, przy uderzeniu poniżej *C* ciśnienie skierowane jest na prawo, przy uderzeniu powżej *C* na lewo, przy uderzeniu zaś na punkt *C* ciśnienie jest żadne.

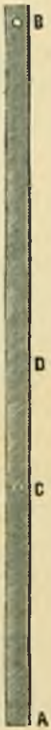

Fig. 90.

643. Sprawdzić możemy to łatwo, trzymając koniec jeden pręta między wskazującym a wielkim palcem lewej ręki i uderzając go w różnych punktach laską trzymaną w ręce lewej; ciśnienie pręta, gdy zostaje uderzonym, tak odczuwać będziemy, że sprawdzić można okoliczności wyżej przytoczone.

644. Rzecz ta wszakże uwidoczni się lepiej drogą wskazaną na fig. 91. *F B* jestto pręt drewniany, zawieszony na belce za pomocą nitki *F G*. Pasek papieru przytwierdzony jest do pręta w *F* za pomocą płytki drewnianej, silnie do pręta przyszrubowanej; końce tego paska papieru są w podobnyż sposób przymocowane do *P* i *Q*.

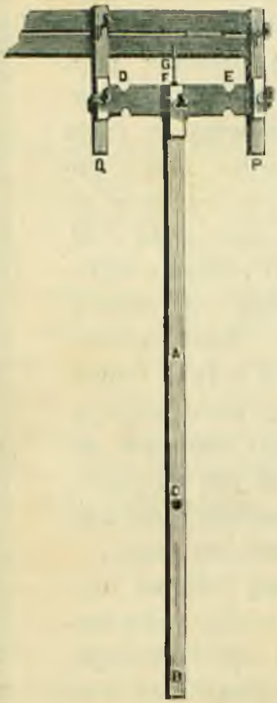

Fig. 91.

645. Gdy pręt doznaje uderzenia z prawej strony w punkcie *A*, widzimy, że papier zostaje rozdarty przy *E*, koniec bowiem *F* przez uderzenie pchnięty został w stronę *Q*, a stąd sprowadził przedarcie papieru w miejscu *E*, gdzie umyślnie był zwężony. Usuwam rozdarty ten pasek i zastępuję go nowym, zupełnie podobnym. Uderzam teraz pręt w *B*,— silny cios jest to wszystko, czego trzeba, — a pasek papieru rozrywa się przy *D*. Zastępując wreszcie szczątki papieru trzecim paskiem, przekonywam się,

że gdy prętowi nadaję uderzenie (niezbyt gwałtowne) w punkcie *C*, pasek nie pęka ani w miejscu *D*, ani w *E*.

646. Punkt ten *C*, w którym pręt doznać może uderzenia tak, że oś, na której jest zawieszony, wstrząśnięciu przytem nie ulega, jest *środkiem uderzenia*. Ponieważ jest on od *F* oddalony o dwie trzecie długości pręta, widzimy, że jest to punkt identyczny ze środkiem wahań pręta, gdy ten drga dokoła ostrzy w *F*. W ogólności też, jakąkolwiek postać ma ciało, środek wahań jest identyczny ze środkiem uderzenia.

647. Zasada, zawarta w tej własności środka uderzeń, znajduje pewne zastosowania praktyczne. Każdy grający w krokieta wie dobrze, że jest pewna część kija jego, od której kula zostaje odrzuconą, nie sprawiając rękom jego uczucia nieprzyjemnego. Wyjaśnienie jest proste. Kij, jestto ciało zawieszone w rękach grającego, gdy więc kula zostaje trąconą przez środek uderzenia kija, nie ulega on wstrząśnięciu. Środek uderzeń młota przypada w młocie samym, a nie w rękojeści, gwóźdź zatem może być gwałtownie uderzonym, a ręka trzymająca rękojeść nie doznaje przytem zgoła przykrości żadnej.

Wahadło stożkowe.

648. Mam tu trójnóg, fig. 92 (str. 376), dźwigający ciężką kulę z żelaza lanego, zawieszonego na nici, mającej 2 m. długości. Gdy kulę tę usuwam z jej położenia równowagi i wypuszczam ją następnie, buja się ona w jednę i drugą stronę, nitka pozostaje wciąż w jednej

płaszczyźnie, a ruch taki zbadaliśmy już poprzednio w wahadle kołowem. Jeżeli wszakże w tejże samej chwili, gdy kulę wypuszczam, nadaję jej słabe trącenie w kie-

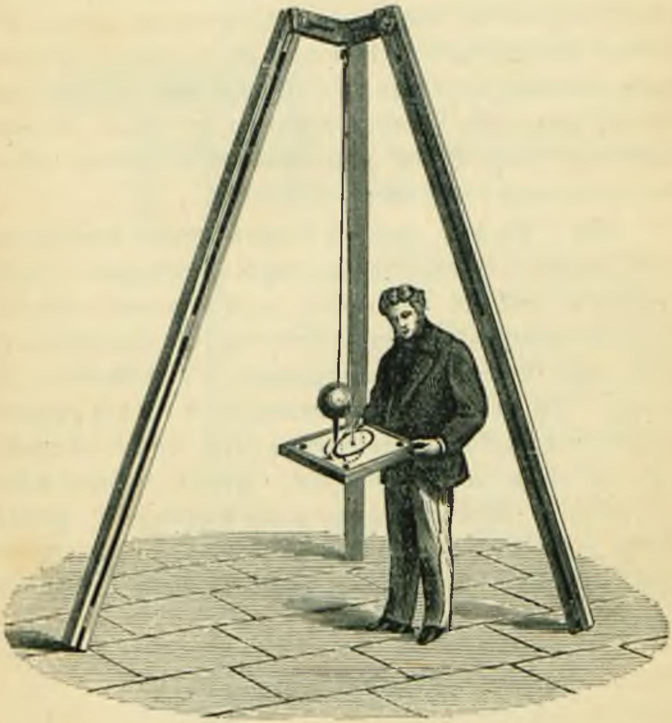

Fig. 92.

runku nieprzechodzącym przez położenie równowagi, kula opisuje drogę krzywą, wracając wciąż do punktu, z którego wytrąconą została. Ruch taki nazywamy ruchem wahadła stożkowego, nitka bowiem utrzymująca kulę opisuje stożek.

649. Aby zbadać naturę tego ruchu, możemy zmusić kulkę, by sama drogę swoję odrysowała. W punkcie kuli, położonym naprzeciwko punktu, gdzie jest zawieszona, wywiercony jest otwór, w którym osadzony jest pendzel z sierści wielbłądziej, napojony atramentem. Pod kołyszącą się kulą umieszczam kartkę papieru na rajsbrecie, a widzicie, że pendzel kreśli elipsę na papierze, który rychło usuwam.

650. Gdy kulę trącam w różny sposób, opisuje ona elipsy, nader różnej postaci, — tu mamy elipsę silnie wydłużoną i wązką, tu zaś inną, prawie kołową. Jeżeli szybkość pierwotna, jaką kuli nadajemy, jest należycie dobrana, a kierunek jej jest prostopadły po promienia, nitka opisuje stożek prosty, kula zaś koło poziome; doświadczenie to udaje się jednak dopiero po kilku próbach starannych. Elipsa może stać się również bardzo wązką, tak, że przez stopniowania nieznaczne przechodzimy do wahadła zwyczajnego czyli kołowego, w którem pendzel kreśli linię prostą.

651. Gdy kula porusza się po kole, prędkość jej jest jednostajna; gdy porusza się po elipsie, prędkość jej jest największa na końcach małej osi tej elipsy, najmniejsza zaś na końcach osi wielkiej; gdy wszakże kula kołysze się w jednę i drugą stronę, jak w zwykłem wahadle kołowem, prędkość jest największa wpośrodku każdego wachnięcia i schodzi do zera oczywiście za każdym razem, gdy wahadło dobiega do kresu swego drgnięcia. Można też przyjąć w ogólności, że przy wszelkich oko-

liczności ach pendzel kreśli elipsę na papierze, okrąg koła bowiem i linia prosta są to tylko przypadki skrajne; koło uważać można za elipsę bardzo zaokrągloną, linię zaś prostą za elipsę nader zwężoną. Jeżeli wszakże łuk wachnięć jest znaczny, ruch nie jest zgoła tak prosty.

652. Czy z eliptycznego tego ruchu zdać możemy sprawę? Aby go wyjaśnić dokładnie, należałoby odwołać się do obliczeń, jakich tu użyć nie możemy, przedstawić jednak możemy w ogólnym rysie źródło tego zjawiska.

Dajmy, że elipsa *A C B D*, fig. 93, jest drogą opisywaną przez cząstkę, zawieszoną za pośrednictwem nit-

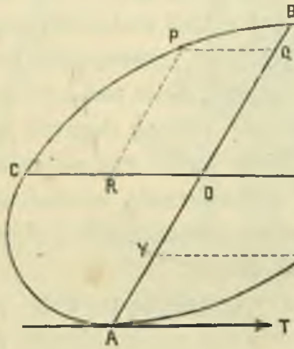

Fig. 93.

ki w punkcie położonym pionowo nad punktem *O*, który jest środkiem elipsy. Aby wywołać ruch ten, usuwam cząstkę z jej położenia równowagi w *O* do punktu *A*. Gdybym ją wypuścił, bez żadnego potrącenia, cząstka drgałaby do *B* i z powrotem znowu do A; nie poprzestaję wszakże na prostem wypuszczeniu, ale nadaję jej prędkość, która ją pędzi w kierunku *A T*. Przez punkt *O* poprowadźmy linię *C D*, równoległą do *A T*. Gdybym był cząstkę pozostawił w punkcie *O*, i, nie usuwając jej wcale z położenia równowagi, trącił ją w kierunku *O D*, cząstka drgałaby bezustannie w jednę i drugą stronę od *C* do *D*. A zatem, gdy wypuszczam cząstkę w punkcie *A* i zarazem nadaję jej prędkość w kierunku *A T*, zaczyna się ona poruszać pod działaniem dwu odrębnych drgań, z których jedno jest równoległe do *A B*, drugie zaś do *C D*; należy nam tedy rozpoznać wpływ obu tych drgań, nadanych współcześnie tejże samej cząstce. Dokonywają się one w jednakim czasie, ponieważ wszystkie drgania są izochroniczne. Winniśmy tedy przyjąć, że ruch jeden wyprowadza cząstkę z punktu *A* ku *O* w tejże samej chwili, gdy ruch drugi zaczyna ją przesuwać od *O* ku *D*. Po upływie krótkiego przeciągu czasu ciało posunęło się o drogę *A Y* w wachnięciu swem ku *O*, a w tymże samym czasie o drogę *O Z* w wachnięciu swem ku *D*; znajduje się przeto w punkcie *X*. A teraz, gdy cząstka posunie się o odległość równą i równoległą do *A O*, znaleźć się musi w punkcie *D*, ruch bowiem od *O* do *D* dokonywa się w tymże samym czasie, co od *A* do *O*. Podobnież musi ciało przejść przez punkt *B*, przeciąg bowiem czasu, wyłożony na przejście jego od *A* do *B*, wystarczyłby też na podróż jego od *O* do *D* i na powrót od *D* do *O*. Cząstka znajduje się dalej w *P*, dlatego, że gdy w ruchu powrotnym od *B* dojdzie do *Q*, ruch w kierunku od *D* do *O* przeprowadzi ją do *R*. W ten sposób przeprowadzić można cząstkę zupełnie dokoła jej drogi przez składanie dwu ruchów. Można zaś dowieść, że przy ruchach drobnych droga ta jest elipsą, opierając rozumowanie na zasadzie, że drgania niewielkiej obszerności są izochroniczne.

653. Ścisły rozbiór nasuwa okoliczność bardzo zajmującą, a łączącą się z temi doświadczeniami. Dostrzedz można mianowicie, że elipsa przez ciało opisana nie zachowuje położenia statecznego, ale przesuwa się stopniowo dokoła na płaszczyźnie. Tak, na fig. 92, elipsa nakreślona przez pendzel zmienia położenie swe stopniowo i przechodzi w elipsę kropkowaną, wskazaną na tejże rycinie. Oś elipsy obraca się w tymże samym kierunku, w jakim się kula porusza. Zjawisko to bardziej jest wybitne przy elipsie, której wymiary są znaczne w stosunku do długości nitki. W samej rzeczy, gdyby elipsa była bardzo drobna, zmiana położenia byłaby niedostrzegalna. Źródłem tej zmiany jest fakt wyżej przytoczony (ust. 598), że drgania wahadła są wprawdzie prawie izochroniczne, ale nie bezwzględnie izochroniczne; drgania po łuku długim wymagają przeciągu czasu nieco dłuższego, aniżeli drgania po łuku krótkim.

Różnica ta staje się wyraźną jedynie, gdy łuk ma wielkość znaczną w stosunku do długości wahadła.

654. Dlaczego okoliczność ta powoduje przesuwanie się elipsy, zrozumieć można z fig. 94 (str. 381). Dajmy, że cząstka opisuje figurę $A\ D\ C\ E$ w kierunku wskazanym przez strzałki. Ruch ten pojmować można, jako złożony z drgań $A\ C$ i $E\ D$, jeżeli wyobrazimy sobie, że cząstka trąconą została w punkcie A, tak, że otrzymała szybkość prostopadłą do $O\ A$. W punkcie A ruch całko-

wity jest chwilowo prostopadły do OA; w samej rzeczy, ruch jest wtedy zależny wyłącznie od drgania ED, nie istnieje zaś ruch równoległy do OA. Określić tedy możemy kraniec większej osi elipsy, jako położenie cząsteczki, gdy ruch równoległy do tej osi schodzi do zera czyli zanika. Tyczy się to oczywiście i drugiego krańca C tej osi, a tak samo i punktów E oraz D, gdzie nie ma ruchu równoległego do ED.

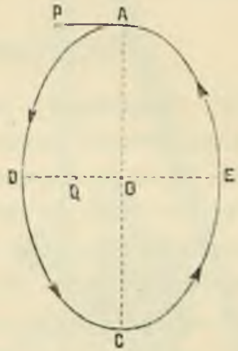

Fig. 94.

655. Idźmy za ruchem cząstki, wyruszającej z A, dopóki nie wróci znowu do tego punktu. Ruch ten składa się z dwu drgań, z których jedno dokonywa się od A do C i w kierunku odwrotnym, drugie zaś wzdłuż ED, od O do D, następnie od D do E, a dalej od E do O, łożąc na bieg ten przeciąg czasu dwa razy większy, aniżeli na jedno drgnięcie od D do E. Gdyby trwanie wachnięcia wzdłuż AC było zupełnie takież samo, jak trwanie wachnięcia wzdłuż ED, oba te wachnięcia doprowadziłyby cząstkę znów do A ściśle w warunkach pierwotnych. Nie zachodzą one wszakże w czasie jednakim; ruch wzdłuż AC trwa cokolwiek dłużej, tak, że gdy ruch równoległy do AC ustaje, ruch wzdłuż DE przekroczył O do punktu Q bardzo bliskiego względem punktu O. Jeżeli $AP = OQ$, to w chwili,

gdy ruch równoległy do *A C* zanika, cząstka znajduje się w *P*; punkt przeto *P* musi być teraz krańcem większej osi elipsy. Za następnym obiegiem kraniec tej osi posunie się nieco dalej, a stąd to elipsa przesuwa się stopniowo dokoła.

Składanie drgań.

656. Poznaliśmy, że ruch eliptyczny wahadła stożkowego uważać można, jako złożony z dwu drgań. Składanie drgań ma znaczną doniosłość, która nas usprawiedliwia, że rzecz tę zbadamy doświadczalnie w inny jeszcze sposób. Przyrząd, którego teraz użyjemy, wskazany jest na fig. 95 (str. 383).

A jestto kula z żelaza lanego, ważąca 10 kg., zawieszona na trójnogu za pośrednictwem sznura, a która ze swej strony znowu służy za podporę dla innego wahadła *B*. Drugie to wahadło jest bardzo lekkie, jestto bowiem tylko kula szklana, napełniona piaskiem. Przez otworek, znajdujący się na spodzie kuli, piasek wysypuje się z niej na rajsbret poniżej umieszczony.

W ten sposób drobny prąd piasku rysuje nam swą podróż nad rajsbretem, a nakreślone tak linie krzywe wskazują drogę, jaką przebiegła soczewka drugiego wahadła.

657. Jeżeli długości obu wahadeł są równe, a drgania ich przypadają w różnych płaszczyznach, krzywa opisana jest elipsą, przechodzącą na granicy jednej w okrąg koła, a na drugiej w linię prostą. Tego moglibyśmy oczekiwać, oba bowiem drgania dokonywają

się w jednakim przeciągu czasu, przypadek ten zatem jest analogiczny z ruchem wahadła stożkowego (ust. 648).

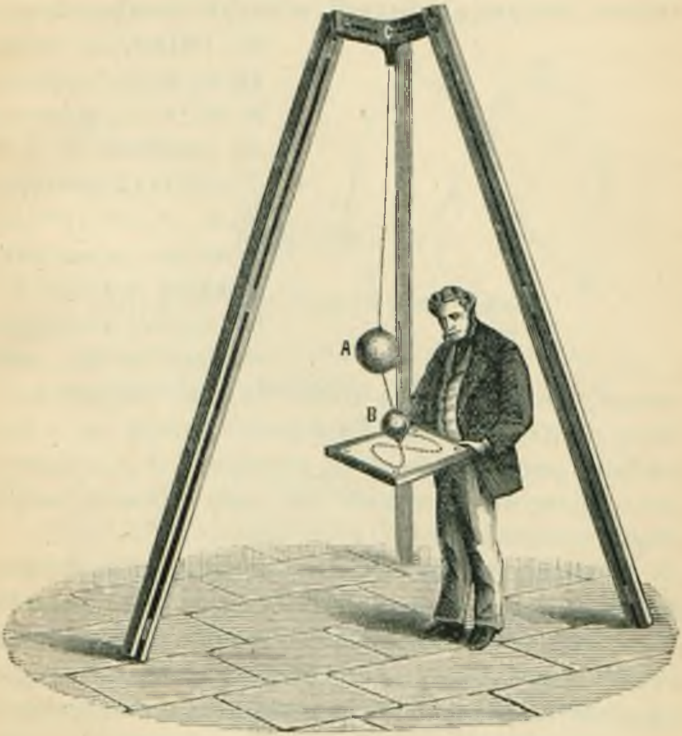

Fig. 95.

658. Linia krzywa przybiera wszakże charakter zgoła różny, gdy sznury są nierówne. Rozbierzmy w szczególności przypadek, gdy wahadło drugie ma długość wyrównywającą czwartej tylko części długości sznura, utrzymującego kulę żelazną. Jestto właśnie doświadcze-

nie przedstawione na fig 95. Postać drogi wypisanej przez piasek widzimy na fig. 96; strzałki oznaczone na krzywej wskazują kierunek, w którym została nakreślona. Dajmy, że tworzenie tej figury rozpoczęło się w A; posuwała się następnie do B, do C, do D i z powrotem do A, — a to przekonywa nas, że soczewka wahadła dolnego wykonała dwa wachnięcia w górę i na dół, podczas gdy soczewka górna ukończyła jedno wachnięcie od strony prawej ku lewej. Ruch przeto składa się z dwu wachnięć nawzajem do siebie prostopadłych, a z których jedno dokonywa się w czasie dwa razy krótszym, aniżeli drugie.

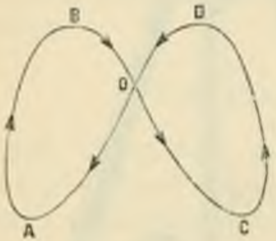

Fig. 96.

Trwanie wachnięcia jest proporcyonalne do pierwiastku kwadratowego z długości, a ponieważ wahadło dolne ma czwartą część długości wahadła górnego, trwanie jego wachnięcia jest dwa razy mniejsze, aniżeli górnego. W doświadczeniu tem mamy przeto potwierdzenie prawa ust. 605.

WYKŁAD XX.

Zasady mechaniczne zegara.

Wstęp. — Wahadło kompensacyjne. — Wychwyt. — Układ kół. — Skazówki. — Mechanizm bijący godziny.

WSTĘP.

659. Przechodzimy teraz do najważniejszego z zastosowań praktycznych wahadła. Ponieważ drgania są wciąż izochroniczne, wypływa stąd, że jeżeli policzymy liczbę wahnięć w ciągu pewnego czasu, oznaczyć możemy trwanie tego przeciągu czasu, jest ono bowiem tylko iloczynem z liczby wahnięć przez okres czyli trwanie jednego wahnięcia. Przyjmujemy wahadło długości 0,994 m., które wykonywa dokładnie jedno drgnięcie w ciągu sekundy w Warszawie i które dlatego nazywa się wahadłem sekundowem (ob. ust. 607). Jeżeli wahadło takie wprawimy w ruch i wprowadzimy mechanizm, któryby dozwolił liczbę wahnięć odczytywać, mamy możność mierzenia czasu. Jestto oczywiście zasada zwy-

kłego zegara, — wahadło kołysze się raz na sekundę, a liczbę wachnięć dokonanych w przeciągu czasu od jednej epoki do następnej podają skazówki zegara. Tak naprzykład, gdy zegar mówi mi, że 15 minut upłynęło, świadczy on w istocie rzeczy, że wahadło wykonało $60 \times 15 = 900$ drgnięć, z których każde obejmowało sekundę.

660. Jednym przeto obowiązkiem zegara jest liczenie i notowanie liczby wachnięć, kółka wszakże i inne jego części mają drugie jeszcze zadanie do spełnienia, a mianowicie podtrzymywać mają ruch wahadła. Tarcie powietrza, zarówno jak i opór doznawany w punkcie zawieszenia, są to siły, które dążą do sprowadzenia wahadła do spoczynku; aby więc przeciwdziałać mogła skutkowi tych sił, maszyna być musi ustawicznie zasilana świeżą energią. Zasiłek ten udziela się za pośrednictwem mechanizmu zegara, który opiszemy tu treściwie.

661. Gdy waga poruszająca zegar pociągniętą zostaje w górę, otrzymuje ona zasób energii, który rozdziela wahadłu w bardzo drobnym impulsie za każdem jego drgnięciem. Waga zegara jest dostatecznie ciężką, by równoważyć mogła siły opóźniające, gdy wahadło posiada należytą obszerność drgań. W każdej maszynie pewna ilość energii traci się na utrzymywanie części w ruchu, wbrew tarciu i innym oporom; w zegarach przedstawia ona pełną wielkość siły, ponieważ tu nie ma pracy zewnętrznej do wykonania.

Wahadło kompensacyjne.

662. Długość wahadła zastosowanego do zegara zależy od celu, do jakiego on służy; aby wszakże działał dokładnie, jest rzeczą konieczną, by wahadło kołysało się w okresach statecznych, drobna bowiem pod tym względem nieregularność może już wyraźnie wpływać na wskazania zegara. Jeżeli wahadło wykonywa swe drgania w ciągu 1,001 sekundy, zamiast jednej sekundy, zegar opóźnia się o tysiączną część sekundy za każdem uderzeniem; ponieważ zaś doba ma 86400 sekund, wypada stąd, że wahadło wykona w ciągu doby tylko 86400—86,4 wachnięć, zegar zatem opóźniać się będzie o 86,4 sekundy, czyli prawie o półtorej minuty dziennie.

663. Dokładny zatem pomiar czasu wymaga niezbędnie, by trwanie wachnięcia pozostawało statecznem. Wiemy wszakże, że trwanie wachnięcia zależy od długości, konieczna zatem, by długość wahadła pozostawała zupełnie niezmienną. Gdyby długość wahadła uległa zmianie choćby o milimetr, zegar spieszyłby się lub opóźniał prawie o minutę na dobę, stosownie do tego, czy wahadło skróciło się, czy też przedłużyło. W ogólności powiedzieć można, że gdy zmiana długości wahadła wynosi n setnych centymetra, liczba sekund, o jakie wskutek tego zegar się przyspiesza lub opóźnia na dobę, wynosi przy wahadle sekundowem $4{,}412 \times n$.

664. Tem się tłomaczy, że potrzeba posuwać w górę soczewkę wahadła, gdy się zegar opóźnia, obniżać ją zaś, gdy się spieszy. Dajmy, że szruba służąca do tego przesuwania ma dziesięć skrętów na centymetrze; wtedy

jeden zupełny obrót szruby podniósłby soczewkę o dziesięć setnych centymetra, co w biegu zegara spowodowałoby zmianę o 4,412 × 10 = 44 sekund przeszło. Bieg zatem dzienny zegara uległby stąd przyspieszeniu lub opóźnieniu o 44 sekund. Jakąkolwiek zaś byłaby szruba, wpływ jej obliczany być może według prostej reguły, jak następuje. Podziel 441,2 przez liczbę skrętów przypadających na jednym centymetrze, a iloraz jest liczbą sekund, o jaką zegar przyspieszy się lub opóźni na dobę za jednym obrotem szruby, służącej do przesuwania soczewki wahadła.

665. Dajmy, że długość wahadła uregulowaną została należycie, a zegar wskazuje tedy czas dokładnie. Konieczna więc, by długość tę wahadło zachowywało niezmiennie; istnieje wszakże przyczyna nieustająca, która sprowadza jej zmianę. Przyczyną tą jest zmienność temperatury. Wykażemy tu przedewszystkiem doświadczalnie znane to powszechnie prawo, że ciała rozszerzają się pod wpływem ciepła; następnie rozważymy, jaką nieregularność powoduje to w ruchu wahadła, a wreszcie wykażemy, w jaki sposób nieregularności te usunąć można skutecznie.

666. Widzimy tu pręt mosiężny, mający metr długości, a który w tej chwili posiada temperaturę pokoju. Gdy ogrzewamy pręt ten nad lampą, staje się on dłuższym, ale po oziębieniu wraca do pierwotnych wymiarów. Zmiany te długości są bardzo drobne, zbyt nawet drobne, by można je było dostrzedz bezpośrednio, chyba przy starannem zmierzeniu; będziemy wszakże mogli wykazać w sposób prosty wydłużenie, jakie następuje wskutek

wzrostu temperatury. Umieszczam pręt ten *A D* na podporach, przedstawionych na fig. 97. Jest on silnie przytwierdzony przy *B* przez nacisk szruby, zupełnie zaś swo·

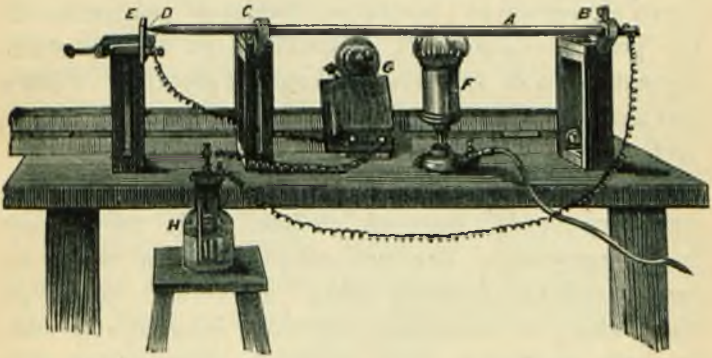

Fig. 97.

bodnie przechodzi przez *C*; jeśli więc pręt wydłuży się gdy zostanie ogrzany lampą, koniec *D* zbliżyć się musi bardziej do *E*. Przy *H* jest stos elektryczny, a *G* jestto dzwonek, dźwięczący pod wpływem prądu elektrycznego. Drut jeden stosu łączy *H* z *G*, drugi łączy *G* z *E*, trzeci zaś łączy *H* z końcem pręta mosiężnego *B*. Dopóki prąd elektryczny nie jest zamknięty, dzwonek milczy; prąd zaś zamyka się, gdy koniec pręta dotyka *E*. Skoro to ma miejsce, prąd płynie od stosu przez pręt, następnie przebiega z *D* do *E*, a stąd przez dzwonek wraca do stosu. Teraz koniec pręta nie jest zetknięty z płytką *E*, chociaż nader blisko do niej przystępuje. W samej rzeczy, skoro naciskam płytkę *E* ku końcowi pręta, słyszycie głos dzwonka, co dowodzi, że obieg prądu jest zamknięty; gdy palec usuwam, brzmienie dzwonka ustaje, *E* bowiem odskakuje i prąd się przerywa.

667. Umieszczam lampę poniżej pręta, który zaczyna się ogrzewać i wydłużać, ponieważ zaś jest on silnie przytwierdzony w *B*, zaostrzony jego koniec zbliża się stopniowo do *E*. Teraz dotknął już płytki *E*, — obieg jest zamknięty, a dzwonek brzmi. Gdy usuwam lampę, pręt stygnie. Oziębianie się jego przyspieszyć mogę, dotykając pręta gąbką zwilgoconą; pręt kurczy się, przerywa obieg prądu i dzwonek cichnie. Gdy znowu pręt lampą ogrzewam, dzwonek odzywa się na nowo, by znów zamilkł przy użyciu gąbki. Jakkolwiek przebiegu tego widzieć nie mogliśmy, uszy nasze zaświadczyły nam, że ciepło wydłużyło pręt, oziębienie zaś wywołało jego skurczenie.

668. Cośmy tu wykazali względem pręta mosiężnego, dzieje się również z prętem z każdego innego materyału; a zatem, z jakiejkolwiek substancyi wyrobione jes wahadło, pręt jego, jeżeli nie posiada odpowiedniego urządzenia, musi być dłuższy w powietrzu ciepłem, aniżeli w zimnem. Ztąd zegar w ogólności ma dążność do chodu szybszego w zimie, aniżeli w lecie.

669. Stopień wywołanej tem zmiany jest, co prawda, bardzo drobny. Przy wahadle o pręcie stalowym różnica między temperaturą letnią a zimową sprowadziłaby zmianę pięciu sekund na dobę, czyli około pół minuty na tydzień. Błąd stąd pochodzący nie ma wielkiego znaczenia w zegarach, służących do użytku zwykłego; w zegarach wszakże astronomicznych, w których sekun-

dy lub nawet ułamki sekund mają ważne znaczenie, niedokładności takiego stopnia nie mogą być dopuszczane.

670. Są, co prawda, niektóre substancye, jak drzewo zwyczajne, naprzykład, które rozszerzają się słabiej, aniżeli stal; chwiejność zatem, wprowadzona przez zastosowanie wahadła o pręcie drewnianym, będzie mniejszą, aniżeli przy wahadle stalowem; nie znamy wszakże zgoła substancyi, któraby nie powodowała zmian znaczniejszych, aniżeli dopuszczane być mogą przy budowie zegara astronomicznego.

Należy nam przeto wprowadzić sposoby, któreby dozwoliły usunąć wpływ temperatury na długość wahadła. Z różnych metod, które obmyślono, opiszemy tu jedne z najlepszych i najprostszych.

671. Wahadło rtęciowe fig. 98 (str. 392) jest często używane w czasomierzach znacznej dokładności. Pręt, na którym wadadło jest zawieszone, jest ze stali, soczewkę zaś stanowi naczynie szklane, w części wypełnione rtęcią. Odległość środka ciężkości rtęci od punktu zawieszenia może być praktycznie przyjmowaną za długość wahadła. Stopień rozszerzalności rtęci jest mniej więcej szesnaście razy większy, aniżeli stali; jeżeli przeto soczewka utworzoną jest ze słupa rtęci, wynoszącego ósmą część długości pręta stalowego, kompensacya jest zupełną. Dajmy bowiem, że temperatura wahadła wzrasta, pręt zatem stalowy wydłuża się, a naczynie zatem obniża; z drugiej wszakże strony słup rtęci rozszerza się o wysokość podwójną względem wydłużenia pręta stalowego, a stąd środek ciężkości słupa rtęci wzniesie się w górę o ty-

leż, o ile się stal wydłuża. Ostatecznie zatem środek ciężkości rtęci, dla własnej jej rozszerzalności, wzniesie się o tyleż, o ile się obniża wskutek rozszerzalności stali, właściwa tedy długość wahadła pozostaje niezmienną. Urządzenie to czyni czas wachnięcia niezależnym od temperatury. Soczewkę wahadła rtęciowego przedstawia fig. 98. Szruba służy do podnoszenia lub obniżania całego naczynia z rtęcią, by ruch wahadła uczynić prawidłowym przy pierwszem uregulowaniu.

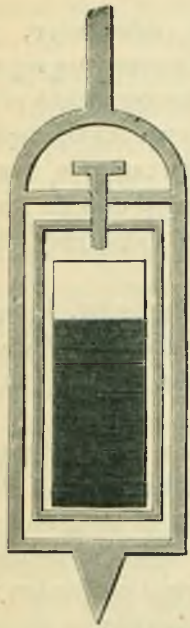

Fig. 98.

Wychwyt.

672. Znacznej biegłości praktycznej, zarówno jak i dochodzeń teoretycznych wymagało urządzenie tej części zegara, która się nazywa wychwytem, a której należyty wyrób jest istotnym warunkiem dokładności czasomierza. Ruch wahadła podtrzymywany być winien tem, że za każdem drgnięciem doznaje ono impulsu; zarazem zaś jest pożądana, aby drganie, o ile można, jak najmniej doznawało zakłócenia przez kombinacye mechaniczne. Izochronizm, od którego mierzenie czasu zależy, jest ściśle cechą jedynie wachnięć dokonywanych z pełną swobodą, wolnych od jakiegokol-

wiek bądź przymusu; wahadło przeto zegarowe powinno być jak najbardziej zbliżone do wahadła, które się zupełnie swobodnie kołysze. Osiągnięcie tego celu, a zarazem utrzymanie obszerności drgań w stałości dostatecznej, jest zadaniem dobrego wychwytu.

673. Zwykłą formę wychwytu przedstawia fig. 99. Urządzenie to różni się, zapewne, od istotnego mechani-

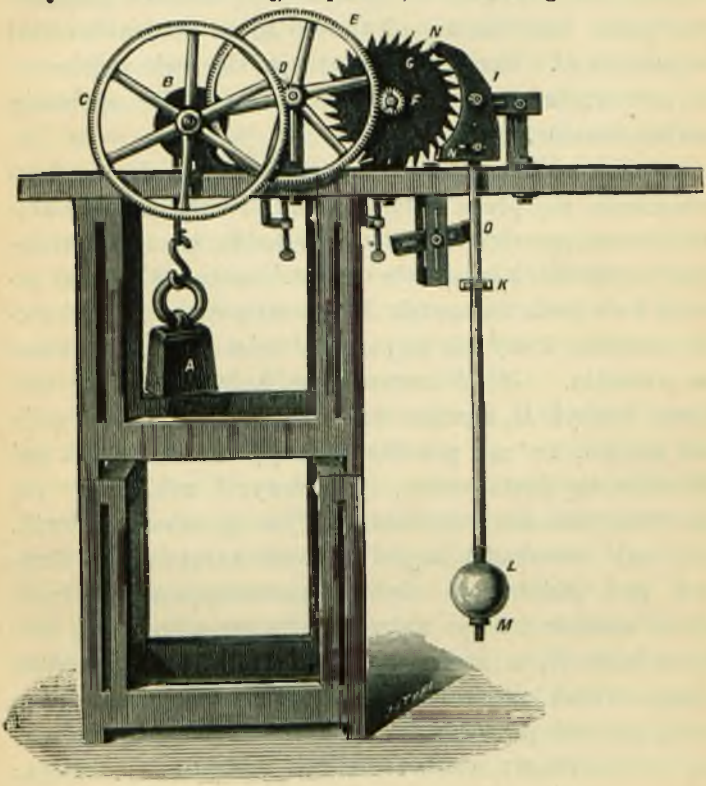

Fig. 99.

zmu, jaki napotykamy w zegarach, zbudowałem wszakże maszynę w ten sposób, by jasno uwidocznić działanie różnych części. Koło zębate *G* nazywa się kołem wychwytowem; posiada trzydzieści zębów i obraca się raz, gdy wahadło wykonywa sześćdziesiąt drgnięć, to jest raz na minutę. *I* jestto wychwyt; kołysze się on dokoła osi i dźwiga widełki przy *K*, tak, że pręt wahadła przechodzi przez rozwidlenie. Wahadło samo zawieszone jest w punkcie *O*. Przy *N* i *H* znajdują się dwie wygładzone powierzchnie, zwane haczykami, a które spełniają ważne zadanie.

674. Koło zębate *G* zmuszane jest do ciągłego obracania się przez działanie wagi i układu kół, o których zaraz opowiemy; działanie wszakże haczyków reguluje szybkość, z jaką koło wirować może. Gdy ząb pewien koła pada na haczyk *N*, ten ostatni doznaje lekkiego nacisku, który się za pośrednictwem widel przenosi na wahadło. Gdy *N* usuwa się od koła, zbliża się doń drugi haczyk *H*, a przez ten czas haczyk *N* odstępuje tak daleko, że ząb prześlizguje się pod nim, haczyk zaś *H* zbliża się dostatecznie, by uchwycić ząb, który się znów natychmiast oswobadza. Tym sposobem w chwili, gdy ząb oswobadza się od *N*, koło zaczyna się obracać pod działaniem ciężaru poruszającego; natychmiast wszakże zostaje zatrzymanem przez inny ząb, który pada na *H*, a szmer tych ciągłych starć powoduje znany tyktak zegara. Wahadło kołysze się jeszcze na lewo, gdy ząb pada na *H*. Ciśnienie zęba popycha wtedy *H* na zewnątrz, ale bezwładność wahadła, naciskając *H* na wewnątrz, wystarcza zaraz do przezwyciężenia ciśnienia przeciwnego, wywieranego przez koło; skutkiem

tego, gdy ząb został już wypuszczony, koło porusza się nieco wstecz, czyli „się cofa.” Gdy rozpatrujemy zegar zwyczajny, który posiada skazówkę sekundową, zauważyć możemy, że po upływie każdej sekundy skazówka się cofa, zanim przeskoczy na następną sekundę. Przyczyną tego jest to, że skazówka sekundowa poruszaną jest bezpośrednio przez koło wychwytowe, a bezwładność wahadła sprowadza cofanie się tego koła. Stateczne wszakże ciśnienie zęba przezwycięża wkrótce bezwładność wahadła, a haczyk *H* jest stopniowo popychany dalej, aż wreszcie ząb się oswobadza; skoro to się stanie, koło zaczyna się obracać, ale zostaje rychło zatrzymane przez następny ząb, padający na haczyk *N*, który się tymczasem przesunął dostatecznie na wewnątrz. Opisany tu przebieg wciąż się powtarza. Ząb każdy potrąca się o jeden i o drugi haczyk, a potrącenia te zachodzą co sekunda; jeżeli więc koło wychwytowe posiada trzydzieści zębów, obraca się raz na minutę.

675. Gdy ząb naciska haczyk *N*, wahadło posuwa się na lewo; w chwili gdy ząb ten się oswobadza, inny ząb pada na *H*, a wahadło, zanim jeszcze dokończyło wachnięcia swego na lewo, napotyka siłę, która dąży do sprowadzenia go na prawo. Gdy, dalej, siła ta wraz z siłą ciężkości zatrzymują wahadło i powodują ruch jego na prawo, ząb uchodzi wkrótce od *H*, a ząb inny pada na *N*, sprowadzając znów opóźnienie wahadła. A zatem, z wyjątkiem bardzo krótkiego przeciągu czasu, gdy koło obraca się po oswobodzeniu jednego haczyka i przed potrąceniem o drugi, wahadło nigdy nie jest swobodne; jest popychane naprzód, gdy szybkość jego jest znaczna

ale zanim dobiega do kresu swego drgnięcia, pociągane jest wstecz; wychwyt taki nie posiada przeto cechy, którą poznaliśmy wyżej, jako niezbędną dla prawdziwie doskonałego przyrządu. W zegarach wszakże, służących do użytku powszedniego, wychwyt taki, zwany „wychwytem wstecznym" (ang. *recoil escapement*), służy dostatecznie dobrze, gdyż siła działająca na wahadło jest w istocie rzeczy nader słaba. Dla zegarów natomiast astronomicznych, które służą do badań ścisłych, wychwyt taki nie wystarcza.

676. Trudności te usuwa „wychwyt spoczywający" (ang. *dead-beat escapement*), wynaleziony przez sławnego zegarmistrza Grahama. Obserwując skazówkę sekundową zegara, który jest takim wychwytem regulowany, zrozumieć możemy, dlaczego nazywa się on spoczywającym, — nie ma tu bowiem cofania się wstecznego; skazówka sekundowa przebiega szybko co sekunda i zatrzymuje się nieruchomo, dopóki nie zostanie potrąconą na następną sekundę.

Wychwyt wraz z kołem, które dozwalają skutek ten osiągnąć, widzimy na fig. 100 (str. 397). *A* i *B* są to haczyki, na które działają zęby, co nadaje ruch kotwicy, obracającej się dokoła środka *O*. Na osi, przechodzącej przez ten środek *O*, zawieszone są widły, tak, że gdy kotwica działaniem koła przechyla się w jedną i drugą stronę, widły kołyszą się również, a to podtrzymuje ruch wahadła. Właściwy rys, którym się wychwyt spoczywający różni od wstecznego, polega na tem, że gdy ząb oswobadza się od haczyka *A*, koło się obraca; ząb wszakże, któryby przy wychwycie wstecznym spadł na drugi haczyk, pada teraz na powierzchnię *D*, a nie na haczyk *B*. Powierzchnia zaś *D* jest częścią

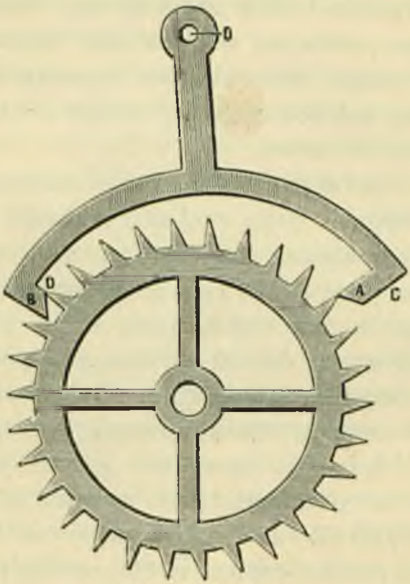

Fig. 100.

okręgu koła, którego środek przypada w *O*, w środku ruchu; ząb zatem jest prawie zupełnie bezczynnym, dopóki pozostaje na łuku kołowym *D*.

677. Nie ma tu przeto cofania się wstecznego, a wahadło dosięgać może kresu swego wachnięcia na prawo, nie doznając opóźnienia; ale gdy wahadło wraca, kotwica porusza się, dopóki ząb nie przejdzie z łuku kołowego *D* na haczyk *B*. Wtedy ząb ześlizguje się na-

tychmiast po haczyku, nadając kotwicy impuls i oswobadzając się, skoro koniec jego przebiegnie *B*. Następny ząb rozpoczyna wtedy swą działalność, padając na łuk kołowy *C*, ktorego środek znajduje się również w *O*; ząb ten pozostaje podobnież w spoczynku, dopóki wahadło nie kończy swego drgnięcia i nie rozpoczyna swego powrotu; wtedy ząbześlizguje się wzdłuż *A* i proces tenże sam powtarza się znowu.

678. Operacye te są tak ustosunkowane, że popęd swój czyli impuls (który zachodzi w chwili, gdy ząb ześlizguje się z haczyka), otrzymuje wahadło ściśle wtedy, gdy drgnięcie przypada w punkcie najwyższej swej szybkości; następnie zaś wahadło nie ulega już żadnemu obcemu wpływowi, dopóki nie dosięgnie podobnego położenia w następnem wachnięciu. Popęd zaś ten wpośrodku wachnięcia na trwanie jego nie ma wpływu.

679. Istnieje tu wprawdzie jeszcze drobna siła, wpływająca na opóźnienie ruchu wahadła, a pochodząca z tarcia. Wypływa ona z nacisku zębów na łuki kołowe, co powoduje pewien stopień tarcia, choćby powierzchnie jak najstaranniej były wygładzone. Okazało się wszakże, że nie sprowadza to błędu dostrzegalnego.

Zegar, opatrzony w wychwyt spoczywający i w wahadło rtęciowe, jest wybornym czasomierzem.

Układ kół.

680. Należy nam teraz rozważyć, jaką drogą zasób energii udziela się kołu wychwytowemu, a zarazem w jaki sposób liczą się kołysania wahadła. Służący do

celu tego układ kół widzimy na fig. 99. Co do tego układu przytoczyć możemy też samą uwagę, którąśmy podali i co do wychwytu, — a mianowicie, że posłużyć on ma raczej do wyjaśnienia zasady, aniżeli do przedstawienia istotnej budowy zegara.

681. Waga, czyli ciężar *A*, który ożywia całą maszynę, przyczepiony jest do sznura, nawiniętego na bęben *B*; nakręcanie zegara polega na podnoszeniu wagi. Na tejże samej osi, co bęben, osadzone jest wielkie koło zębate *C*, posiadające 200 zębów. Koło *C* działa znów na małe kółko zębate *D* o 20 zębach; gdy zatem koło *C* obraca się raz dokoła, kółko *D* wykonywa dziesięć obrotów. Wielkie koło *E* znajduje się na tejże samej osi, co kółko *D* i wraz z niem się obraca; koło *E* posiada 180 zębów i działa na kółko zębate *F*, zawierające 30 zębów. Gdy zatem koło *E* wykonywa obrót jeden, *F* obraca się w tymże czasie 6 razy; a stąd, gdy koło *C* i bęben *B* wykonywają jeden obrót, kółko zębate *F* obraca się dokoła sześćdziesiąt razy; ale koło wychwytowe *G* osadzone jest na tejże samej osi, co kółko zębate *F*, na każde przeto sześćdziesiąt obrotów koła wychwytowego koło *C* raz się obraca. Widzieliśmy zaś poprzednio, że koło wychwytowe obraca się raz na minutę, koło przeto *C* obracać się musi raz godzinę. Jeżeli tedy skazówka osadzona jest na jednej osi wraz z kołem *C*, na przedniej stronie tarczy zegarowej, skazówka ta obejdzie ją dokoła raz w ciągu godziny, czyli będzie skazówką minutową zegara.

682. Układ kół służy do przenoszenia siły opadającego ciężaru, a tem samem do dostarczania energii wahadłu. Model zegara, który macie przed oczyma, utrzy-

mywany jest w ruchu ciężarem 25 kg. Średnica koła wychwytowego jest mniej więcej dwa razy większa, aniżeli bębna, a koło to obraca się sześćdziesiąt razy prędzej, aniżeli bęben; na każdy przeto centymetr, o jaki ciężar opada, obwód koła wychwytowego poruszyć się musi o 120 centymetrów. Z zasady pracy wypływa, że energia wyłożona na jednym końcu maszyny wyrównywa energii zyskanej na końcu drugim, jeżeli pominiemy tarcie. Siła przeto 25 kg. zredukowaną jest do jednej stodwudziestej części swej wielkości na obwodzie koła wychwytowego. Ponieważ zaś tarcie jest tu znaczne, istotna siła, z jaką ząb każdy działa na haczyk wychwytu, wynosi zaledwie kilka centygramów.

683. W dobrym zegarze dostarczać trzeba wahadłu nader drobnej zaledwie siły, jakkolwiek bowiem w ciągu doby dokonanych ma być 86400 wachnięć, jedno nakręcenie zegara daje dostateczny zasób energii na utrzymanie ruchu przez tydzień.

Skazówki.

684. Za pomocą modelu przedstawionego na fig. 101 (str. 401) wyjaśnimy, w jaki sposób skazówka godzinna i skazówka minutowa obracać się mogą z różnemi prędkościami po tej samej tarczy.

G jestto korba, która służy do wprawiania w obrót pręta, dźwigającego koło *F* i skazówkę *B*. Koło *F* posiada 20 zębów, zaczepiających o inne koło *E*, mające 80 zębów, a które wprawia znów w obrót oś, dźwigającą trzecie koło *D* o 25 zębach; z kolei koło *D* działa na czwarte koło *C*, opatrzone 75 zębami. Koło *C* obracać się może na osi swobodnie, tak, że ruch tej osi na nie nie działa bezpośrednio, ale jedynie za pośrednictwem kół *E*, *F* i *D*. Do koła *C* przytwierdzona jest druga ska-

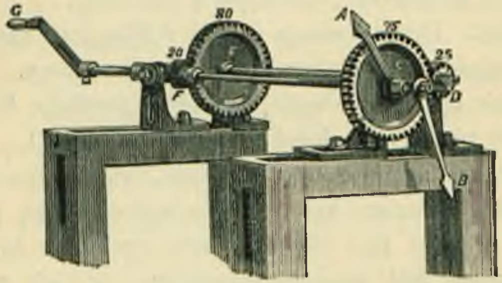

Fig. 101.

zówka *A*, które się tedy wraz z niem obraca. Porównajmy ruch obu skazówek *A* i *B*. Dajmy, że korbę *G* obrócimy dwanaście razy, a zatem, oczywiście, i skazówka *B*, jako osadzona na jednej z nią osi, obróci się dwanaście razy. Koło *F* obróci się również dwanaście razy, ale koło *E* posiada cztery razy więcej zębów aniżeli *F*, gdy zatem to ostatnie obróci się cztery razy, *E* obróci się raz tylko jeden, a skoro *F* obróciło się dwanaście razy, *E* obiegło dokoła trzy razy. Koło *D* obraca się wraz z *E*, dwanaście zatem obrotów korby sprowadza trzy obroty koła *D*; ponieważ wszakże *C* ma 75 a *D* 25 zębów, koło *C* zatem wykona jeden tylko obrót, podczas gdy *D* wykona trzy obroty. Ostatecznie przeto skazówka *A* wykona jeden tylko obrót, podczas gdy skazówka *B* wykona dwanaście obrotów.

Widzieliśmy wyżej (ust. 681), jak za pomocą układu kół urządzić można, by koło obracało się raz na godzinę. Jeżeli więc koło takie osadzone jest na osi zamiast korby *G*, skazówka *B* będzie skazówką minutową zegara, a skazówka *A* skazówką godzinną.

685. Uregulowanie liczby zębów jest rzeczą ważną, a odpowiedni dobór kół jest ograniczony. Aby bowiem osie były równoległe, odległość środków kół *F* i *E* musi być równą odległości środków kół *C* i *D*. Widoczna wszakże, że odległość środka *F* od środka *E* równa się sumie promieni kół *F* i *E*; a zatem suma promieni kół *F* i *E* musi być równą sumie promieni kół *C* i *D*. Ale obwody kół są proporcyonalne do ich promieni, a zatem suma okręgów *F* i *E* musi być równa sumie okręgów *C* i *D*, a stąd wypływa, że suma liczby zębów w kołach *E* i *F* musi być równa samie liczby zębów w kołach *C* i *D*. W naszym modelu każda z tych sum czyni sto.

686. Żądany zresztą ruch otrzymać można i za pomocą innych układów kół. Tak naprzykład, gdyby koło *F* miało jak poprzednio 20 zębów, *E* 240, a *C* i *D* każde po 130, suma zębów każdej pary kół czyniłaby 260. Koło *E* obróciłoby się raz na każde dwanaście obrotów koła *F*, koła zaś *C* i *D* obracałyby się z tąż samą prędkością co *E*, ruch zatem skazówki *A* byłby i w tym razie dwunastą częścią ruchu skazówki *B*. Projekt ten wymaga kół większych, aniżeli układ wyżej przedstawiony.

Mechanizm bijący godziny.

687. Poznaliśmy najistotniejsze rysy mechanizmu, utrzymującego bieg zegara; by uzupełnić szkic tego przyrządu, należy nam opisać jeszcze piękny mechanizm, służący do bicia godzin. Model, przedstawiony na fig. 102, str. 404, jest, jak poprzednie, zbudowany raczej do wyjaśnienia zasad tego urządzenia, aniżeli do wiernego odtworzenia części napotykanych w zegarach. Niektóre szczegóły nie są w modelu powtórzone, wystarcza on wszakże do wytłomaczenia zasady i jest do działania uzdatniony.

688. Gdy skazówka godzinna dosięga pewnych punktów tarczy, rozpocząć się winno bicie i nastąpić ma oznaczona liczba uderzeń. Przyrząd tedy do bicia służący spełniać ma dwa zadania, wywoływać bicie i liczbę uderzeń kontrolować; to drugie jest obowiązkiem znacznie trudniejszym. Dwa są urządzenia pospolicie używane; opiszemy z nich to, które znajdujemy w najlepszych zegarach.

689. Najwybitniejszą częścią mechanizmu bijącego w zegarze jest ślimak (ang. *snail*), przedstawiony przy *B*. Część ta obrócić się musi raz na dwanaście godzin, osadzona przeto jest na osi, która wykonywa obrót swój ściśle w tymże samym czasie, co skazówka godzinna zegara. W modelu przyrząd bijący oddzielony jest od części utrzymujących bieg zegara, łatwo jednak wyobrazić sobie, jak ślimak ruch swój otrzymać może. Brzeg ślimaka oznaczony jest dwunastu stopniami, ponumerowanemi od jednego do dwunastu. Oddziały zaś brzegu

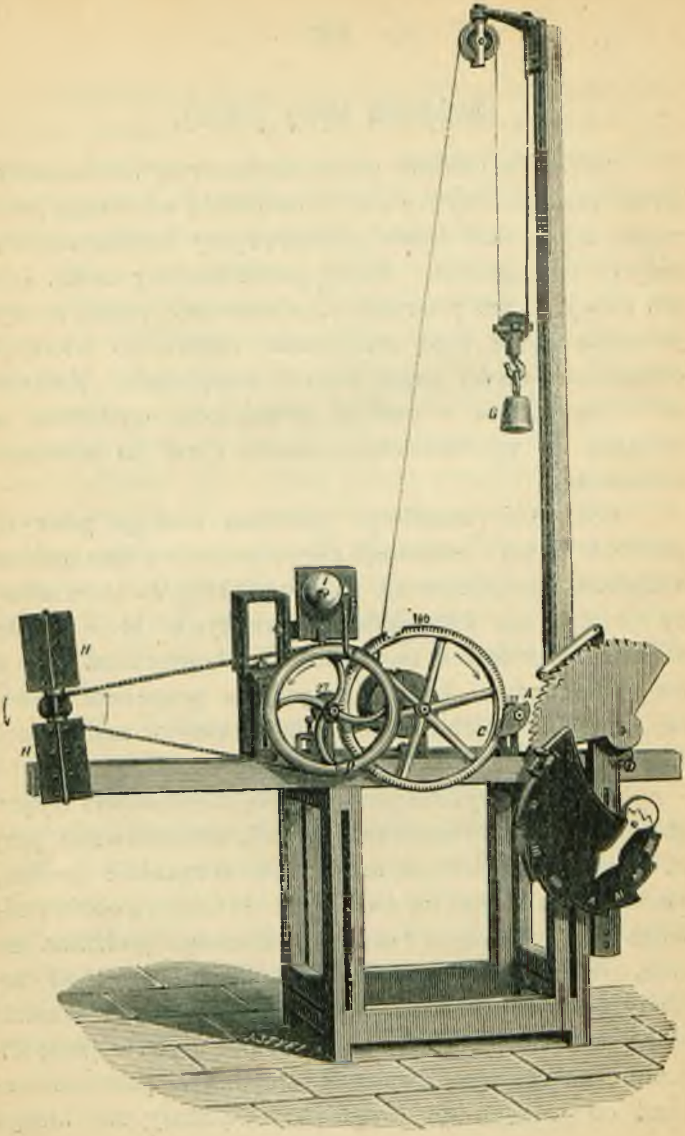

Fig. 102.

pomiędzy każdemi dwoma, po sobie idącemi, stopniami stanowią części okręgu koła, którego środkiem jest oś ślimaka. Nadanie dokładnej postaci ślimakowi jest jak najwyższej wagi dla należytej działalności zegara. Powyżej ślimaka znajduje się część koła zębatego *F*, zwana kremalierą, która posiada mniej więcej czternaście lub piętnaście zębów. Gdy koło to jest swobodne, opada na dół, dopóki znajdujący się na nim czopek nie zetknie się ze ślimakiem w *B*.

690. Odległość, na jaką kremaliera spada, zależy od położenia ślimaka; jeżeli czopek wchodzi w zetknięcie z częścią oznaczoną przez I, jak to ma miejsce na figurze, kremaliera przechodzi drobną tylko drogę; natomiast zaś, jeżeli czopek pada na część oznaczoną przez VII, kremaliera ma dłuższą do przebieżenia drogę; a zatem, gdy ślimak zmienia swe położenie wraz z następstwem godzin, ulega też zmianie i droga, jaką kremaliera przebiega. Ślimak tak jest obmyślony, że co godzina kremaliera spada o stopień niżej, aniżeli w godzinie poprzedniej; tak naprzykład, o godzinie trzeciej kremaliera, jeżeli ma swobodę spadku, zaczepi się zawsze o część ślimaka oznaczoną przez III, ale za nadejściem godziny czwartej kremaliera spadnie na część oznaczoną przez IV; aby zapewnić prawidłowy tego przebieg, należy baczną uwagę zwracać na formę ślimaka.

691. *A* jestto drobna płytka, którą nazwiemy hamulcem (ang. *gathering pallet*); jest ona tak umieszczoną względnie do kremaliery, że za każdym swym obrotem podnosi ją o jeden ząb. Gdy zatem kremaliera opada, płytka ta stopniowo ją podnosi.

692. Na tejże samej osi, co ta płytka, tak że się wraz z nią obraca, osadzoną jest druga jeszcze część C, której zadaniem jest powstrzymywanie ruchu, skoro kremaliera dostatecznie się podniesie. Kremaliera mianowicie opatrzona jest w czopek wystający; C przechodzi niezależnie od tego czopka, dopóki kremaliera nie podniesie się do pierwotnej swej wysokości, a wtedy część C zostaje pochwyconą przez czopek i mechanizm ulega zatrzymaniu. Wielkość zębów kremaliery jest tak dobraną w stosunku do ślimaka, że hamulec A, podnosząc kremalierę, tyle razy posunąć ją musi w górę, ile podaje liczba na tym stopniu ślimaka, na który kremaliera padła; zadaniem przeto ślimaka jest kontrolowanie liczby obrotów, jaką wykonać może hamulec. Kremaliera, po podniesieniu o każdy ząb, zatrzymywana jest przez sprężynę F.

693. Hamulec A wprawiany jest w obrót małem kółkiem zębatem o 27 zębach, które znów poruszane jest kołem C o 180 zębach. Koło to dźwiga bęben, któremu ruch obrotowy nadaje ciężar, w sposób widoczny na rycinie. Drugie kółko zębate o 27 zębach osadzone na jednej osi wraz z kołem D, jest również wprawiane w obrót przez wielkie koło C. Ponieważ oba małe kółka zębate są równe, obracają się przeto z prędkościami równemi. Ponad kołem D umieszczony jest dzwonek I, którego młotek E tak jest urządzony, że za pośrednictwem czopka przyczepionego do D uderza o dzwonek raz za każdym obrotem tego koła D. Działanie całe łatwo teraz zrozumiemy. Gdy skazówka godzinna dochodzi do kresu godziny, proste urządzenie podnosi spręż-

żynę *F*, a kremaliera wtedy opada; w chwili, gdy to się dzieje, hamulec *A* zaczyna się obracać i podnosi w górę kremalierę, za podniesieniem zaś każdego zęba następuje uderzenie dzwonka, a stąd dzwonek bije, dopóki część *C* nie zostanie przez czopek zatrzymaną.

694. Wiatrak *H* ma na celu regulowanie szybkości ruchu, — gdy skrzydła jego zwrócone są więcej lub mniej pochyło, szybkość słabnie lub wzrasta.

DODATEK.

Wzory użyte przy zestawieniu tabeli III i następnych wyprowadzone być mogą dwiema metodami, a mianowicie metodą konstrukcyi graficznej, oraz metodą najmniejszych kwadratów. Pierwsza z tych metod jest prostsza i nie wymaga długich obliczeń, ale rysunki kreślone być muszą bardzo czysto i starannie. Metodę drugą opiszemy tu dla tych czytelników, którzy posiadają konieczną znajomość matematyki. Wzory użyte do ułożenia tablic otrzymane zostały w ogólności metodą najmniejszych kwadratów, rezultaty jej bowiem są w pewnej, lubo nieznacznej mierze dokładniejsze aniżeli rezultaty, metodą konstrukcyi graficznej osiągnięte, dozwala więc ona wyprowadzić większą liczbę cyfer dziesiętnych.

Weźmiemy tu pod uwagę przykłady liczebne tablicy III i IV i okażemy, jak wzory tych tablic wyprowadzone zostały dwiema różnemi metodami.

Tabele V, XIV, XVI, XXI, otrzymane zostały w tenże sam sposób, co tabela III; tabele zaś VI, IX, X, XI, XV, XVII, XVIII, XIX, XX, XXI, XXII w tenże sam sposób, co tabela IV.

Metoda konstrukcyi graficznej.

TABELA III.

Linia pozioma *A P S*, przedstawiona w skali zmniejszonej na fig. 103 (str. 410), narysowaną została czysto na arkuszu papieru, o wymiarach 14″ × 6″. Przy kreśleniu figury użytą została skala, obejmująca sto podziałek na długości cala. Soczewka kieszonkowa jest pożądaną do odczytywania tak drobnych podziałek. Za pomocą cyrkla i skali oznaczone zostały na linii $A\ P\ S$ punkty w odległościach 1,4″ 2,8″ 4,2″ 5,6″ 7,0″ 8,4″ 9,8″ 11,2″ od początku A. Odległości te odpowiadają wielkościom ciężarów umieszczanych na saniach, według skali 0,1″ na 1 funt. Z punktów tak oznaczonych wyprowadzone zostały prostopadłe do linii $A\ P\ S$, a na prostopadłych tych odcięte długości F_1, F_2, F_3. Długości te, według przyjętej skali, równe są wielkościom tarcia,

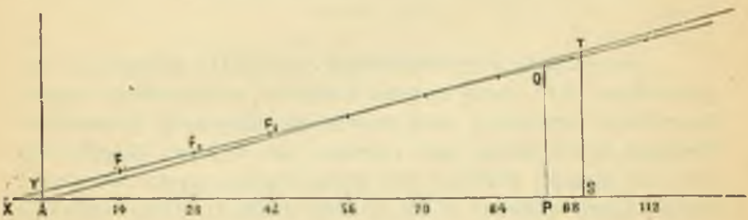

Fig. 103.

przez ciężary te sprowadzonego. Tak naprzykład, widzimy w tabeli III, doświadczenie 3, że gdy ciężar na saniach jest 42 f., tarcie wynosi 12,2 f.; a zatem punkt F_3 otrzymuje się przez odmierzenie odległości 4,2″ od A i wyprowadzenie stąd prostopadłej 1,22″. W ten sposób oznaczony został punkt dla każdego ciężaru. Położenie tych punktów wskazać można przez zatoczenie dokoła każdego z nich drobnego okręgu o średnicy 0,1″. Kółka te, oznaczając jasno położenie punktów, będą jeszcze przydatne w dalszej części tego postępowania.

Okazuje się, że punkty F_1, F_2, i t. d., przypadają na linii zbliżonej bardzo do linii prostej. Wnosimy więc stąd, że gdyby przyrząd i obserwacye nasze były doskonałe, punkty te przypadałyby ściśle na linii prostej. Celem konstrukcyi jest oznaczenie linii prostej, któraby jak najściślej do punktów tych przystępowała. Jeżeli istotnie jest tarcie proporcyonalne do ciśnienia, linia ta przechodzić winna przez początek A, w takim bowiem razie linie prostopadłe, przedstawiające tarcie, proporcyonalne są do odległości, odciętych od punktu A na linii poziomej, a przedstawiających ciężary. Okazuje się, że poprowadzić można przez początek A linię $A\ T$, tak, że wszystkie punkty F_1, F_2 i t. d. są w bezpośredniem sąsiedztwie tej linii, jeżeli nie przypadają istotnie na niej samej. Nitka cienkiego jedwabiu czarnego, mająca około 15″ długości, rozciągnięta za pomocą łuku drucianego lub fiszbinowego, posłużyć może dogodnie do nakreślenia tej linii szukanej. Kółka opisane z punktów F_1, F_2 i t. d. ułatwiają umieszczenie nitki jedwabnej jak najbliżej, o ile można, względem tych punktów. Nakreślenie z punktu A linii, któraby przecinała wszystkie te kółka, okazuje się niemożebnem: najdokładniejsza linia przechodzi poniżej, ale bardzo blisko kółek otaczających punkty F_1, F_2, F_3, F_4, dotyka kółka otaczającego F_5, przecina kółka otaczające F_6 i F_7, i przechodzi powyżej kółka otaczającego F_8. Linia powinna tak być umieszczoną, by odległość jej od punktu, od którego najbardziej usunięta jest ku dołowi, wyrównywała wyniesieniu jej nad punkt, który poniżej niej najdalej przypada.

Od punktu A odetnijmy długość $A\ S$ wynoszącą 10″ i wystawmy prostopadłą $S\ T$. Zmierzenie bezpośrednie wykazuje, że prostopadła ta czyni 2,7″. Jeżeli więc przypuszczamy, że tarcie, powodowane przez dany ciężar, jest rzeczywiście przedstawione przez długość, jaką linija $A\ T$ odcina na prostopadłej, w takim razie

$$F : R = 2{,}7'' : 10'',$$

$$\text{stąd} \quad F = 0{,}27\ R.$$

Taki jest tedy wzór, według którego zestawioną została tabela III.

TABELA IV.

Przez staranne przyłożenie wyprężonej nitki jedwabnej nakreślić można prostą $X\ Y\ Q$, która, przypadając bardzo blisko punktu A, przechodzi bliżej punktów F_1, F_2 i t. d., aniżeliby to było możliwem dla jakiejkolwiek linii, przechodzącej ściśle przez A. Okazuje się, że linia $X\ Y\ Q$ nietylko przecina wszystkie drobne kółka, ale odcina nawet znaczne łuki z każdego. Odetnijmy długość $X P$ równą 10″ i wystawmy prostopadłą $P Q$; wtedy, jeżeli R oznacza ciężar, a F odpowiadające mu tarcie, mamy z trójkątów podobnych:

$$\frac{F - \frac{A\,Y}{0,1''} \times 1\ \mathrm{f.}}{R} = \frac{P\,Q}{P\,X}.$$

Mierzenie wykazuje, że $A\,Y = 0,14''$, a $P Q = 2,53''$.

Mamy przeto

$$F = 1,4 + 0,253\,R.$$

Wzór ten, praktycznie biorąc, jest takiż sam, jak wzór

$$F = 1,44 + 0,252\,R,$$

według którego tabela została ułożoną. W samej rzeczy, kolumna obliczonych wartości tarcia mogła być obrachowaną według wzoru pierwszego, nie odstępując wyraźnie od wartości, które w tabeli napotykamy.

* Trójkąty podobne, z których wypływa powyższa proporcya, otrzymujemy, prowadząc przez początek A linię równoległą do $X Q$; linia zaś $A\,Y$ wyrażoną być winna w tychże jednostkach, co F i R, co właśnie wskazuje oznaczenie $\frac{A\,Y}{0,1''} \times 1$ f.

Metoda najmniejszych kwadratów.

TABELA III.

Niech k oznacza spółczynnik tarcia. Niepodobna dobrać jakiejkolwiek wartości na k, któraby czyniła zadosyć równaniu

$$F - k\,R = 0$$

dla wszystkich zaobserwowanych wartości F i R. Należy nam przeto oznaczyć taką wartość na k, któraby przynajmniej najlepiej przedstawiała wszystkie doświadczenia. Różnica $F - k\,R$ powinna być tak bliską zera, jak tylko być może, przy każdych dwu, odpowiadających sobie wartościach k i R.

Na zasadzie teoryi najmniejszych kwadratów wiadomo dobrze matematykom, że najdokładniejszą wartością na k będzie wartość, która wyrażenie

$$(F_1 - k R_1)^2 + (F_2 - k R_2)^2 + \ldots + (F_m - k R_m)^2$$

czyni najmniejszością, przyczem F_1 i R_1, F_2 i R_2 i t. d, są to wartości jednoczesne tarcia F i ciężaru R, otrzymane z różnych doświadczeń.

W samej rzeczy dostrzegamy łatwo, że gdy ilość ta jest bardzo małą, każdy ze składających ją wyrazów dodatnich

$$(F_1 - k R_1)^2 \text{ i t. d.},$$

musi mieć wartość również bardzo małą, a tem samem różnica

$$F - k R$$

musi być zawsze bliską zeru.

Różniczkując sumę kwadratów i równając pochodną do zera, mamy według zwykłego sposobu oznaczania·

$$\Sigma R_1 (F_1 - k R_1) = 0,$$

$$\text{skąd } k = \frac{\Sigma R_1 F_1}{\Sigma R_1^2}.$$

Obliczenie wartości k upraszcza się, jeżeli (jak to w ogólności ma miejsce w tablicach naszych), ciężary R_1, R_2, . . . , R_m mają postać

$$N, 2 N, 3 N, \ldots, m N.$$

W tym razie:

$$\Sigma R_1 F_1 = N (F_1 + 2 F_2 + 3 F_3 + \ldots + m F_m).$$

$$\Sigma R_1^2 = N^2 (1^2 + 2^2 + 3^2 + \ldots + m^2)$$

$$= N^2 \frac{m (m+1) (2m+1)}{6},$$

skąd

$$k = 6 \frac{F_1 + 2 F_2 + 3 F_3 + \ldots + m F_m}{N m (m+1) (2m+1)}.$$

W przypadku tabeli III mamy

$$m = 8, \quad N = 15,$$

$$F_1 + 2 F_2 + 3 F_3 + \ldots + m F_m = 770{,}9;$$

zatem $k = 0{,}27$.

Wzór więc $F = 0{,}27\ R$ wyprowadzony zastał zarówno metodą najmniejszych kwadratów, jak i metodą konstrukcyi graficznej.

TABELA IV.

Wzór użyty w tabeli tej wyprowadzony został z następnych rozważań.

Nie istnieją zgoła wartości na x i y, któreby równaniu

$$F = x + y\ R$$

czyniły zadosyć przy wszystkich jednoczesnych wartościach tarcia F i ciężaru R, najdokładniejsze wszakże będą wartości na x i y, które wyrażenie

$$(F_1 - x - yR_1)^2 + (F_2 - x - yR_2)^2 + \ldots + (F_m - x - yR_m)^2,$$

czynią najmniejszością.

Różniczkując względem x i y i równając pochodne do zera mamy:

$$\Sigma\ (F_1 - x - yR_1) = 0,$$

$$\Sigma\ R_1\ (F_1 - x - yR_1) = 0,$$

co daje dwa równania na oznaczanie x i y.

Dajmy, jak to właśnie ma miejsce, że ciężary mają postać:

$$N,\ 2\ N,\ 3\ N,\ \ldots\ m\ N,$$

a oznaczając:

$$A = F_1 + F_2 + F_3 + \ldots + F_m$$

$$B = F_1 + 2\ F_2 + 3\ F_3 + \ldots + m\ F_m,$$

otrzymujemy równania:

$$A - m\ x - \frac{m\ (m+1)}{2}\ N\ y = 0,$$

$$B - \frac{m\ (m+1)}{2}\ x - \frac{m\ (m+1)\ (2\ m+1)}{6}\ N\ y = 0$$

Z rozwiązania tych równań otrzymujemy:

$$x = \frac{2 + 4\ m}{m^2 - m}\ A - \frac{6}{m^2 - m}\ B.$$

$$y = \frac{12}{m^3 - m} \frac{B}{N} - \frac{6}{m^2 - m} \frac{A}{N}$$

W przypadku obecnym:

$$m = 8, \qquad N = 14, \qquad A = 138,4, \qquad B = 770,9;$$

zatem

$$x = 1,44$$
$$y = 0,252,$$

i otrzymujemy wzór

$$F = 1,44 + 0,252\, R.$$

SPIS ALFABETYCZNY.

Akcya, 13
Atwooda maszyna, 285

Baba, 314
Belka — jej ciężar łamiący, 238, 242
  jej obciążenie, 244
  obciążona jednostajnie, 245
  przytwierdzona w jednym końcu, 248
  przytwierdzona w obu końcach, 248
  sprężystość, 226
  szerokość, 238
  umieszczona na boku, 239
  wyprężona przez siłę poprzeczną, 220
  wytrzymałość, 234
  załamanie się, 229
  zgięcie, 222
  żelazna, 269, 272
  —jak najlżejsza, 272
Bezwładnosć, 305
Biała blacha, 274
Bieg ciała spadającego, 282
  ciała rzuconego, 302
Blok, 111
Blok epicykloidalny, 103, 148
  tabela XII, 149
Blok nieruchomy, 112
  pożytek jego, 115
Blok tarcie, 117
  w młynach, 112
Blok ruchomy, 129
  stosunek szybkości, 131
  tabela IX, 133
Blok złożony, 127
Blok złożony z trzech krążków, 136
  stosunek szybkości, 136
  tabela X, 138
Blok różnicowy, 141
  stosunek szybkości, 143
  tabela XI, 145
Brunel — most na rzece Wye, 264
Budowa mostów, 250
Budowle, 259

Cale — sposób oznaczania, 15
Ciężar, 69
  właściwy, 70
  —kości słoniowej, 74
  —mosiądzu, 74
  —ołowiu, 74
  —żelaza lanego, 74
  wody, 71
Ciężkość, 67
  i ciężar, 69
  i wahadło, 354
  oznaczanie, 301
  niezależność od ruchu, 296

Ciężkość, wpływ na różne substancye, 70
w Warszawie, 354
Ciśnienie belki obciążonej, 50
i tarcie, 96
Cynetyka, 282
Cykloida, 358

Długość wahadła złożonego, 367
Dośrodkowa siła, 329
Doświadczenia Plateau, 334
Drąg do podważania ciężarów, 156
Drążek, 151
ciężar jego, 153
drugiego rodzaju, 156
pierwszego rodzaju, 151
prawa, 154, 163
tarcie, 155
trzeciego rodzaju, 155
zastosowania, 156
Drgania — składanie ich, 382
Droga pocisku, 302
Drzewo — paczenie, 211
pierścienie, 211
rozciąganie, 213
suszenie, 211
uciskanie, 213
własności, 210
Dynamometr, 26
Działanie (akcya), 13
Dziurawnica, 322
Dźwignia, ob. drążek

Eade — blok epicykloidalny, 148
Energia, 111, 122
gromadzenie jej, 313, 315
jednostka, 123
ujawnianie, 319

Funt i kilogram, 5

Galileusz — cynetyka, 282
spadek ciał, 289
Galileusz, wahadło, 345
wieża pizańska, 286
Graficzna konstrukcya 409
Graham — wychwyt, 396

Hamulec w zegarach, 405

Islandya, 128

Jednostka siły, 10
energii, 122

Kabestan, 188
Katar, 312
Kater — wahadło, 370
Katetometr, 222
Kąt tarcia, 103
statycznego, 105
Kierunek siły, 11
Kilogrammetr, 126
Klin, 175
Koła, 120
tarcie, 121
zębate, 198.
Koła obracające się, 82
Koło rozpędowe, 318
w maszynie parowej, 321
Koło szlifierskie, 162
Kołowrót na osi, 187
doświadczenia, 189
i blok różnicowy, 206
i szruba, 206
stosunek szybkości, 189
tabela XVIII, 191
tarcie, 190
wzór, 191
Kołowrót na wale, 196
tabela XIV, 197
tarcie, 196
wzór, 197
Kołowrót z trybem zębatym, 198
stosunek szybkości, 199
tabela XX, 200
zysk mechaniczny, 199
Koń parowy, 124

Kość słoniowa, ciężar właściwy, 74
Kran ob. żóraw
Kremaliera w zegarach, 405
Krokiet, 375

Lawirowanie, 37
Libela, 76
Lokomotywa, 109

Ładunek łamiący, 219
Łańcuchowa linia, 277

Masa, 290
Maszyna Atwooda, 285
  do przebijania metali, 321
  do wbijania pali, 312
Maszyny (proste), 111, 128
Mechanizm bijący godziny, 403
Metoda najmniejszych kwadratów, 412
Metr, 5
Mierzenie siły, 11
Młot, 308
  teorya jego, 308
Moment, 163
Mosiądz, ciężar właściwy, 74
Most, 250
  mechanika mostu, 268
  na rzece Wye, 264
  o czterech podporach, 258
  o dwu podporach, 255
  o dwu zawieszeniach, 260
  rurowy, 274
  wiszący, 277
  — naprężenie, 280
  — zasada mechaniczna, 277
Możliwość wypadku, 45
Mutra, 175

Naprężenie belki, 220
Naprężenie sznura, 28
Newton — ciężkość, 351
Nożyce, 159

Obciążenie łamiące, 219
Oddziaływanie (reakcya), 13
Określenie siły, 9
Ołów — ciężar właściwy, 74
Ołowianka, 76
Opór przeciw rozciąganiu, 213
  przeciw ściskaniu, 216
Osie trwałe

Para sił, 60
Parabola, 278, 304
Pierwsze prawo ruchu, 283
Pion, 76
Plateau, doświadczenia, 334
Pochylenie skrętu względem osi, 175
Pocisk — droga jego, 302
Podpora, 41
Połączenia belkowe, 261
Praca, 111, 122
Prawo drążka, 154
  rozkładu ciśnień, 51
  spadku ciał, 291
  tarcia, 96, 106, 108
  tarcia w blokach, 119
Prędkość, 284
Pręt — równowaga jego, 50
Przyciski, 250
Przyrząd do równowagi trzech sił, 14
  do środka ciężkości, 83
  do wykazania tarcia, 87, 89, 103

Rafinowanie cukru, 339
Reakcya, 13
Regulator odśrodkowy, 337
Równia pochyła, 165
  siły działające, 171
  stosunek szybkości, 174
  tabela XIII, 169
  tabela XIV, 172
  tabela XV, 173
  tarcie, 166
  zysk mechaniczny, 174

Równoległe siły, 48
przeciwne, 59
rozkład, 49, 51
skład, 57
wypadkowa, 58
Równoległobok sił, 18
Równowaga dwu sił, 12
niestała, 80, 344
obojętna, 82,
pręta, 53, 56
stała, 80, 344
trzech sił, 14
Rozkład sił, 20
jednej siły na dwie, 28
jednej siły na trzy, 38
sił równoległych, 51
Rozszerzalność ciał, 388
Ruch — pierwsze prawo, 283
ciała spadającego, 282
ciała rzuconego, 302
Ruch obrotowy, 326
przy rafinowaniu cukru, 339
wpływ na ciecze, 331
w regulatorze, 337
zastosowania, 336
ziemi, 336

Sekunda — spadek przez sekundę, 293
Sekundowe wahadło, 354, 385
Siła, 9
jednostka, 11
mierzenie, 10
mniejsza i dwie większe, 21
niszcząca ruch, 10
określenie, 9
przedstawianie, 11
przykłady objaśniające, 9
rozkład jednej na dwie, 28
rozkład jednej na trzy, 38
tarcia, 86
wielkość, 10
Siły — równoległe, 48
Siły równoległobok sił, 18
równowaga dwu, 12
równowaga trzech, 14
w równi pochyłej, 171
rozkład ich, 27
Skazówki zegara, 400
Skład sił, 7, 16,
równoległych, 49, 51, 57.
Składanie drgań, 382
Skrzywienie belki, 224
tabela XXIII. 224
Ślimak w zegarach, 403
Soczewka wahadła — podnoszenie i obniżanie, 387
Spadek ciał, 282
w ciągu sekundy, 293
Spółczynnik tarcia, 98, 107
Sprężystość belki, 220
Środek ciężkości, 77
obracającego się koła, 82
położenie jego, 79
Środek uderzenia, 368
wahań, 372
Stopa — jak się oznacza, 15
i metr, 5
Stopień bezpieczeństwa, 46
Stopofunt, 123
Stosunek szybkości w bloku, 131
w bloku różnicowym, 143
w bloku złożonym, 136
w kołowrocie, 189
w kołowrocie z trybem zębatym, 199
w równi pochyłej, 174
w szrubie, 179
Szruba, 175
do spajania, 184
i kołowrót, 206
stosunek szybkości, 179
tabela XVI, 178
tabela XVII, 182,
zastosowanie do prasy, 180
Szybkość, ob. prędkość

Tarcie, 86
dokładne prawo, 98,
i chropowatość, 87
i ciśnienie, 96
jest siłą, 87
kąt tarcia, 103
metoda doświadczeń, 88
na oś, 193
nadmierne, 147
natura jego, 86
prawa tarcia 96, 106, 108
przezwyciężenie tarcia, 120
przyrządy do jego wykazania, 87, 89, 103
spółczynnik tarcia, 98, 107
średnie, 98
statyczne, 106
sznura o pręt żelazny, 113
tabela I, 91
tabela II, 94
tabela III, 97
tabela IV, 100
tabela V, 102
tabela VI, 103
tabela VII, 106
tabela VIII, 107
w bloku, 117, 119
w bloku różnicowym, 144
w drążku, 155
w kołach, 120
w kołowrocie na osi, 191
w kołowrocie na wale, 196
w równi pochyłej, 166
w żórawiu, 205
wpływ na powstrzymanie ruchu, 93
zmniejszanie tarcia, 87
Trójnóg, 40
wytrzymałość jego, 40
Tryb, 198

Uderzenie — środek uderzenia, 372, 374
Układ kół w zegarach, 398

Waga, 63, 156
fałszywa, 65
sprawdzanie dokładności, 65
Waga sprężynowa, 26
Wahadło, 345
Galileusz, 347
i ciężkość, 354
kołowe, 345
kompensacyjne, 387
proste, 345
proste izochroniczne, 367
sekundowe, 354, 385
stożkowe, 365
wzór, 354
zegarowe, 363
złożone, 362
Wahadłowy ruch, 346
Wahania — trwanie wahań, 347, 351
środek, 368
Wiatr — kierunek, 33
Wielkie koła, korzyści ich, 121
Wielkość siły, 11
Wieża pochyła w Pizie, 286
Willisa przyrządy, 4
Winda, 41, 188
Włókna drzewa, 212
rozciągnięte, 227
ściśnięte, 227
Wypadek — możliwość, 45
Wychwyt — 392
spoczywający, 396
wsteczny, 396
Wypadkowa, 17
sił równoległych, 59
Wytrzymałość belki, 234

Wzory — wyprowadzanie ich z doświadczeń, 409

Załamanie belki, 229
Zasady budowy mostów, 250
Zawieszenie, 41, 216
Zegar, 385
  chód jego, 390
  zasady mechaniczne, 386

Żeglowanie, 32
  pod wiatr, 36
Żelazne belki, 272
Żelazo, ciężar właściwy, 74
  własności, 270
Żóraw, 41, 201
  tabela XXI, 204
  tabela XXII, 205
  tarcie, 205
  zysk mechaniczny, 206