

V. NEWTON. — LEIBNIZ. — JAKUB I JAN
BERNOULLIOWIE. — MASZYNA PAROWA.
PAPIN — SAVERY

Galileusz zapoczątkował dynamikę badaniem spadku ciała po równi pochyłej i rzutu pocisku w kierunku poziomym. Pierwszy z tych ruchów był statycznie ograniczony, a drugi zupełnie swobodny. Huyghens rozwijał dalej badanie ruchu statycznie ograniczonego, biorąc pod uwagę wahadło, którego ciężarek, zawieszony na nitce, przebiega drogę ściśle określoną. Badaniem ruchu swobodnego zajął się trzeci z wielkich twórców dynamiki Newton. Oddał on nauce podwójną usługę. Najprzód przez odkrycie ciężenia powszechnego rozszerzył znakomicie zakres mechaniki fizycznej. Winniśmy mu następnie wygłoszenie formalne zasad mechaniki teoretycznej, dziś jeszcze ogólnie przyjmowane.

Izaak Newton, ur. w r. 1642, czyli trzynastu lat po Huyghensie, był uczniem a następnie profesorem Trinity-College w Cambridge. Jego pomnikowe dzieło, *Philosophiae naturalis principia mathematica* (Zasady matematyczne filozofji natury) ukazało się w r. 1686. Jako przedstawiciel uniwersytetu zasiadał w parlamencie, był dyrektorem mennicy w Londynie

i prezesem Królewskiego Towarzystwa, najwyższej instytucji naukowej w Anglii. Zmarł w 1727.

Ciążenie powszechne przeczuwane już było przed Newtonem, żaden wszakże z jego poprzedników nie wyraził ściśle swego poglądu. Kopernik pisał w r. 1543, w swem dziele *O obrotach ciał niebieskich*: „Co do mnie to sądzę, że ciężkość nie jest niczem innem, jak tylko pewnym popędem przyrodzonym, nadanym cząstkom ciał... aby się one jednoczyły i całość stwarzały, łącząc się z sobą w postaci kulistej.“ Keppler w r. 1604 przyrównywał ciężenie do przyciągania magnetycznego. Newton, nie wyrażając zdania o naturze tej siły, rozważał ją matematycznie, bo jak powiedział: „wszystko, co nie wynika ze zjawisk jest hipotezą, a hipotezy, czyto metafizyczne, czy fizyczne, czy mechaniczne, czy odnoszące się do rzeczy tajemniczych, nie powinny być przyjmowane w filozofji doświadczalnej. W filozofji tej twierdzenia wyprowadzane są ze zjawisk a ogólniane przez indukcję“ (t. j. przez wywód zasad ogólnych ze szczegółowych danych).

W dziele swem określa najprzód Newton ilość materji, mówiąc, że mierzy się ona razem wziętemi: gęstością i objętością. Zapowiada, że ilość materji oznaczać będzie wyrazami: *ciało* lub *masa* i że tę ilość poznaje się przez ciężar ciała, gdyż sprawdzał doświadczeniami, że ciężary ciał są proporcjonalne do ich mas. Ilością ruchu nazywa iloczyn z masy przez prędkość i powiada, że ruch całkowity jest sumą ruchów każdej z części. Tak więc ilość ruchu jest podwójna w ciele, którego masa jest podwójną, podczas gdy prędkość zostaje taż sama; lecz gdy zdwoimy i prędkość, to ilość ruchu będzie poczwórna. Siłę bezwładności określa jako siłę, która tkwi w materji (*vis insita*) i stanowi jej władzę stawiania oporu. W skutku tej siły, każde ciało pozostaje samo przez się w stanie

spoczynku lub ruchu prostoliniowego i jednostajnego. Siła ta jest zawsze proporcjonalną do masy i objawia się w dwóch postaciach: jako opór, gdy jaka inna siła stara się zmienić stan, w jakim się ciało znajduje, albo też jako impuls, gdy ciało usiłuje zmienić stan stawiającej mu opór przeszkody.

Siła przyłożona (*vis impressa*) jest działaniem, w skutku którego zmienia się stan ciała, czyto stan spoczynku, czy też ruchu prostoliniowego i jednostajnego. Siła ta polega wyłącznie na działaniu i nie pozostaje w ciele, gdy działanie ustaje. Ciało jednak utrzymuje się w swym nowym stanie w skutku tkwiącej w niem siły bezwładności. Siła przyłożona pochodzić może z uderzenia, ciśnienia lub siły dośrodkowej.

Siła dośrodkowa jest to ta siła, w skutku której ciała dążą do pewnego punktu, jako do środka, czyto że są ciągnione lub pchane do tego punktu, czy też dążą do niego w jakikolwiek inny sposób. Ciężenie, które sprawia, że ciała dążą do środka ziemi, — siła magnetyczna, w skutku której żelazo dąży do magnesu, i siła, jakakolwiek ona jest, która odciąga w każdej chwili planety od ruchu prostoliniowego i zmusza je do krążenia po linjach krzywych, — wszystkie te siły są dośrodkowe.

Kamień, kręcony w procy, działa na rękę, wyciągając sznur tem silniej, im prędzej kręcimy, — a wyrывa się, gdy go nie przytrzymujemy. Siła przytrzymująca, równa i przeciwna sile, która sznur napręża, skierowana ku ręce trzymającej procę, jest siłą dośrodkową. Tak samo wszystkie ciała, poruszające się po okręgach kół, usiłują się oddalać od środków obrotów. Bez pomocy innej siły, sprzeciwiającej się temu dążeniu, stawiającej mu opór i utrzymującej ciała w ich obrotach, czyli bez pomocy siły dośrodkowej, ciała te poleciałyby po linii prostej ruchem jednostajnym.

Pocisk, rzucony w przestrzeń, nie spadłby na ziemię, gdyby na niego nie działało ciążenie, — lecz leciałby w linii prostej ku niebu ruchem jednostajnym, gdyby powietrze nie stawiało mu oporu. Ciężenie więc sprawia, że pocisk zbacza z linii prostej i nieustannie zbliża się ku ziemi — a zbacza więcej lub mniej, stosownie do wielkości ciążenia i prędkości swego ruchu. Im mniejsze będzie ciążenie pocisku w stosunku do jego masy, tem większa będzie jego prędkość, tem mniej zbaczać będzie od linii prostej i tem dalej spadnie na ziemię.

Kula armatnia, wystrzelona poziomo z wierzchołka jakiej góry z prędkością, pozwalającą jej przebiec dwumilową odległość, zanim spadnie na ziemię, spadłaby dopiero po przebieżeniu mniej więcej czterech mil, gdyby ją wystrzelono z dwa razy większą szybkością, a przy prędkości dziesięć razy większej poleciałaby dziesięć razy dalej (jeżeli pomijać będziemy opór powietrza). I tak, zwiększając prędkość kuli, możnaby powiększać dowolnie nośność strzału, tak że kula spadałaby na ziemię w odległości 10, 30 lub 90 mil, lub też mogłaby krążyć koło ziemi, nigdy nie spadając, a nawet polecieć w linii prostej w dal nieskończoną.

Otóż, dla tej samej przyczyny, dla której kula armatnia mogłaby krążyć około ziemi siłą ciążenia, być może, mówi Newton, że i księżyc, czyto siłą ciążenia (przypuszczając, że ciąży), czy też jaką inną siłą, kierującą go ku ziemi, odciągany jest w każdej chwili od linii prostej i zmuszony do krążenia po linii krzywej i że bez tej siły nie mógłby się utrzymać na swojej drodze. Gdyby ta siła była mniejszą, nie odciągałaby księżycą od linii prostej, gdyby była większą, odciągałaby go więcej niż potrzeba i zbliżała ku ziemi. Wielkość więc tej siły winna być dana i matematycy muszą określić siłę dośrodkową, potrzebną do tego, aby ciało krążyło po danej drodze, — i odwrotnie,

wyznaczyć drogę, po jakiej ciało winno krążyć przy danej sile dośrodkowej, wychodząc z jakiegokolwiek punktu z daną prędkością.

Określa dalej Newton trzy rodzaje siły dośrodkowej, mianowicie: poruszającą, przyśpieszającą i absolutną, i mówi, że siła przyśpieszająca ma się do poruszającej, jak prędkość do ruchu, gdyż tak samo jak ilość ruchu jest iloczynem z masy przez prędkość, tak i ilość siły dośrodkowej poruszającej jest iloczynem z siły dośrodkowej przyśpieszającej przez masę, bo suma wszystkich działań siły przyśpieszającej na każdą cząstkę ciała jest siłą dośrodkową poruszającą całego ciała. Jest to pierwsze wyrażenie poglądu na materję, jako na sumę jednakich cząstek, których liczba stanowi masę. Po raz pierwszy również określa dalej Newton ruch absolutny i ruch względny i wygłasza swe trzy prawa ruchu, które utworzyły podwalinę dynamiki:

I. Każde ciało trwa w swym stanie spoczynku lub ruchu jednostajnego i prostoliniowego, jeżeli siły przyłożone nie zmuszają ciała do zmiany tego stanu.

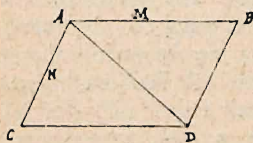
II. Zmiany ruchu są proporcjonalne do siły poruszającej i odbywają się w kierunku linii prostej, wzdłuż której siła jest przyłożona.

III. Działanie jest zawsze równe i przeciwne oddziaływaniu, czyli że wzajemne działania dwóch ciał są zawsze sobie równe i skierowane przeciwnie.

Z praw tych wyciąga dwa wnioski.

I. Ciało, popychane przez dwie siły, przebiega przy równoczesnem działaniu obu sił przekątną równoległoboku w tym samym czasie, w ciągu którego przebiegłoby oddzielnie każdy z boków. Jeżeli w danym przeciągu czasu ciało pod działaniem samej siły M , przyłożonej w A , przebiegłoby ruchem jednostajnym długość AB , a pod działaniem samej siły N , przyłożonej również w A ,

długość AC , to pod działaniem obu sił razem ciało w tym samym czasie przebieży przekątną AD równoległoboku $ABDC$. Bo ponieważ siła N działa według linii AC , równoległej do BD , więc ta siła stosownie do drugiego prawa ruchu, w niczem nie zmienia prędkości, z jaką ciało zbliża się do BD pod działaniem siły M . Ciało więc zbliży się do BD w tym samym czasie bez względu na to, czy siła N była do niego przyłożona, czy



Rys. 29.

nie, — i po upływie tego czasu znajdować się będzie w jednym z punktów linii BD . Tym samym sposobem dowieść można, że po upływie tegoż samego czasu ciało znajdować się będzie w jednym z punktów linii CD . Koniecznie więc znajdować się będzie w punkcie przecięcia D tych dwóch linii, po przebieżeniu, na mocy pierwszego prawa, linii prostej AD .

2. Wynika stąd, że siła AD złożona jest z dwóch sił ukośnych jakichkolwiek AB i BD i odwrotnie może być rozłożoną na dwie jakiegokolwiek siły ukośne AB i BD . Ten rozkład i to składanie sił znajdują w każdej chwili potwierdzenie w mechanice.

Te są główne zasady, jakimi Newton zubożył mechanikę, wyjęte dosłownie z jego pomnikowego dzieła. Objasnienie ruchu ciał niebieskich działaniem siły dośrodkowej, pochodzącej z przyciągania słońca, która w każdej chwili odciąga te ciała od ich drogi naturalnej prostoliniowej, było najgenialniejszym z jego pomysłów. Na wprowadzone przezeń do filozofii natury pojęcie działania z odległości nie zgadzali się uczeni współcześni; zastrzegł się też Newton, że prawo ciążenia powszechnego uważa tylko za prawo matematyczne, a nie za wyraz konkretnej rzeczywistości. Za jego czasów bowiem panowały w świecie

uczonym poglądy Descartes'a, który ruchy ciał niebieskich objaśniał hipotezą wirów materji subtelnej, utrzymujących planety na ich orbitach. Wiry te poczytywano także za przyczynę ciężkości. Descartes naszkicował na podobnych zasadach objaśnienie tego zjawiska a Huyghens ułożył specjalny traktat, w którym rozwinął i ulepszył objaśnienia Descartes'a. Gdy Newton mówił o przyciąganiu słońca i wogóle o przyciąganiu wzajemnem wszystkich cząstek materji, uważano jego pogląd za zacofany w stosunku do wirów Descartes'a. A jednak metoda Newtona zwyciężyła, wykazując, że można posługiwać się w nauce pojęciem siły, i to siły działającej z odległości, nie znając istotnej jej natury.

Rozważając znaczenie odkryć Newtona dla rozwoju mechaniki, sprowadza je Mach do czterech punktów następujących: 1) uogólnienie pojęcia siły, 2) wprowadzenie pojęcia masy, 3) ściśle i ogólne wyrażenie zasady równoległoboku sił, 4) wprowadzenie zasady równości działania i oddziaływania.

Do dziś jeszcze nie mamy nic do zmienienia w istotnej zawartości praw, które wygłosił Newton, jako zasady dynamiki. Co do równoległoboku sił, to wspominałem w poprzednich wykładach, że Leonard Vinci, Stevin i Roberval wygłaszali już to prawo, lecz wywody ich były czysto statyczne, niezależne zupełnie od własności ruchu. Newton przeciwnie ustalił prawo równoległoboku sił na zasadach dynamiki i jego wywód miał wielkie znaczenie dla samej organizacji nauki. Myśl związania składu rozkładu sił ze składem i rozkładem ruchów, rzuconą już była przez Arystotelesa, który znał składanie kinematyczne prędkości a w swej dynamice ustalił związek między siłą a prędkością. W mechanice nowożytnej myśl ta pojawia się w Principjach Newtona, a jedno-

cześnie w pismach dwóch uczonych francuskich: Vari-
gnona i Lamy'ego.

Wywody Newtona są czysto geometryczne. Rachunków
wyższych, których był twórcą i z których pomocą doszedł
do wielu twierdzeń podanych w jego dziele, w wykładzie
nie używa. Metodę fluksyj, pod postacią której wytwor-
zył te rachunki, podał dopiero w późniejszych swych
pracach. O jej autorstwo powstał wtedy głośny w dzie-
jach matematyki spór między Newtonem a Leibnizem,
który już w r. 1675 używał różniczek na dziewięć lat przed
pierwszem ogłoszeniem Newtonowskiego rachunku fluksyj.
Czyj był pierwszy pomysł analizy matematycznej, która
zapewniła dalszy rozwój mechaniki, trudno dziś orzec.
Najogólniej przyjmowaną jest opinia, że odkrycia New-
tona i Leibniza nastąpiły równocześnie i niezależnie jedno
od drugiego. W nauce utrzymały się notacje Leibniza,
jako dogodniejsze w użyciu.

W dziedzinie hydromechaniki badał Newton wpływ
wody przez otwór w dnie naczynia cylindrycznego pio-
nowego i wnosił, że prędkość wypływu odpowiada połowie
wysokości poziomu w naczyniu. Wkrótce wszakże zmu-
szony był sam przyznać, że wniosek ten nie daje się po-
godzić z naturalną wysokością wytrysków. Dopiero w dru-
gim wydaniu *Principjów* z r. 1714 zwrócił uwagę
na skutki ścieśnienia żyły przy wyjściu z otworu i przy-
mował, że prędkość w przekroju ścieśnionym odpowiada
wysokości poziomemu. Teorja stawiała się zgodniejszą z do-
świadczeniem, nie zyskując wszakże solidniejszej podstawy.
Więcej powodzenia miał Newton przy badaniu ruchu
cieczy naturalnych, opierając teorję tego ruchu w pierw-
szem wydaniu *Principjów* na pojęciu tarcia wewnętr-
znego sąsiednich strug. Tarcie te określił mówiąc: „Opór, po-
chodzący z niedostatecznej płynności (*ex defectu lubri-*

citatis), przy jednakich innych okolicznościach jest proporcjonalny do prędkości względnej czastek."

Podczas gdy w Cambridge, wśród ciszy uniwersyteckiej, pracował Newton, jego współzawodnik w odkryciu rachunków wyższych Gottfried Wilhelm Leibniz używał rozgłosnej sławy w Europie, jako uczony i filozof. O cztery lata młodszy od Newtona, bibliotekarz dworu hanowerskiego, doradca w sprawach naukowych różnych monarchów (nawet Piotr Wielki mianował go tajnym sówietnikiem), Leibniz zajmował się żywo kwestjami mechanicznymi. Między innymi, razem z naszym Kochańskim, z którym prowadził naukową korespondencję, brał udział w rozprawach nad rozkładem ciśnień kuli, umieszczonej na dwóch równiach pochyłych. Rozprawy te prowadzone były na łamach czasopisma lipskiego *Acta Eruditorum* w latach 1684—1693 i nie doprowadziły do ścisłego rozwiązania zadania pomimo, że prawo równoległoboku sił było już znane w r. 1687. Z większym powodzeniem podjął Leibniz inną kwestję mechaniczną, wywołując 57 lat trwający spór uczonych o dwa pojęcia: ilości ruchu i siły żywej.

W artykule, podanym w *Acta Eruditorum* z r. 1686 p. t. Krótki dowód słynnego błędu Descartes'a i innych, dotyczącego mniemania o prawa natury, jakoby Bóg utrzymywał zawsze tę samą ilość ruchu, prawa stosowanego przez nich mylnie, nawet w mechanice, zwrócił uwagę Leibniz, że w maszynach w równowadze obciążenia są w stosunku odwrotnym prędkości przesunięć. Z faktu tego wyciągnąć można wniosek, że iloczyn z „ciała“ (t. j. masy) przez prędkość jest miarą siły. Descartes pożytywał ten iloczyn za ilość niezmienną, lecz Leibniz wnosił, że tylko przypadkowo przy rozważaniu maszyn taka miara siły jest po-

prawną. Dla Leibniza prawdziwa miara siły jest inna i wyznaczać ją należy w funkcji drogi, podobnie jak to robili: Galileusz i Huyghens. Prędkością, nabytą przy spadku, ciało podnieść się może do wysokości, z jakiej spadło. Jeżeli więc przyjmujemy, że jedna i ta sama siła potrzebną jest dla podniesienia pewnego ciężaru do pewnej wysokości, co i ciężaru cztery razy większego do wysokości cztery razy mniejszej, to za miarę siły wziąć należy iloczyn z „ciała“ przez kwadrat z prędkości; gdyż biorąc za miarę siły iloczyn z „ciała“ przez prędkość, otrzymalibyśmy prędkość, nabytą w spadku, tylko dwa razy większą.

Wracając do tego przedmiotu w następnym artykule z r. 1695, odróżnia Leibniz proste ciśnienie, czyli siłę martwą od siły, jaką ma ciało w ruchu, czyli siły żywej, uważając, że ta ostatnia jest sumą popędów kolejnych ciśnień. Popędy te wytwarzają w rzeczywistości impet mv , ale ten impet nie jest w żadnym razie prawdziwą miarą siły, a ponieważ przyczyna odpowiadać powinna skutkowi, to tę prawdziwą miarę stanowi iloczyn mv^2 . Leibniz zwraca przytem uwagę, że przyjęcie tylko tej miary siły wyłącza możliwość ruchu nieustającego.

Leibniz tak samo, jak Descartes, nie miał jeszcze rzetelnego pojęcia o masie. Mówił o ciałach, o obciążeniach, o ciałach nierównej wielkości, mających jednaki ciężar gatunkowy i t. p., lecz wyraz „masa“ użyty przezeń został raz tylko w drugim artykule i prawdopodobnie zapożyczony od Newtona. Dla nadania wyrażeniom Leibniza ściśle określonego znaczenia wypadaloby wprowadzić do nich masę, co też uczynili jego następcy. Zresztą metoda Leibniza jest więcej naukową od Descartes'a, chociaż w artykułach, o których była mowa, pomieszane zostały dwie kwestje: jedna, dotycząca miary siły, a druga — niezmienności obu iloczynów: ilości ruchu i siły żywej.

W rzeczywistości te dwie sprawy nie mają nic wspólnego. Miary siły, podawane przez Descartes'a i Leibniza, a raczej miary zdolności czynnej ciała w ruchu, są obie poprawne, lecz mają każda inne znaczenie. Leibniz zaznaczył wyraźnie, że nie należy ich mieszać ze zwykłą Newtonowską miarą siły. Co się tyczy kwestji niezmienności, ilości ruchu lub siły żywej, to Newton dowiódł już poprzednio, że ilość ruchu jest istotnie stałą dla systemów materialnych swobodnych, nie poddanych żadnemu działaniu zewnętrznemu. Zasada, na której Huyghens oparł teorię wahadła fizycznego, wykazała, że siła żywa pozostaje również niezmienną, gdy jej nie narusza praca, przez siły wykonana. Spór, wszczęty przez Leibniza, ze zwolennikami Descartes'a, polegał więc tylko, jak mówi Mach, na prostych błędach w zrozumieniu znaczenia pojęć: ilości ruchu i siły żywej, a jednak ciągnął się aż do wydania *Dynamiki* d'Alemberta w r. 1743. Wprowadzona wszakże do mechaniki przez Leibniza siła żywa, przemianowana za naszych czasów na energję, stała się zawiązkiem znacznych postępów w różnych działach wiedzy.

W ruchu naukowym, ześrodkowującym się w drugiej połowie XVII w. w czasopiśmie lipskiem *Acta Eruditorum*, żywy udział przyjmowali obok Leibniza matematycy Jakub i Jan Bernoulliowie. Rodzina holenderska Bernoullich, wypędzona dawniej ze swego kraju przez Hiszpanów, osiadła w Bazylei i tam ur. w 1654 r. Jakub Bernoulli był profesorem matematyki; w fizyce był on zwolennikiem poglądów Descartes'a. W swem piśmie *De gravitate Aetheris* z r. 1683 upatrywał przyczynę ciężkości ciał w działaniu otaczającego je płynu sprężystego, który nazywał eterem. W dziedzinie mechaniki zajmował się określonym przez Huyghensa środkiem wahań, nie znajdując, aby była dostatecznie pewną przyjęta za podstawę tego określenia zasada, iż środek cięż-

kości pewnego systemu ciężarów nie może się nigdy wznosić do wysokości większej, niż ta, z której spadał. Rozpatrzył więc gruntownie teorię Huyghensa i usiłował ją wywieść z zasadniczych praw statyki. Po wielu nieudanych próbach doszedł do pierwszego bezpośredniego i ścisłego rozwiązania zadania środka wahań, tem więcej zasługującego na uwagę, że mieści ono w sobie zawiązek głównej zasady dynamiki, mianowicie zasady d'Alemberta. Jakub Bernoulli wziął pod uwagę ruchy, jakie ciężkość nadaje w każdej chwili ciężarom, tworzącym wahadło złożone, — a ponieważ te ciężary, jako związane ze sobą, nie mogą tych ruchów skuteczniać w całości, — rozważał przeto ich ruchy, jako złożone: z ruchów, jakie ciężary mogą wykonywać i z innych ruchów, które zostają unicestwione i w skutku których wahadło pozostaje w równowadze. Zadanie sprowadzone zostało w ten sposób do zasad statyki. Jakub Bernoulli doszedł tą drogą do wzorów ogólnych na środek wahań ciężarów wszelkich kształtów, wykazał ich zgodność z zasadą Huyghensa i dowiódł tożsamości środka wahań i środka uderzenia.

O trzynaście lat młodszy brat Jakuba, Jan Bernoulli, był profesorem matematyki w Gröningen, a później objął katedrę po bracie w Bazylei. Obaj Bernoullowie zajmowali się stosowaniem nowej analizy do rozwiązywania różnych zadań mechaniki a głównie do wyznaczania linii krzywych, czyniących zadość pewnym warunkom. Jakubowi zawdzięczamy izochronę i krzywą sprężystości, Janowi brachistochronę. Jan Bernoulli upamiętnił nadto swe imię, w dziejowym rozwoju mechaniki, przez pierwsze zupełnie ogólne wyrażenie zasady przesunąć przygotowanych.

O różnych kolejach, jakie przechodziła ta zasada, wielokrotnie już przyszło mi wspominać, poczynając od pierwszego jej zawiązku w *Problèmes de Mécha-*

n i c z n y c h Arystotelesa, a kończąc na wyrażeniu przez Descartes'a zasady pracy mechanicznej, w którem stosunek prędkości zastąpiony był stosunkiem dróg przebieżonych. Varignon w swym *Projekcie nowej mechaniki*, ogłoszonym w r. 1687, opierał się więcej na Arystotelesie, niż na Descartes'ie i dopiero w jego „*Nowej Mechanice*“ podany został list Jana Bernoulliego z 26 stycznia 1717 r., mieszczący w sobie w całości ogólności pełną zasadę przesunąć przygotowanych.

„Wyobraźmy sobie,“ mówi Jan Bernoulli: „wiele różnych sił, działających w różne strony i w różnych kierunkach, dla utrzymania w równowadze pewnego punktu, linii, powierzchni, lub ciała; przypuśćmy także, że całemu systemowi tych sił nadamy jakikolwiek ruch bardzo mały, czyto równoległy do pewnej stałej prostej, czy też obrotowy około pewnego stałego punktu. Skutkiem tego ruchu każda z sił posunie się naprzód albo się cofnie po swoim kierunku, o ile nie działa prostopadłe do małego ruchu; w tym bowiem przypadku siły nie ulegną zmianie, gdyż posunięcia naprzód lub cofnięcia, które nazywam prędkościami wirtualnymi, są tylko powiększeniami lub zmniejszeniami długości, przedstawiających te siły, a owe powiększenia lub zmniejszenia otrzymać można, prowadząc przez koniec linii, przedstawiającej każdą siłę, prostopadła do zmienionego przez mały ruch kierunku tejże siły. Ta prostopadła odetnie na nowym kierunku siły pewną małą długość, która będzie miarą prędkości wirtualnej tejże siły. Niech będzie np. P , jakikolwiek punkt systemu, utrzymującego się w równowadze, F jedna z sił, popychających lub przyciągających punkt P w kierunku FP lub PF ; Pp mała linja prosta, którą przebiega punkt P , skutkiem nadanego systemowi małego ruchu. Ruch ten przenosi kierunek siły PF do położenia pj , które będzie ściśle równoległe do PF , jeżeli mały ruch

odbywa się równolegle do pewnej danej prostej, albo też czynić będzie z FP pewien kąt bardzo mały, jeżeli ruch jest obrotem około punktu stałego. Prowadząc PC prostopadło do fp , otrzymamy Cp jako prędkość wirtualną siły F , tak, że iloczyn $F \times Cp$ daje to, co nazywam energją (a co my nazywamy pracą przygotowaną). Zauważmy, że Cp jest dodatnie lub odjemne względem innych; jest dodatnie, jeżeli punkt P jest popychany przez siłę F i kąt FPp rozwarty — a odjemne, gdy kąt FPp jest ostry. Przeciwnie zaś gdy punkt P jest ciągniony, Cp będzie odjemne przy rozwartym kącie FPp a dodatnie przy ostrym. Zważywszy to wszystko, stawiam podanie ogólne następujące:

Rys. 30.

Przy każdej równowadze jakichkolwiek sił, w jakikolwiek sposób przyłożonych i działających według jakichkolwiek kierunków, jedno na drugie, pośrednio lub bezpośrednio, suma energij dodatnich będzie równa sumie energij odjemnych, wziętych ze znakiem przeciwnym."

Jeżeli w to podanie Jana Bernoulliego z r. 1717, które dosłownie przytoczyłem, zamiast „energji“, oznaczającej dziś inne pojęcie w mechanice, wstawimy „pracę wirtualną“, otrzymamy twierdzenie prac przygotowanych, jak jest wyrażane w dzisiejszych podręcznikach mechaniki.

Mówiąc o pracach Huyghensa nad środkiem wahań, zwracałem uwagę, że zasada, na której oparł teorię wahadła fizycznego, polegająca na równości spadku i podniesienia wielu ciał, spadających razem a potem podnoszących się każde oddzielnie z prędkością, nabytą podczas spadku, — sprowadza się do tego, że w ruchu ciał ważkich suma iloczynów z mas przez kwadraty z prędkości w każdej chwili pozostaje bez zmiany, podczas gdy ciała poruszają

się razem w jakikolwiek sposób, lub gdy przebiegają swobodnie też same wysokości pionowe. Zaznaczył to sam Huyghens w piśmie, odnoszącem się do metod, użytych przez Jakuba Bernoulliego i margrabię de l'Hopital w ich pracach, dotyczących środka wahań. Wniosek ten uważany był jako jedno z twierdzeń mechaniki, lecz skoro Jan Bernoulli przyjął ustalone przez Leibniza różnice między pojęciem sił martwych, czyli ciśnień, działających bez wytwarzania ruchu i sił żywych, towarzyszących ruchowi, — jak również mierzenie sił żywych iloczynami z mas przez kwadraty z prędkości, — doprowadziło go to do uznania powyższego wniosku za wynik teorii sił żywych i ogólne prawo natury, według którego suma sił żywych wielu ciał utrzymuje się niezmienną, podczas gdy te ciała działają jedno na drugie przez proste ciśnienie, a jest stale równa sile żywej, wynikającej z działania tych sił, które nadają ruch ciałom. Jan Bernoulli dał tej zasadzie nazwę zachowania sił żywych i posługiwał się nią z powodzeniem przy rozwiązywaniu niektórych zadań, nie dających się przedtem rozwiązać innemi metodami.

Przechodzę do rozwoju innych działów mechaniki w wieku XVII. Doświadczenia nad tarcie, o których wspominałem, mówiąc o Leonardzie Vincim, podjął fizyk francuski Amontons, a wyniki, do jakich doszedł w r. 1699, potwierdziły wnioski Leonarda, że tarcie jest proporcjonalne do ciśnienia a niezależne od wymiarów powierzchni w zetknięciu. Nad podaniami Amontons'a rozprawiali spółcześni uczeni, nie dochodząc wszakże do ustalenia praw tarcia, na które cały wiek jeszcze czekać przyszło. La Hire powątpiewał o niezależności tarcia od wymiarów powierzchni w zetknięciu; Parent określał współczynnik tarcia jako styczną kąta nachylenia płaszczyzny, przy którym ciało na płaszczyźnie ześlizguje się po niej; jeden Leibniz tylko zwrócił uwagę na nieporuszoną przedtem

okoliczność, że własności fizyczne ciał w zetknięciu nie są bez wpływu na wielkość współczynnika tarcia, który nie może być dla wszystkich ciał jednaki, jak w teorii Amon-ton's'a. Leibniz także pierwszy odróżnił tarcie posuwiste od tarcia potocznego.

Zainicjowaną przez Galileusza nauką o wytrzymałości tworzyw zajmował się w drugiej połowie XVII w. Robert Hooke i odkrył prawdziwe podstawy teorii wygięcia belki. Opisując w r. 1678 heljoskop i inne narzędzia, jakie zbudował, wygłosił prawo proporcjonalności wydłużeń lub skurczeń, do natężeń, sprawiających te odkształcenia i zauważył, że pręt wygięty rozciąga się po stronie wypukłej a kurczy po stronie wklęsłej. Wkrótce potem, bo w r. 1680, wspomniany już jako hydraulik Edme Mariotte spostrzegł przy robieniu doświadczeń nad prętami drewnianymi i szklanymi, że stosunek ciężarów, potrzebnych do zerwania i złamania, jest daleko większy, niż w teorii Galileusza, i że najtwardsze nawet ciała wyciągają się i kurczą proporcjonalnie do obciążeń, a po odjęciu ciężarów wracają do pierwotnego stanu. W swoim *Traité du mouvement des eaux*, w rozdziale, poświęconym wytrzymałości rur wodociagowych, mówi wyraźnie Mariotte, że pręt wyginany kurczy się po stronie wklęsłej, a rozciąga po wypukłej, i na zasadzie tych spostrzeżeń umieszcza włókna obojętne w połowie wysokości przecięcia poprzecznego pręta. Przez długi czas jednak nie uznawano zupełnie włókna obojętnego i mniemano uporczywie, że w belce wyginanej wszystkie włókna rozciągają się w stosunku rosnącym, począwszy od ściany wklęsłej do wypukłej. Dopiero Parent w rozprawie p. t. *De la véritable mécanique des résistances relatifs des solides* z r. 1713 dowiódł, że suma oporów włókien rozciąganych, musi być

równa sumie oporów włókien, które się kurczą, ustalając przez to w nauce teorię Mariotte'a.

W tym krótkim przeglądzie dziejów mechaniki, teoretycznej i stosowanej, zajmowały nas dotąd ciała stałe i ciecze. Z dziedziny mechaniki gazów i par wzmiankować mogłem tylko eolipilę Herona, jako pierwszy przyrząd, w którym ruch obrotowy wywołany został przez wypływ pary. — przyrządy oparte na działaniu ciśnienia powietrza, jakie opisywali Heron i Philon z Bizancjum i armatę parową naszkicowaną przez Leonarda Vinci. Z pompami powietrznymi, których niejasne zarysy przeglądały w pismach Herona i Philona, ściślejsze doświadczenia wykonywali w XVII w. Boyle w Anglii i Guericke w Niemczech. Huyghens, bawiąc w 1661 r. w Londynie, zapoznał się z wynikami prac Boyla i, wróciwszy do Haagi, poświęcił wiele pracy budowie maszyny pneumatycznej, posługując się przytem pomocą Dionizego Papina, którego dawniej poznał w Paryżu.

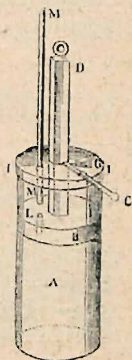
Papin, urodzony w Blois w 1647 r., doktor medycyny, pracował razem z Huyghensem a następnie z Boylem nad budową pompy powietrznej. W Anglii doszedł w r. 1680 do zbudowania pompy dwucylindrowej. Protestant, po odwołaniu edyktu nantejskiego nie mogąc wracać do Francji, powołany został przez Landgrafa heskiego na katedrę w Marburgu. W r. 1684 zbudował pierwszą pompę obrotową oraz wentylator do przewietrzania kopalń. Nastąpiła później budowa dzwonu powietrznego do poszukiwań podwodnych, silnika, opartego na sile wybuchowej prochu, wreszcie prace nad maszyną parową.

Pierwszą myśl spożytkowania prężności pary do podnoszenia wody powziął w początku XVII w. inżynier francuski Salomon de Caus, pozostający na służbie przy ówczesnym władcy Palatynatu Fryderyku V-ym. W swem dziele p. t. *Les raisons des forces mouvantes*

te s, ogłoszonem w r. 1624 we Frankfurcie, opisał „kulę miedzianą, wewnątrz pustą, starannie oblutowaną z otworem do nalewania wody, który można było zamykać — i rurką pionową, przechodzącą przez szczyt kuli, której koniec dolny dochodzi prawie do spodu jej wnętrza. Po napełnieniu kuli wodą i starannem zamknięciu wzmiankowanego otworu kulę ustawiano na ogniu, a wywiązująca się para, wypychała wodę przez rurkę nazewną. Pomysł Salomona de Caus, zapożyczony od Herona, wprowadzony został w życie w Anglii przez margrabiego Worcester. Para, wychodząca z kotła, przeprowadzana była dwiema rurami, zaopatrzonemi w krany, kolejno do dwóch naczyń, z których wypychała wodę do rury, idącej w górę. Z dwóch kranów zawsze jeden tylko był otwarty tak, że, podczas gdy para z jednego naczynia wypychała wodę, to drugie przez ten czas pozostawało pełne. Nadzieje, pokładane przez Worcestera w przyszłość jego maszyny, nie spełniły się i wynalazek został zapomniany, podczas gdy jego autor umierał w r. 1667.

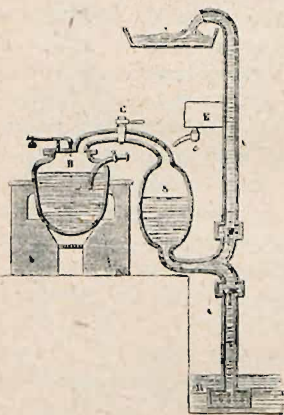
Ponad te wysiłki wzniosły się prowadzone w Marburgu prace Papina. W r. 1690 ogłosił on w lipskich *Acta Eruditorum* artykuł p. t. Nowa metoda otrzymania tanio znacznych sił, w którym, opisawszy swe próby wytwarzania próżni pod tłokiem w cylindrze pompy, za pośrednictwem wybuchu prochu, temi słowy wyraża swą myśl twórczą: „Ponieważ woda, zamieniona w parę, przy użyciu ognia, ma własność wywierania ciśnienia, podobnie jak powietrze, a następnie własność tę traci, gdy się ją skrapla przez oziębianie, — sądziłem, że nietrudno będzie zbudować maszyny, w których zapomocą umiarkowanego i taniego ogrzewania woda wytwarzać będzie próżnię doskonałą, którą niepotrzebnie usiłowano otrzymywać przy użyciu prochu armatniego.“ Mówi dalej, że z pomiędzy różnych ustrojów, jakie można

obmyśleć w tym celu, najlepszym wydał mu się następujący: W cylindrze pionowym *A*, u spodu zamkniętym, porusza się tłok *B*, szczelnie przylegający do ścian cylindra. Dług tłoka *D* przechodzi przez otwór w pokrywie *II*. Gdy tłok jest podniesiony do góry, można go zatrzymać w tem położeniu zapomocą drążka poziomego *C*, umieszczonego na pokrywie, wchodzącego w wycięcie, zrobione w drągu tłoka i przyciskającego do tego drąga sprężyną *G*, umieszczoną również na pokrywie cylindra. Sprężyna ta wypycha drążek w wycięcie, gdy tylko tłok tak wysoko się podniesie, że wycięcie staje nad pokrywą. W tłoku zrobiony jest otwór *L*, przez który wychodzi powietrze z pod tłoka, gdy tłok się opuszcza. Jeżeli do cylindra *A* nalejemy trochę wody i wprowadzimy tłok, opuszczając go aż do ukazania się wody przez otwór *L*, zamykamy wtedy ten otwór drążkiem *M* i nakładamy pokrywę *II*, mającą wszystkie potrzebne otwory, aby zamykała cylinder bez trudności. Wtedy podkładamy pod cylinder umiarkowany ogień, który go szybko rozgrzewa i znajdująca się pod tłokiem woda zamienia się w parę. Ciśnienie tej pary, pokonywując działające na tłok ciśnienie atmosfery, wypycha tłok do góry, dopóki wycięcie w drągu tłoka nie ukaże się nad pokrywą. Wtedy sprężyna *G* wciska drążek *C* w wycięcie i zatrzymuje tłok. Po usunięciu ognia, lekki cylinder szybko stygnie, kondensuje się w nim para i wytwarza się próżnia. Wysuwając wtedy z wycięcia drążek *C*, dajemy tłokowi swobodę ruchu i ciśnienie powietrza spycha tłok na spód cylindra.



Rys. 31.

Jak łatwo wnosić można z opisu, wynalazek Papina niemożliwym był do urzeczywistnienia w praktyce, tkwiła w nim jednak myśl genialna wytwarzania próżni zapomocą pary, na której się oparły późniejsze prace nad maszyną parową. W Anglii tymczasem, rozwijając ideje Salomona de Caus i margrabiego Worcestera, opatentował w r. 1698 kapitan Savery pompę parową, złożoną z kotła *B*, oziębialnika *S*, rury ssącej, która schodzi do zbiornika *R* i rury tłoczącej *A*. Gdy oziębialnik *S* jest napelniony do połowy, para, dochodząca z kotła *B* przy



Rys. 32.

otwartym kurku *C*, wchodzi nad wodę i na nią ciśnię. Pod tem ciśnieniem woda zamyka przepustnik dolny, a otwiera górny i podnosi się w rurze *A*. Po wyjściu wody z oziębialnika zamyka się kurek *C*; umieszczony nad oziębialnikiem zbiornik wody zimnej *E* wypuszcza tę wodę po otwarciu kurka *e* i oziębialnik chłodnie. Para, wypełniająca oziębialnik *S* zostaje skroploną i w oziębialniku wytwarza się próżnia. Ciśnienie powietrza na poziom wody w zbiorniku *R* wypycha wtedy tę wodę

do rury ssącej, woda otwiera przepustnik dolny, zamyka górny i wypełnia oziębialnik *S*. Taki był pomysł kapitana Savery, którego główną oryginalność stanowił zewnętrzny napływ wody zimnej na oziębialnik a w którym ciśnienie powietrza na poziom wody w zbiorniku dolnym, odpowiadało takiemuż ciśnieniu na tłok w cylindrze Papina.

Maszyna parowa Saveryego była pierwszą zastosowaną w Anglii do podnoszenia wody. W zastosowaniu pomysł pierwotny został rozszerzony, przez zdwojenie oziębialnika, co pozwalało, podczas gdy jeden oziębialnik był ochłodzony, podnosić tymczasem wodę wypełniającą drugi. Maszyna jednak przedstawiała też samą własność, jaką się odznaczały pomysły Salomona de Caus i margrabiego Worcestera. Jakkolwiek nie podnosiła wody gorącej wprost z kotła, to jednak stykanie się pary z wodą, wypełniającą oziębialnik, rozgrzewało tę wodę, gdyż prężność pary rozpoczynała swe działanie w oziębialniku dopiero po skropleniu się znacznej jej ilości. Nad usunięciem tego braku pracować zaczął Papin, a o tych jego nowych pracach przyjdzie mi mówić, przedstawiając rozwój mechaniki w XVIII stuleciu.
