6

POSTAWIENIE PROBLEMU

Postawić problem znaczy przede wszystkim dostrzec go, a następnie jasno sobie uprzytomnić wszystkie przeszkody znajdujące się na drodze do jego wyjaśnienia. Dociekania te należy prowadzić na tle metody, za pomocą której zamierza się problem rozwiązać. Pamiętać jednak trzeba, że najpierw jest problem, a potem metoda. Problem wiąże się zawsze z jakąś trudnością lub brakiem. Można wyróżnić trzy zasadnicze źródła braków:

— dostrzeżone błędy w dotychczasowych zapatrywaniach;

— brak odpowiedzi na pytania wynikające logicznie z aktualnego stanu wiedzy;

— niezaspokojone potrzeby np. na nowe urządzenie techniczne (zupełnie nowe albo o poprawionych osiągach).

Formułowany problem wyrasta niejako z naszej dotychczasowej wiedzy. Składa się on w związku z tym jakby z dwu elementów: z tego, co już wiemy o badanym przedmiocie, i z czegoś, co jeszcze nie jest znane, a co właśnie chcemy wiedzieć.

Od wielu lat niektórych astronomów pasjonuje zagadnienie, czy na innych planetach naszego układu słonecznego istnieje życie i jaka jest jego forma. Problem sprowadza się początkowo do pytania, czy życie na innych planetach jest w ogóle możliwe. O planetach mamy już spory zasób wiedzy astronomicznej i astrofizycznej. Znane są ich wielkości i odległości od Słońca. Istnieją też pewne wiadomości o atmosferze niektórych planet oraz o warunkach panujących na ich powierzchni. Pewne przypuszczenia na temat możliwości istnienia świata roślinnego na Marsie stworzyło nawet podstawy do powstania nowej gałęzi wiedzy, a mianowicie astrobotaniki. Dokonywane obecnie loty pojazdów kosmicznych wyjaśnią zapewne w niedługim czasie ostatecznie to zagadnienie.

Problemy mogą mieć różny stopień ogólności, a tym samym i różną pojemność. Problem o charakterze bardzo ogólnym nazywany jest często problemem kompleksowym lub ramowym.

I tak problemem ramowym jest np. problem intensyfikacji procesów spalania w pyłowych paleniskach kotłowych. W problemie idzie o zwiększenie intensywności spalania, czyli o zwiększenie wywiązywania się ciepła w jednostce objętości paleniska. Wiąże się to między innymi z następującymi zagadnieniami:

— zwiększenie prędkości powietrza i spalin przepływających przez palenisko;
— zwiększenie wydatku paliwa (pyłu węglowego);
— zwiększenie wymiany ciepła między spalinami i ściankami paleniska;
— uintensywnienie procesu tworzenia się mieszanki palnej;
— powstanie pulsacji w przebiegu spalania.

Rozwiązanie tego problemu zmusza więc do rozwiązania szeregu zagadnień technicznych, takich jak dobór odpowiednich materiałów czy urządzeń zasilających oraz zagadnień podstawowych z zakresu aerodynamiki, dynamiki spalania oraz wymiany ciepła i masy.

Najciekawsze i często obecnie stawiane są problemy ramowe powstałe na pograniczu różnych dziedzin wiedzy. Problemy te następnie zostają rozwinięte w osobne dyscypliny naukowe. Tak powstała np. aerosprężystość (pogranicze mechaniki ciał stałych i aerodynamiki) oraz termowytrzymałość (pogranicze termodynamiki i wytrzymałości tworzyw). Ogólność problemu w chwili postawienia można określić na podstawie jego logicznych powiązań z innymi problemami tworzącymi daną gałąź wiedzy. Taka wstępna analiza umiejscowienia problemu na „mapie problemów" ma duże znaczenie ze względu na jego perspektywy. Ma to przede wszystkim szczególne znaczenie dla młodych ludzi, którzy muszą dokonać wyboru. W takich jednak przypadkach na ogół nie widzi się szczegółów, a chwyta się to, co jest „ważne" i „na czasie".

Problemy mogą powstawać w różny sposób. W sposób naturalny rodzą się jako kontynuacja dotychczasowych badań „własnych" lub „szkoły". Przy rozwiązywaniu wszelkich problemów zawsze spotykamy się z szeregiem problemów nowych. Ten proces jest nieskończony. Napawa nas to przerażeniem, ale i optymizmem, że dla każdego starczy. Trzeba to tylko dobrze zrozumieć. W każdym bądź razie dostrzeganie problemów jest jedyną metodą rozwijania pracy naukowej. Innym naturalnym źródłem problemów jest przemysł i eksploatacja urządzeń przez niego produkowanych. Jest to bardzo cenne źródło także i ze względu na środki materialne, jakimi dysponuje. Częstą wadą ich jednak jest to, że wyskakują sporadycznie i że nie tworzą powiązanej całości. Najbardziej poszukiwanymi problemami zarówno przez biura konstrukcyjne, jak i wszelkiego rodzaju placówki naukowo-badawcze są problemy długofalowe. Z punktu widzenia realizatora taki problem powinien mieć dwie cechy:

— powinien być ważny, co zapewnia mu właściwe środki finansowe;

— jego zakończenie nie powinno być spodziewane przez zleceniodawcę w nierealnym terminie.

Jeśli problem dotyczy realizacji jakiegoś nowego urządzenia lub poprawienia charakterystyk urządzenia istniejącego, jest on ściśle określany za pomocą warunków technicznych, których opracowanie wymaga często poważnej wiedzy i głębokich studiów. Występują tu dwie zasadnicze trudności:

— problem zostaje ustalony za pomocą dotychczasowych pojęć, istniejącej terminologii i w świetle obecnego stanu wiedzy. Ale rozwiązanie właściwie postawionego problemu daje często szanse wyjścia poza te ramy. Stąd wynikają poważne ograniczenia, a przezwyciężenie ich wymaga nieraz bardzo poważnego wysiłku myślowego, co nie zawsze jest możliwe, szczególnie, gdy ma się do czynienia z ludźmi, którzy nie są zaangażowani emocjonalnie;

— ustalenie warunków technicznych jest uzależnione od wielkiej ilości czynników. Jeśli warunki te mają być optymalne dla wypełnienia określonego zadania, to wszystkie te czynniki powinny być wzięte pod rozwagę, co nie jest łatwe. Niezależnie od tego realizacja problemu, niestety, trwa i to na ogół dłużej niż się początkowo przewiduje, a czynniki w międzyczasie ulegają zmianie. W ten sposób problem się deaktualizuje, a trud włożony w jego realizację idzie częściowo na marne.

Aby trudnościom tym skutecznie zapobiec, w ostatnich latach rozwinięto oddzielną dziedzinę wiedzy, zwaną badaniami operacyjnymi. Badania operacyjne powstały w czasie drugiej wojny światowej. W wojnie tej każda operacja stała się procesem bardzo skomplikowanym. Dla właściwego jej przeprowadzenia konieczne było szczegółowe rozpatrzenie wielu wariantów i umiejętne wybranie wariantu najlepszego.

W związku z tym przy dowództwach większych jednostek powołano grupy ekspertów składające się z przedstawicieli różnych dyscyplin naukowych, takich jak matematyka, fizyka, chemia, psychologia i logika, których zadaniem była analiza zamierzonych operacji. Grupy te dość szybko mogły się poszczycić poważnymi osiągnięciami. Dzięki nim przede wszystkim uzyskano znaczne ulepszenia w sprawie właściwego wykorzystania różnych rodzajów broni, zwłaszcza okrętów podwodnych. Największą jednak zasługą tych grup jest to, że potrafiły one opracować ogólne zasady przeprowadzania badań operacyjnych.

Okazało się, że metody te mają znacznie szersze zastosowanie niż do zagadnień wojskowych. Stwierdzono, że mogą one być z powodzeniem stosowane przy rozwiązywaniu różnych problemów techniczno-ekonomicznych, a także przy ustalaniu warunków technicznych dla nowo projektowanych urządzeń.

W każdym badaniu operacyjnym można wyróżnić cztery etapy. Etap pierwszy polega na budowie modelu abstrakcyjnego, który by uwzględniał wszystkie istotne elementy, mogące mieć wpływ na podejmowaną decyzję, a pomijał wszystkie te, które jedynie zaciemniają obraz rzeczywistości. Idzie więc przede wszystkim w tym modelu o ścisłe sformułowanie, o czym mamy decydować, co jest celem działania, jakie są warunki działania oraz jakimi środkami dysponujemy.

W każdym modelu występują dwa rodzaje wielkości: zależne i niezależne od podejmującego decyzje. Wielkości zależne nazywamy decyzyjnymi, niezależne natomiast parametrami. W zależności od rodzaju parametrów istnieją różne typy modeli. Gdy wszystkie parametry są stałe i znane, wtedy decyzja jest jednoznaczna, a model taki nazywamy deterministycznym. Jeśli choć jeden z parametrów jest zmienną losową ze znanym rozkładem, to jest ze znanymi prawdopodobieństwami, z jakimi przyjmuje on poszczególne wartości, model nazwiemy probabilistycznym. W innym przypadku, gdy parametr nie jest zmienną losową, ewentualnie jest zmienną losową o nieznanym rozkładzie, model będzie modelem strategicznym. Jeśli jednak w modelu strategicznym jesteśmy w stanie przed powzięciem decyzji uzyskać o parametrze jakieś dodatkowe dane, model wtedy będziemy nazywać statystycznym.

Etap drugi polega w badaniach operacyjnych na rozwiązaniu modelu, czyli na wyznaczeniu decyzji optymalnej. Decyzję podejmuje się, posługując się rozumowaniem, rachunkiem lub jednym i drugim. Najczęściej używanymi rachunkami są:

— w modelach determistycznych — rachunek różniczkowy lub metody programowania liniowego,

— w modelach probabilistycznych — rachunek prawdopodobieństwa,

— w modelach strategicznych — teoria gier,

— w modelach statystycznych — statystyka matematyczna.

W trzecim etapie weryfikujemy model na podstawie konfrontacji z uzyskanym rozwiązaniem a następnie, o ile to jest możliwe, uzyskane rozwiązanie z rzeczywistością. Jak już było powiedziane, przy budowie modelu pomijamy cały szereg czynników, które uznajemy za nieistotne, czyli nie mające wpływu na przyszłą decyzję. Łatwo tu oczywiście o przeoczenie. Wiele tych przeoczeń może być usunięte stosunkowo wcześnie właśnie przez przeprowadzenie odpowiedniej konfrontacji.

Ostatni etap badań operacyjnych to opracowanie systemu kontroli. Ponieważ warunki przyjęte w modelu mogą w czasie realizacji urządzenia, co do którego podejmowano decyzję, ulec zmianie, tak że przyjęte rozwiązanie przestanie być optymalne, należy zorganizować system kontroli zapewniający szybką informację o zmianach. System kontroli polega poza tym na przewidywaniu, jak należy zmienić poprzednie rozwiązanie, by uzyskać rozwiązanie optymalne w nowych, zmienionych warunkach bez uciekania się do rozwiązywania całego zagadnienia od początku.

Dla ilustracji zastosowania badań operacyjnych przy ustalaniu warunków technicznych omówimy metodę opracowania założeń do projektu pocisku kierowanego klasy ziemia-powietrze.*

Model. System obronny, którego częścią składową ma być projektowany pocisk, chroni skupiony cel naziemny. Cel ten będzie atakowało 10 nieprzyjacielskich bombowców atomowych o prędkości 900 km/godz. Bombowce na wysokości 14 km mają zdolność manewrową, odpowiadającą przeciążeniu do 3 *g* (*g* — przyspieszenie ziemskie). Należy przypuszczać, że samoloty wykorzystają tę możliwość jako środek obrony przed pociskiem, wywołując w jego układzie kierowania błędy powstałe wskutek ciągłego zmuszania go do zmiany kierunku lotu lub też będą starały się wykonać manewr w celu uniknięcia końcowego przechwycenia. Pomyślność manewru samolotu zależy od właściwego wykrycia przezeń chwili wyrzucenia każdego pocisku. Wykrycie to można utrudnić przez zmniejszenie dymu i płomieni, związanych z wyrzuceniem pocisku. Atakujące bombowce mogą zdecydować się na lot zwartą grupą dziesięciu samolotów. Układ śledzący początkowo nie będzie ich rozróżniał i skieruje pocisk na elektromagnetyczny środek ciężkości całej formacji bombowców. Jeśli zdolność rozróżniania pojedynczych celów nie nastąpi dostatecznie wcześnie, to istnieje niebezpieczeństwo, że pocisk przeleci między nimi.

Samoloty mogą również w celu zmniejszenia skuteczności działania układu kierowania pocisku wywoływać zakłócenia radiowe. Aby jednak to przeciwdziałanie było skuteczne, nieprzyjaciel musi najpierw poznać charakterystyki układu kierowania pocisku oraz opracować, wypróbować i wyprodukować wyposażenie, służące do wywoływania zakłóceń, które dałoby się za-

---

* Grayson Merrill: *Operations Research*. Princeton 1959.

montować w samolotach, nie zwiększając ciężaru i nie zmniejszając osiągów samolotów poza dopuszczalne granice. Ponieważ czynności te są czasochłonne, możemy się spodziewać, że przez pewien czas nieprzyjaciel pod tym względem nie zrobi nam niespodzianki. Poza tym nieprzyjaciel może posłużyć się urządzeniami „oślepiającymi" lub wprowadzić w błąd układ kierowania pocisku za pomocą „fałszywych" celów. Zakładamy istnienie systemu ostrzegawczego, układu identyfikującego cel i układu kierowania pocisku, które mogą zaalarmować nas we właściwym czasie o zbliżaniu się samolotów nieprzyjaciela i dostarczyć danych co do ich położenia, na podstawie których układ kierowania pocisku może przejąć cel.

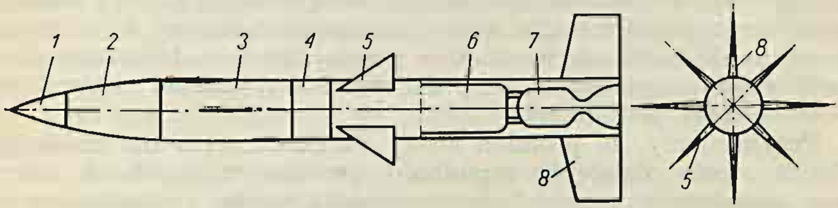
Przyjmujemy, że promień strefy działania pocisków znajduje się w strefie działania samolotów przechwytujących. A więc gdy samoloty przechwytujące prowadzą walkę z bombowcami nieprzyjaciela w strefie działania pocisku, układ kierowania pocisku powinien odróżnić samoloty własne od samolotów wroga. Tor pocisku przebiega nad własnym terytorium, należy więc przedsięwziąć kroki, mające na celu zmniejszenie do minimum niebezpieczeństwa grożącego ludności. Z tego powodu powinno się rozsadzać niewypały i zużyte rakiety startowe lub ograniczyć miejsca upadku tych ostatnich tylko do terenów bezpiecznych. Pociski kierowane są przeznaczone do walki w każdych warunkach atmosferycznych, a więc podczas operowania promieni słonecznych, w czasie deszczu, śniegu i mrozu.

Zakładamy, że istnieje zagrożenie w postaci ataku nieprzyjaciela z dowolnego kierunku, co usprawiedliwia otoczenie bronionego przez nas obiektu wieńcem, składającym się z 10 wyrzutni rakietowych. Oczywiście w tym przypadku niezbędny jest centralny punkt dowodzenia. Zadanie jego polegałoby na odbieraniu początkowych danych o celu, nadawanych przez system obrony, na obliczaniu najlepszego sposobu wykorzystania kilku wyrzutni oraz na przesyłaniu odpowiednich rozkazów otwierania lub zaprzestania ognia. Dokonywałby on również oceny stopnia zniszczenia celu oraz przesyłał wyniki z powrotem do centrali systemu obrony powietrznej.

Stanowisko wyrzutni usytuujemy tak, aby personel obsługi pocisku znajdował się zawsze w jego pobliżu. Specjalną uwagę należy zwrócić na sprawy związane z bezpieczeństwem pracy na terenie stanowiska wyrzutni.

Proces przygotowania pocisku do odpalenia musi być dostosowany do szybkości prowadzonego ognia. Pod tym kątem widzenia powinny być też zaprojektowane urządzenia do wstępnej kontroli pocisku oraz do kontroli przeprowadzonej bezpośrednio przed startem. Przyjmujemy na koniec, że podczas transportu pocisków oraz ich wyładunku z samochodu ciężarowego obsługa nie obchodzi się z nimi zbyt ostrożnie.

R o z w i ą z a n i e m o d e l u. Opierając się na naszych dotychczasowych doświadczeniach i możliwościach produkcyjnych, przyjmujemy pocisk kierowany o następujących układach (rys. 6.1):



Rys. 6.1. Schemat założeniowy pocisku klasy ziemia—powietrze: 1 — układ samonaprowadzania, 2 — głowica bojowa, 3 — łącze zdalnego kierowania, 4 — układ stabilizacji wewnętrznej, 5 — skrzydła, 6 — zbiornik paliwa, 7 — silnik rakietowy, 8 — stateczniki

— układ kierowania: na początkowym odcinku toru pocisk jest kierowany za pomocą rozkazów przesyłanych drogą radiową, w końcowym zaś — samonaprowadzany na cel na zasadzie wykrywania promieniowania podczerwonego;

— układ aerodynamiczny: 4 skośne skrzydła, 4 stateczniki;

— głowica bojowa: odłamkowa z zapalnikiem zbliżeniowym;

— napęd: silnik rakietowy na ciekły materiał pędny, czas spalania 45 sek, prędkość wypływu spalin przy końcu pracy silnika 3000 km/h;

— wyrzutnia: zerowej długości, wyposażona w mechanizm podniesieniowy i kierunkowy.

Przyjęty pocisk kierowany powinien odpowiadać poniższym warunkom:

— musi zapewniać prawdopodobieństwo zniszczenia każdego z dziesięciu bombowców prowadzących atak atomowy, równe 0,9 (odnosi się ono do zniszczenia ich co najmniej w odległości 4 km od punktu przeznaczonego do bombardowania);

— układ pocisku będzie alarmowany przez system obrony powietrznej w 3 minuty po wykryciu celu znajdującego się wtedy w odległości 75 km, po czym współrzędne celu określone z dokładnością ± 3 km zostaną podane dla jego zidentyfikowania;

— na skuteczność działania pocisku nie powinny wywierać wpływu: manewry celu, szyk bojowy bombowców, zakłócenia radiowe, zastosowanie fałszywych celów, warunki atmosferyczne, warunki ukształtowania terenu;

— pocisk nie może stwarzać żadnego niebezpieczeństwa dla własnej ludności;

— musi zapewniać możliwość jego obsługi przez personel o przeciętnych kwalifikacjach technicznych;

— pocisk powinien być ruchomy w stopniu pozwalającym na przygotowanie go do transportu w inne miejsce w ciągu 24 godzin;

— stanowisko wyrzutni musi zapewniać maksimum bezpieczeństwa pracy i musi być dostatecznie zabezpieczone przed atakiem z powietrza.

Jak widzimy, rozwiązanie modelu za pomocą ustalenia odpowiednich warunków taktyczno-technicznych polega na znalezieniu odpowiedzi (w postaci określonego warunku) na każdą kwestię dotyczącą modelu.

Podstawową metodą rozwiązywania problemów sformułowanych w sposób ogólny (a tak są one z konieczności przeważnie formułowane) jest zredukowanie ich do problemów mających bezpośredni wpływ na rozwiązanie, przy czym redukcja ta powinna coraz głębiej sięgać do coraz drobniejszych szczegółów. Sens tej redukcji z logicznego punktu widzenia polega na zastępowaniu terminów ogólnych przez coraz bardziej szczegółowe.

Podczas prób silnika turbinowo-odrzutowego nastąpiła awaria komory. Oto jakie kolejne fazy przyjmuje redukcja tego zagadnienia:

— „komora spalania jest uszkodzona";

— „rura żarowa komory spalania uległa uszkodzeniu";

— „metalowe ścianki rury żarowej są w kilku miejscach przepalone, w innych są pofałdowane i popękane";

— „struktura materiału ścianki uległa zmianie, co stwierdzono na podstawie analizy chemicznej i badań metalograficznych".

To ostatnie sformułowanie pozwala nam odkryć przyczynę zjawiska:

„W nafcie, którą zasilany jest silnik, znajdują się szkodliwe domieszki, które działając na materiał ścianek rury żarowej zmniejszają jego żarowytrzymałość".

W ten sposób powstaje hipoteza, którą trzeba jeszcze będzie potwierdzić eksperymentalnie (sprawdzić, czy nafta rzeczywiście zawierała domieszki, a następnie przeprowadzić próbę silnika na nafcie bez domieszek).

7

LITERATURA NA TEMAT PROBLEMU I PLAN PRACY

Przed rozpoczęciem rozwiązywania problemu, który przed nami postawiono, należy wyrobić sobie jasny i szczegółowy pogląd o stanie wiedzy na jego temat. Na ogół tak bywa, że pewne wiadomości w tym zakresie zdobyliśmy już poprzednio w ramach bieżących studiów dziedzin najbardziej nas interesujących.

Studia takie obejmują czytanie książek i monografii oraz zapoznawanie się z niektórymi artykułami, wybranymi z systematycznie przeglądanych czasopism. Są one niezbędne dla każdego aktywnego i twórczego pracownika, ich zakres jednak jest dyskusyjny. Niektórzy, na przykład wynalazca jednej z metod produkcji stali, Bessemer, uważają je za wręcz szkodliwe. „Miałem — pisze on — nad wielu innymi tę ogromną przewagę, że w czasie rozwiązywania zagadnień nie posiadałem żadnych ustalonych, wynikających z długo stosowanej praktyki poglądów, dla kontrolowania myśli czy nastawienia ich z góry w pewnym kierunku, a ponadto nie byłem zarażony panującym powszechnie przekonaniem, że to co uznano za prawdę, jest prawdą".

Podobną myśl wypowiedział wielki fizjolog Klaudiusz Bernard: „Nie jest przeszkodą to, czego nie wiemy, lecz to, co wiemy".

Znakomity biolog Sperański, uczeń Pawłowa, dzieli pracowników nauki na badaczy-specjalistów i samouków. „Dla człowieka, który bada przedmiot drogą lektury, cały materiał w sposób nieuchronny musi nabrać jednakowej wartości. Nie będzie on miał podstaw do oceniania jakości materiału i prawidłowość zmiany stosunków ujdzie jego uwagi lub też będzie ją tłumaczyć jedynie logiką... Materiał przytoczony na jednej stronie dzieła nie będzie się dla niego niczym różnił od materiału wyłożonego na innej...

Przyswajając sobie powoli wielki i różnorodny materiał bieżący, czytelnik stopniowo będzie przypominał uniwersalną maszynę rejestracyjną. Jego rola w konkretnej pracy badawczej w najlepszym przypadku będzie polegała na niesystematycznym powtórzeniu i sprawdzeniu zróżnicowanych faktów osiągniętych cudzą pracą. W ostatecznym rachunku będziemy mieli nie badacza, lecz samouka. Różnica między tymi dwiema kategoriami ludzi polega na stopniu ogólnego uświadomienia. Samoucy zazwyczaj wiedzą nawet więcej i na temat ulubionej dziedziny mogą obficie sypać cytatami. Ale to jest wiedza w zakresie przedmiotu, a nie znajomość przedmiotu. Samouk ogarnia przedmiot z pewnej odległości, a nie konkretnie. Dawne i bieżące problemy są zawsze dla samouka jasne. Należy jedynie wyciągnąć wnioski, a sprawa natychmiast posunie się naprzód.

Od tego właśnie punktu rysuje się wyraźna różnica między wspomnianymi dwiema kategoriami ludzi: samouk nie może wysnuć wniosków, ponieważ sprzeczności mają dla niego równą wartość. Narzędzie, którym zwykł się posługiwać — logika — tu właśnie zawodzi. A zatem różnica między samoukiem a specjalistą przejawia się nie w wykształceniu czy erudycji w danej specjalności, lecz w tym, że pierwszy tylko wie, a drugi i wie, i umie. Dla prawdziwego specjalisty materiały wyłożone w różnych miejscach książki wcale nie mają równej wartości. Potrafi on wydobyć i dysponować materiałem i konkretnie dostrzega formę i warunkowe znaczenie sytuacji, w której materiał został zdobyty lub zgrupowany. Pojęcie jakości ma dla niego zupełnie realną treść, dlatego że również swój materiał zwykł on dzielić według tej cechy.

Na podstawie tego, co tu powiedziano, narzuca się następujący wniosek: zanim się przystąpi do systematycznego czytania bieżącej literatury specjalistycznej, należy zdobyć sobie prawo do tego czytania. Osiąga się to tylko pracą i osobistym doświadczeniem w ocenie rzeczywistości. Nie cesarz Napoleon, lecz młody Bonaparte, stawiający pierwsze kroki dowódca francuskiej armii rewolucyjnej, sformułował zasadę kierowania sztuką wojenną: «działać — obmyślać — działać». Człowiek ten był prawdziwym eksperymentatorem, wyraźnie doceniał ogromne znaczenie rzeczowej znajomości sytuacji i twórczych, osobistych, praktycznych błędów".

Znany patofizjolog B. Beveridge autor „Sztuki badań naukowych" idzie jeszcze dalej, twierdząc, że „w dziedzinach, w których wiedza jeszcze ciągle narasta, a także gdy dane zagadnienie jest czymś nowym lub nową wersją zagadnienia już opracowanego, postępu dokonują specjaliści. Natomiast, gdy dotycząca zagadnienia wiedza już nie wzrasta, gdy zagadnienie jest już opracowane i potrzeba jakiegoś nowego rewolucyjnego podejścia do niego — bardziej prawdopodobne jest, że zdobędzie się na nie raczej laik w tej dziedzinie. Sceptycyzm okazywany zazwyczaj przez fachowców w stosunku do takich wywołujących przewrót koncepcji dowodzi, że posiadana przez nich wiedza była im raczej przeszkodą w badaniach".

Można oczywiście przytoczyć i inne wręcz przeciwne poglądy. Nie wdając się jednak zbytnio w szczegóły tej spornej kwestii można przyjąć za nie podlegające dyskusji następujące postulaty:

— należy być na bieżąco zorientowanym w stanie wiedzy w dziedzinie, w której się specjalizujemy;

— w tym celu należy systematycznie przeglądać aktualne czasopisma;

— należy stale pogłębiać swoją wiedzę w zakresie dyscyplin podstawowych, ważnych dla interesującej nas dziedziny, aby bez trudu móc studiować wybrane artykuły lub sprawozdania z prac badawczych;

— nie należy uczyć się „na zapas", czyli jak to się mówi „inwestować w siebie".

Otrzymawszy jakiś problem do rozwiązania, należy rozszerzyć możliwie do najdrobniejszych szczegółów stan swojej wiedzy na ten temat. Oczywiście i tu są pewne granice. Produkcja publikacji na świecie doszła w chwili obecnej do zastraszających rozmiarów. Z ogólnej liczby wszystkich uczonych działających dotychczas na Ziemi około 90% żyje i pracuje w latach współczesnych. Informacje o tym, co ci uczeni, a w ślad za nimi inżynierowie, ekonomiści i inni osiągnęli w swych badaniach, zawiera 100 tys. wydawanych na świecie czasopism, w których drukuje się około 3 mln artykułów rocznie. Ale sprawa tylko pozornie wygląda groźnie. „Na szczęście" zaledwie pewna część tych prac ma poważniejszą wartość naukową, a prac rzeczywiście oryginalnych, będących zasadniczym krokiem naprzód, jest zupełnie niewiele. Każdy, kto systematycznie przegląda bieżącą literaturę, już po kilku latach zorientuje się, których autorów warto czytać, a którzy piszą tylko po to, aby im „zaliczono" publikacje.

Jeśli nie mamy bliższego rozeznania w dziedzinie, z której powierzono nam problem do rozwiązania, należy zacząć od przestudiowania jednej, będącej na dobrym poziomie monografii z dziedziny nadrzędnej. A więc, gdy np. specjalnością naszą jest termodynamika i dostaliśmy do rozwiązania jakiś problem z zakresu przewodnictwa cieplnego, powinniśmy zacząć studia od przeczytania jakiejś książki o wymianie ciepła. Następnie posługując się katalogami oraz podaną na końcu każdej książki i artykułu bibliografią, należy zebrać takie prace, które umożliwiłyby wytworzenie pewnego rodzaju abstrakcyjnego modelu rozwoju problemu od jego narodzin aż do ostatniej chwili.

Nasza praca ma być kontynuacją albo zerwaniem z dotychczasowymi osiągnięciami. W jednym i w drugim przypadku musimy pojąć główne myśli i idee, którymi kierowali się w swym działaniu nasi poprzednicy. Musimy należycie ocenić ich sukcesy i zrozumieć przyczyny niepowodzeń. Ale przede wszystkim musimy sobie wyrobić jasny pogląd na to, jak mamy się zabrać do rozwiązania stojącego przed nami problemu. Wszystko, co można się było o nim dowiedzieć, już wiemy. Dalszy tok postępowania zależy wyłącznie od nas. Teraz przyszła właściwa chwila, aby opracować pierwszą wersję planu działania. Plan ten będzie jeszcze ulegał zmianie. Na pewno przynajmniej dwa razy. Pierwszy raz po całkowitym opracowaniu hipotezy, drugi — po przeprowadzeniu wstępnych eksperymentów. W opracowywanej obecnie pierwszej wersji planu zastanowimy się przede wszystkim nad metodami, którymi spróbujemy zaatakować problem. Ocenimy krytycznie nasze możliwości i rozważymy, w jaki sposób je dostosować do potrzeb. Z przestudiowanej literatury wiemy, jakimi narzędziami pracy myślowej i eksperymentalnej rozwiązywano problem, o który nam idzie, lub temu podobne. Postaramy się douczyć tego, czego jeszcze nie wiemy, i uzupełnić sprzęt w laboratorium, dokupując, wypożyczając lub wykonując samemu. Na to wszystko potrzebny jest czas i to musimy uwzględnić w naszym planie.

Sprawa planowania prac badawczych często jest przedmiotem sporów. Przeciwnicy planowania twierdzą, że same idee: planowania i pracy badawczej są sprzeczne. Istotą planowania jest ustawianie w czasie deterministycznego modelu (bo tylko taki model da się ściśle ustawić w czasie) realizacji zadania. Istotą badania natomiast jest dobieranie znanych metod do niezupełnie znanych trudności. Stąd w każdym badaniu musi tkwić element niepewności (inaczej badanie byłoby niepotrzebne). A więc model realizacji badania nie jest modelem deterministycznym. W związku z tym nie może on podlegać planowaniu.

Rozumowanie powyższe jest słuszne przy założeniu, że podstawowym celem planowania jest ustalenie harmonogramu. Nie wydaje się jednak, żeby tak było w istocie. W pracy badawczej, tak jak w każdym działaniu, najważniejszą sprawą jest jasność celu i przejrzystość drogi, po której się ku niemu zmierza. Cel określa ściśle sformułowany problem, a do ustalenia drogi realizacji celu służy właśnie planowanie. Należy je rozumieć jako proces, który właściwie trwa przez cały czas pracy badawczej. Jego wynik — plan, nie może więc być traktowany jako coś sztywnego i trwałego. Jest jednak niezbędny, gdyż porządkuje, racjonalizuje i w ten sposób przyspiesza pracę.

8

HIPOTEZA

Wszelkie badanie indukcyjne polega na współdziałaniu hipotezy i eksperymentu. Ta więź eksperymentu i hipotezy wywodzi się stąd, że eksperyment umożliwiając czynną zmianę warunków badanego zjawiska ułatwia ustalenie rządzących nim praw, a tym samym potwierdza lub obala hipotezę, która te prawa przewiduje. Hipoteza jest podstawowym narzędziem myślowym wszędzie tam, gdzie w problemie, który zamierzamy rozwiązać, mieszczą się pytania:

— od czego dany fakt zależy;
— w jakich warunkach powstaje;
— jakie są jego następstwa.

Opierając się na znanych i dostatecznie sprawdzonych faktach przypuszczamy, że zjawisko przez nas badane powstaje w określonych warunkach bądź też jest skutkiem określonych przyczyn. Czynnikiem inspirującym powstanie hipotezy jest na ogół domniemana analogia, podobieństwo lub też, co zdarza się najczęściej, jakaś zasada czy założenie o charakterze ogólnym. I tak na przykład R. Koch, opierając się na odkryciach Pasteura i na jego założeniu ogólnym, że większość chorób gorączkowych powstaje na skutek zakażenia bakteriami, powziął hipotezę, że przyczyną gruźlicy są prawdopodobnie bakterie — laseczniki, zwane później lasecznikami Kocha. Dla sprawdzenia tej hipotezy Koch wykonał szereg badań klinicznych i eksperymentalnych z zastosowaniem mikroskopu. Ostatecznie dowiódł słuszności swej hipotezy.

Jest to typowy sposób badań w naukach przyrodniczych. Widać w nim ścisły związek między problemem (przyczyna gruźlicy), założeniem ogólnym, wyrosłą z niego hipotezą i eksperymentem. W przypadkach najprostszych problem utożsamia się z hipotezą. Tak jest na przykład w psychologicznych badaniach nad zagadnieniem istnienia lub nieistnienia transferu, czyli przeniesienia sprawności motorycznej z jednej ręki na drugą. Hipoteza mieści się domyślnie w problemie jako jedno z alternatywnych twierdzień: transfer istnieje lub też przeciwnie, transferu nie ma.

Hipotezy wywodzą się z faktów. Fakty też są ich ostatecznym sprawdzianem. „Jedynym i wystarczającym sprawdzianem prawdziwej hipotezy jest jej zgodność z faktami".

Warunek ten obejmuje wg Jevonsa trzy następujące warunki składowe:

— hipoteza ma pozwalać na stosowanie rozumowania dedukcyjnego i na wysnuwanie wniosków porównywalnych z wynikami obserwacji;

— hipoteza nie może być niezgodna z jakimikolwiek zasadami rozumowania lub prawami przyrody, które uważamy za prawdziwe;

— wnioski wyprowadzone z hipotezy muszą się zgadzać z zaobserwowanymi faktami.

Dwa pierwsze warunki stanowią o formalnych walorach hipotezy, warunek trzeci o jej wartości merytorycznej.

Ponieważ, zgodnie z pierwszym warunkiem, hipoteza powinna w zadowalający sposób dać się porównać z doświadczeniem, musi być jednoznacznie i ściśle określona. W fizyce tę jednoznaczność osiąga się przez zastosowanie matematycznego opisu hipotezy. W takim przypadku otrzymuje się równanie, które pozwala na sprawdzenie hipotezy w sposób ilościowy. Przykładem hipotezy nie spełniającej tego warunku była podana przez Kartezjusza teoria wirów. Nie pozwalała ona obliczyć ścisłych stosunków między odległościami i okresami planet; nie mogła zatem podlegać takiemu ścisłemu sprawdzeniu, jakiemu Newton poddał swą teorię grawitacji, nim ją ogłosił*.

„Błędna teoria — pisze Jevons — często utrzymuje się dzięki swej niejasności i niemożności ścisłego jej potwierdzenia lub obalenia; lecz u miłośników prawdy niejasność powinna budzić podejrzenie. Zwolennicy dawnej doktryny, według której Natura nie znosi próżni, nie mogli przewidzieć doniosłego faktu, że woda w zwyczajnej pompie ssącej nie podniesie się wyżej niż na 33 stopy. Gdy zwrócono uwagę na ten fakt, nie umieli go wyjaśnić inaczej, jak przez wprowadzenie do swej teorii specjalnej poprawki stwierdzającej, że wstręt Natury do próżni nie sięga poza 33 stopy".

Z drugiego warunku rzetelności hipotezy wynika, że między hipotezą a naszymi dotychczasowymi dostatecznie uzasadnionymi

---

* W ostatnim czasie teorię wirów podjął na nowo prof. J. Dowkontt. Patrz: Zeszyty Naukowe Pol. Warsz. Mechanika. Zeszyt ósmy, W-wa 1962.

wyobrażeniami nie może być sprzeczności. Hipoteza nie powinna poza tym zakładać istnienia tworów, które nie są zgodne z naszymi dotychczasowymi poglądami na Naturę. Jest jednak szereg wyjątków, które w pewnym stopniu przeczą tej ostatniej zasadzie. Z falową teorią światła wiązano dawniej istnienie eteru, którego właściwości musiały być wręcz paradoksalne:

— wielka sztywność dla wyjaśnienia szybkości rozchodzenia się światła;

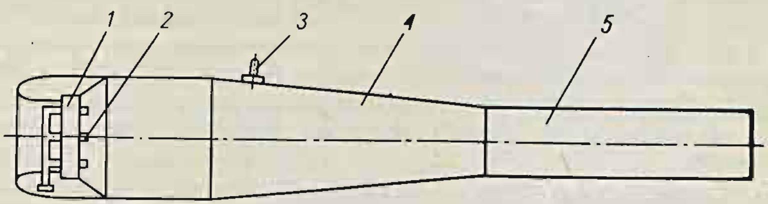
— znikoma gęstość, tłumacząca niemożność wykrycia eteru z powodu jakichkolwiek działań mechanicznych.

Później okazało się, że ten sztuczny twór nie stanowi istotnego elementu w teorii falowej, a jego egzystencja wiąże się raczej z zakorzenioną przez tradycję potrzebą przedstawiania świata materialnego za pomocą modeli mechanicznych. Dziś wiemy, że nieprzenikliwość i sprężystość nie są podstawowymi własnościami materii, lecz wynikają w pewnych granicznych przypadkach z odmiennych praw mechaniki kwantowej. Ciała stałe i gazy, te postaci materii, na podobieństwo których usiłowano wyobrażać sobie eter, są tylko powierzchownymi przejawami rzeczywistości. Wewnątrz atomów działają siły elektryczne. One też stanowią istotną treść ciał materialnych i stąd należałoby raczej sprowadzać mechanikę do elektryczności, a nie odwrotnie. A więc początkowe przyjęcie takiego właśnie modelu dla podparcia teorii dziwnego tworu, jakim był eter, doprowadziło w wyniku prawdziwości teorii falowej do całkowitej zmiany naszych poglądów na materię, było więc pożyteczne i owocne w skutkach.

Trzeci warunek prawdziwości hipotezy żąda, aby zgadzała się ona z każdym poprawnie ustalonym faktem, który z nią się w jakiś sposób wiąże. Wspomniany już systemat wirów Descartesa upadł nie dlatego, że był wewnętrznie sprzeczny lub niedorzeczny, lecz ponieważ nie mógł dać wyników zgodnych z rzeczywistymi ruchami ciał niebieskich. Należy przyjąć, że wystarczy jedna rzeczywista sprzeczność między faktem a hipotezą, aby hipoteza została obalona.

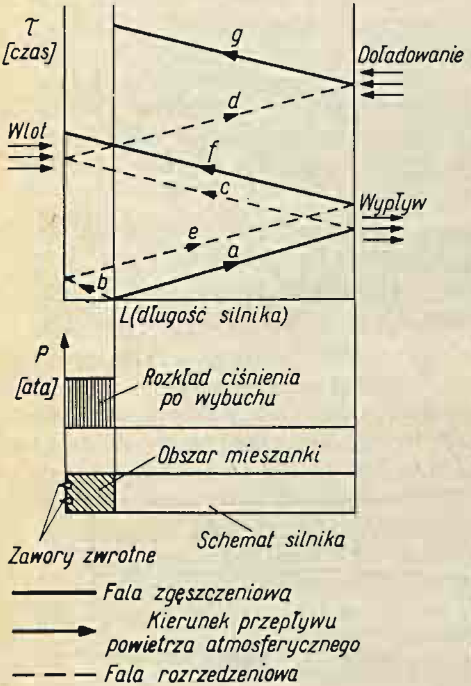
Zdarza się jednak często, że błędna hipoteza doprowadza do odkryć. Wynika to z jej zasadniczych funkcji naprowadzania na trop nowych eksperymentów i obserwacji. Oto przykład. W końcu ostatniego stulecia nic nie wiedziano o istocie i przyczynie schorzenia krów, zwanego gorączką mleczną. Nie rozporządzano żadną skuteczną metodą leczenia, padało więc wiele cennych zwierząt. Weterynarz Schmidt z Kolding w Danii sformułował hipotezę, że gorączka mleczna jest to samozatrucie spowodowane wchłanianiem cząstek siary i starych zwyrodniałych komórek nabłonka wymienia. Celem zahamowania tego procesu wstrzykiwał roztwór jodku potasu do wymion chorych krów. Po pierwszych próbach orzekł, że mała ilość powietrza dostająca się do wymienia w czasie zabiegu działa korzystnie, gdyż wzmaga uwalnianie się jodu. Zabieg był zadziwiająco skuteczny. Po pewnym czasie doszedł do przekonania, że wprowadzenie znacznej ilości powietrza wraz z roztworem jest ważną częścią zabiegu, gdyż powietrze umożliwia docieranie roztworu do wszystkich części wymienia. Zabieg został powszechnie przyjęty i zmodyfikowany na różne sposoby. Wkrótce okazało się, że wprowadzenie samego powietrza działa równie skutecznie. To leczenie, oparte na fałszywym założeniu, było przez 25 lat postępowaniem standartowym, dopóki nie wyjaśniono biochemicznych procesów zachodzących w czasie choroby. Do dziś jednak nieznana jest zasadnicza przyczyna choroby, nie wiadomo także, dlaczego wprowadzenie powietrza do wymienia działa leczniczo.

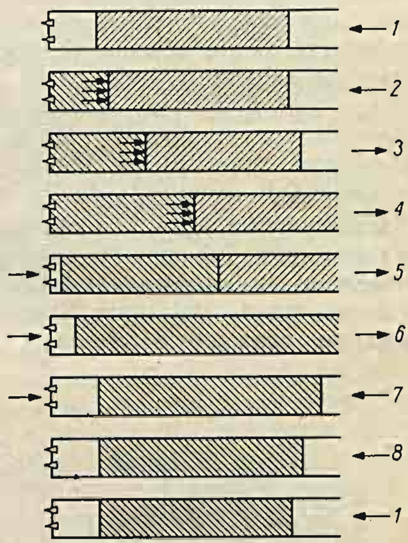
Często bywa i tak, że określone zjawisko można wyjaśnić za pomocą dwu lub nawet więcej hipotez. Przykładem może być stosowany w lotnictwie i technice rakietowej silnik pulsacyjny, którego zasadę działania tłumaczą dwie teorie: teoria bezwładnościowa oraz teoria falowa.



Rys. 8.1. Silnik pulsacyjny:
1 — skrzynia zaworowa, 2 — wtryskiwacze paliwa, 3 — świeca zapłonowa, 4 — komora spalania, 5 — dysza wylotowa

Silnik pulsacyjny (rys. 8.1) składa się z odpowiednio ukształtowanego korpusu zakończonego z jednej strony otwartą dyszą, z drugiej natomiast stanowiącej wlot do silnika — skrzynią zaworową. W skrzyni tej umieszczone są sprężynowe zawory zwrotne oraz wtryskiwacze paliwa. W korpusie znajduje się poza tym świeca zapłonowa, w której między elektrodami może w odpowiedniej chwili przeskoczyć iskra elektryczna. Dwie hipotezy, wyjaśniające zasadę działania tego silnika, przedstawiono na rys. 8.2. Część lewa rysunku ilustruje teorię falową. Zakładając cylindryczny kształt silnika, natychmiastowy zapłon całej objętości mieszanki (a więc izochoryczne sprężanie czynnika termodynamicznego w obszarze wypełnionym mieszanką), izentropowe rozprężanie gazu po wybuchu oraz przyjmując za podstawę rozważań prawa rozchodzenia się fal płaskich w gazie doskonałym, można przedstawić następujący obraz zjawisk zachodzących w silniku podczas jednego cyklu roboczego. W chwili zapłonu na granicy obszarów ciśnienia podwyższonego i atmosferycznego





Rys. 8.2. Zasada działania silnika pulsacyjnego. Część lewa rysunku ilustruje teorię falową, szkice zaś po prawej stronie rysunku — teorię bezwładnościową

zostają zainicjowane dwie fale: zgęszczeniowa a, zmierzająca do wylotu, i rozrzedzeniowa b, posuwająca się w kierunku zamkniętego zaworami wlotu. Z chwilą dojścia fali zgęszczeniowej do otwartego końca silnika rozpoczyna się wypływ. Fala zgęszczeniowa a odbija się od otwartego końca przewodu jako rozrzedzeniowa c. W tym czasie, z powodu wypływu, ciśnienie w przestrzeni spalania silnika spada do poziomu ciśnienia atmosferycznego tak, że nadbiegająca fala rozrzedzeniowa c wywołuje już podciśnienie. Na skutek podciśnienia zostają otwarte zawory wlotowe i do silnika napływa świeża mieszanka. Fala rozrzedzeniowa c odbija się od otwierających się zaworów jako rozrzedzeniowa *d* i w otwartym końcu rury wywołuje podciśnienie. W wyniku tego następuje wtórny napływ powietrzna atmosferycznego do silnika od strony jego wylotu.

Przebieg zjawisk według teorii bezwładnościowej ilustrują szkice po prawej stronie rys. 8.2.

Szkic górny *1* przedstawia stan przy końcu cyklu: przez zawór wlotowy wpływa świeży ładunek mieszanki, środkową część rury wypełniają spaliny z poprzedniego cyklu, a w pobliżu wylotu znajduje się powietrze, które napłynęło od tyłu. Następne szkice: *2, 3, 4*, przedstawiają stan bezpośrednio po zapłonie. Małe strzałki wskazują działanie ciśnienia wywołanego przez spalanie: słup gazów zostaje pchnięty do tyłu. Wskutek bezwładności tego słupa w silniku powstaje podciśnienie, powodujące zassanie nowej dawki mieszanki, co zaznaczono strzałkami na szkicu *5, 6, 7*. Powietrze wchodzi do silnika również przez otwór wylotowy i zostaje wyrzucone w następnym cyklu. Obydwie teorie, każda z osobna, tłumaczą wszystkie ważniejsze zjawiska zachodzące w silniku. Wynika to z tego, że wyróżniają one te same fakty, inaczej je tylko przedstawiając i interpretując.

Bywa jednak czasem, że teorie nie tylko posługują się inną symboliką, lecz także z gruntu różnią się założeniami. Tak było na przykład ze wzmiankowanymi już teoriami światła: falową i korpuskularną. Według teorii korpuskularnej, za której twórcę uważany bywa Newton, zjawisko światła polega na ruchu maleńkich ciałek, korpuskuł, wylatujących ze źródła światła i poruszających się po liniach prostych. Cząstki te wpadają do oka i wywołują wrażenie światła.

W roku 1690 Huyghens wygłosił swą teorię, według której rozchodzenie się światła polega nie na ruchu cząstek, lecz na ruchu fal. Okresowe zaburzenia faliste rozchodzą się podobnie jak fale na wodzie lub fale w ciałach sprężystych, niosąc ze sobą energię. Ponieważ teoria Newtona tłumaczyła wszystkie znane podówczas fakty doświadczalne, więc o teorii Huyghensa zapomniano. Na początku XIX wieku została ona podjęta przez Younga i Fresnela. Teoria korpuskularna nie mogła bowiem wytłumaczyć zjawisk obserwowanych przez tych badaczy, mianowicie dyfrakcji i interferencji światła. Przekonano się, że widmowy rozkład białego światła polega na rozdziale przestrzennym jego składników według długości fali. Drgania świetlne o różnych długościach fal, działając na oko, wywołują wrażenie różnych barw. Teorię Huyghensa rozwinął Maxwell, uzasadniając, że fale świetlne są falami elektromagnetycznymi. Teraz nie ulega już żadnej wątpliwości, że światło polega na rozchodzeniu się fal elektromagnetycznych, wywołanych przez zaburzenia elektryczne w atomach lub drobinach ciał.

W całej tej sprawie istotny dla nas jest fakt eksperymentalnego wydzielenia przez Fresnela zjawiska dyfrakcji. Przed tym wszystkie znane efekty świetlne można było tłumaczyć za pomocą obu teorii. Dyfrakcję światła natomiast tłumaczyła tylko teoria Huyghensa i to zadecydowało o jej ostatecznej słuszności.

Taki rozstrzygający eksperyment nosi nazwę nadaną mu przez Newtona: *experimentum crucis*. Termin ten Newton stworzył zapewne pod wrażeniem lektury dzieła Bacona: *Novum Organum*, w którym filozof ten mówi o tzw. *instantia crucis*. „Wśród wypadków wyróżnionych ... umieścimy wypadki — drogowskazy (*instantiae crucis*) — biorąc nazwę od drogowskazów, które wzniesione na rozstajach wskazują i określają kierunki poszczególnych dróg. Nazywamy je zazwyczaj także wypadkami rozstrzygającymi i wyrokującymi, a niekiedy także wypadkami wyroczni i polecenia. Ich wyjaśnienie przedstawia się następująco.

Kiedy przy badaniu jakiejś własności rozum znajduje się jakby na szalkach wagi i ponieważ często, a nawet zwykle, razem występuje więcej własności, nie jest pewny, którą z dwóch, a niekiedy którą z kilku własności ma uważać albo uznać za przyczynę własności badanej, to wtedy wypadki — drogowskazy pokazują, że łączność jednej z tych własności z własnością badaną jest pewna i nierozerwalna, drugiej zaś — zmienna i niestała. W ten sposób kwestia zostaje rozwiązana: ową pierwszą własność przyjmuje się jako przyczynę, drugą zaś pomija się i odrzuca. Dlatego wypadki tego rodzaju rzucają bardzo wiele światła i mają niejako wielką wagę, tak że niekiedy proces tłumaczenia na nich się kończy i dzięki nim dochodzi się do celu. Niekiedy owe wypadki — drogowskazy można znaleźć i napotkać wśród zauważonych poprzednio, najczęściej jednak są one czymś całkiem nowym, wyszukanym i dostosowanym dzięki przemyślności i celowemu urządzeniu oraz zostają wydobyte na jaw dopiero przez troskliwe i wnikliwe starania".*

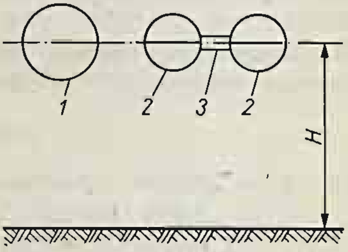
Jak wynika z tego, Bacon miał na myśli prosty przypadek alternatywy rozłącznej, a jego *instantia crucis* ma wiele cech zwykłego eksperymentu wyodrębniającego, którego celem jest nie tyle rozstrzygnięcie, jaka hipoteza jest słuszna, ile samo potwierdzenie hipotezy. Jednak w przytoczonych tu sformułowaniach, między wierszami wyczuwa się istnienie idei, która, odpowiednio uwydatniona przez Newtona, stała się istotnym czynnikiem rozstrzygającym w sporach naukowych.

---

* Bacon: *Novum Organum*. PWN, Warszawa 1955, str. 258.

Pierwszym sprawdzianem każdej hipotezy powinien być **e k s p e r y m e n t m y ś l o w y**. Polega on na poglądowym wyprowadzeniu wniosków logicznych z podstawowych tez teorii zawierającej określone hipotezy lub z samych hipotez. Ogólnie bowiem rzecz biorąc, każda teoria zawiera pewien zbiór podstawowych twierdzeń (sT) oraz pewien zbiór hipotez (sH). Eksperyment myślowy opiera się na następującej tezie: jeżeli prawdziwa jest teoria (czyli prawdziwe jest $sT + sH$), to prawdziwe są też konsekwencje systemu $sT + sH$. Klasycznym eksperymentem myślowym jest eksperyment C. B. Benedettiego (1530—1590), w którym uzasadnia on hipotezę, że w próżni wszystkie ciała spadają z jednakową prędkością.

Załóżmy, że na wysokości H nad powierzchnią ziemi znajduje się ciało o kształcie kuli i ciężarze 2G. Umieścimy na równej z nim wysokości układ dwu ciał z tejże substancji, także o kształcie kuli i o ciężarze G — każde. Ciała te są połączone nieważkim prętem (rys. 8.3). Oba układy będą spadały zgodnie z tezą Arystotelesa, że prędkość spadania ciał zależy od ich ciężaru. Gdy



Rys. 8.3. Eksperyment myślowy Benedettiego:
1 — kula o ciężarze 2G, 2 — kule o ciężarze G, 3 — pręt nieważki łączący kule o ciężarze G

jednak usuniemy nieważki pręt łączący ciała układu drugiego i powtórzymy w myśli eksperyment, to nie znajdziemy powodu (zasada racji dostatecznej), dla którego ciała o ciężarze G miałyby spadać z inną prędkością, aniżeli wtedy, kiedy były połączone. Stąd wniosek, że ciężar ciał nie może mieć wpływu na prędkość spadania ciał w próżni i że teza Arystotelesa jest mylna.

Eksperyment myślowy odgrywa szczególnie doniosłą rolę wtedy, gdy nie można bezpośrednio potwierdzić hipotezy doświadczalnie, gdyż nie pozwala na to np. stan techniki eksperymentalnej. Jedynym wtedy wyjściem jest tak pokierować badaniem, aby potwierdzić nim nie hipotezę, lecz wnioski wynikające z hipotezy.

Oto przykład. Za pomocą rozważań teoretycznych, a mianowicie przez porównanie energii, którą ma elektron opuszczający atom i energii, którą atom traci, doszedł Pauli do hipotezy, iż z jądra atomu „ucieka” co najmniej jeszcze jedna cząstka neutralna elektrycznie, o wiele lżejsza od neutronu, którą nazwał neutrino. Należało jeszcze ustalić, czy neutrino istnieje naprawdę. Dokonali tego Ljapunski i Alichonow. Doświadczenie ich opierało się na analogii z bronią palną. Przy wystrzeleniu pocisku działo doznaje nacisku wstecz. Pocisk leci w jedną stronę — działo zaś „uskakuje” w drugą. Gdy ujrzymy, że działo cofnęło się w tył, dojdziemy do wniosku, że z działa wystrzelono. Do doświadczenia wybrane zostało zjawisko pochłonięcia elektronu przez jądro, przy którym musi z jądra wylecieć neutrino, jeżeli tylko istnieje. Jeśli neutrino wyleci w jedną stronę, to jądro musi poruszyć się w drugą. Tak właśnie też się i stało. Procesowi pochłonięcia towarzyszyło przesunięcie się atomu. W ten sposób neutrino stało się rzeczywistością.

Przytoczony przykład uwidacznia wyraźnie strukturę pośredniego dowodu eksperymentalnego. Eksperyment myślowy opiera się na założeniu, że atom, analogicznie do działa musi „odskoczyć”. Stwierdzony następnie „odskok” stanowi dowód istnienia cząstki materialnej, która wyleciała z atomu w odwrotnym kierunku.

Eksperymentalny dowód metodą pośrednią można przedstawić za pomocą następującej równoważności:

$$(pq) \equiv (rs)$$

gdzie: p — „pocisk opuszcza lufę w określonym kierunku”;
q — „działo poruszy się w kierunku przeciwnym”;
r — „neutrino wyleci w określonym kierunku”;
s — „atom przesunie się w kierunku odwrotnym”.

Gdy p, q i s zostały doświadczalnie sprawdzone, to prawdziwa też musi być i teza r.

Nie kwestionując doniosłej roli hipotez, należy także zwrócić uwagę na niebezpieczeństwa, jakie kryje ich stosowanie.

Mówiliśmy, że hipotezy nawet błędne mogą doprowadzić do poważnych odkryć. Bywa jednak i tak, że błędna hipoteza staje się czynnikiem hamującym postęp. Szczególnie niebezpieczne są hipotezy przemawiające do wyobraźni. Taką była np. teoria flogistonu. Według niej każda palna substancja zawiera składnik zwany flogistonem, który warunkuje spalanie. Mniemanie to uniemożliwiało przez długi czas zrozumienie takich zjawisk, jak utlenianie, redukcję lub spalanie. Dopiero Lavoisier ostatecznie wykazał jego mylność, lecz do dziś pokutuje jeszcze w nauce wiele terminów, mających swoje źródło w hipotezie flogistonu.

Inne niebezpieczeństwo polega na bezkrytycznym przyjmowaniu hipotezy, która wydaje się na pierwszy rzut oka słuszna w sposób oczywisty. Oto dwa przykłady. Przez wiele lat uważano, że najszybciej leczy się zwichnięcia metodą spoczynkową. Dopiero przed niewielu laty okazało się, że lepsze wyniki można uzyskać przy stosowaniu ćwiczeń.

Podobnie przez wiele lat rolnicy sądzili, że glebę od wysychania najlepiej chroni częste jej spulchnianie. Dopiero B. Keen wykazał, że mniemanie to było błędne, a prace w polu z tym związane przeprowadzano najczęściej bez potrzeby. W ten sposób oszczędził on rolnikom wiele pracy i kosztów.

Trzecim niedostatkiem stosowania hipotez jest subiektywne odnoszenie się twórcy hipotezy do obserwowanych faktów, które zaczyna on interpretować zgodnie ze swoimi życzeniami. Najlepiej zabezpiecza przeciw temu wyrabianie w sobie nawyku podporządkowywania własnych sądów i pragnień obiektywnym faktom. Darwin radzi szczegółowo opisywać badane zjawiska i procesy ze szczególnym zwracaniem uwagi na te fakty, które stoją w sprzeczności z naszą teorią. W każdym bądź razie nie należy uporczywie trzymać się hipotezy, gdy fakty jej wyraźnie przeczą. Próby „pomijania" faktów, które „nie pasują" do teorii, mogą dać wynik pozytywny tylko na bardzo krótką metę.

9

MATEMATYCZNE PRZYGOTOWANIE EKSPERYMENTU

Przy wejściu do gaju Akademosa, gdzie mieściła się szkoła Platona, widniał napis: „Niechaj nie wchodzi tu nikt, kto nie ma przygotowania matematycznego". Platon uważał matematykę za system praw rozumu kontrolujący świat fizyczny. Była ona dla niego ideałem wiedzy. Na jej wzór też chciał kształtować pozostałe nauki. Później okazało się, że matematyka nie tworzy żadnych praw dla świata fizycznego, lecz jest tylko narzędziem, za pomocą którego ustala się stosunki panujące w tym świecie.

Narzędziem tym, począwszy mniej więcej od czasów Galileusza, zaczęły posługiwać się wszystkie tak zwane nauki ścisłe. Każda też teoria czy hipoteza, stworzona przez te nauki powinna w końcu przybrać szatę matematyczną. W naukach przyrodniczych ostateczną postać przyjmuje teoria po skonfrontowaniu jej z doświadczeniem. Taka konfrontacja prowadzi często do bardzo istotnych zmian. Mimo to należy przyjąć jako zasadę, że matematyczne opracowanie teorii w każdym możliwym przypadku powinno nastąpić przed rozpoczęciem eksperymentowania. Ułatwia to, a często w ogóle umożliwia racjonalne zaplanowanie i przeprowadzenie doświadczenia.

Modele matematyczne. Punktem wyjścia w procesie matematyzacji teorii jest model fizyczny zjawiska, które jest jej przedmiotem. W modelu tym wybieramy pewne najistotniejsze cechy zaobserwowanej prawidłowości i wyrażamy je w postaci wyidealizowanej jako tezy matematyczne, które uznajemy za podstawowe aksjomaty naszej teorii. Z aksjomatów tych drogą dedukcji otrzymujemy twierdzenia, których logicznie niesprzeczny układ stanowi model matematyczny zjawiska. Przeważnie jednak analizę badanego procesu doprowadzamy tylko do wyodrębnienia zjawisk podstawowych, które w najogólniejszy sposób są opisane za pomocą powszechnie znanych równań różniczkowych.

Równania te są matematyczną idealizacją wprowadzoną dla uproszczenia opisu rzeczywistości. Idealizacja taka wiąże się ściśle z pewną idealizacją przemian lub właściwości ciał fizycznych. I tak np. przypisywanie sensu fizycznego takim wielkościom wynikłym z przechodzenia do granicy, jak pochodne czy gradienty, pociąga za sobą powstanie fizycznego pojęcia ciągłego rozkładu masy, co sprzeczne jest oczywiście z cząsteczkową strukturą materii.

Dobrze sformułowane zagadnienie powinno z matematycznego punktu widzenia odpowiadać trzem warunkom — kryteriom:

— powinno mieć rozwiązanie;

— rozwiązanie to powinno być jednoznaczne;

— rozwiązanie to musi być stabilne, tzn. mała zmiana którejkolwiek z danych powinna powodować jedynie odpowiednio małą zmianę wyniku.

Pierwszy i drugi warunek, tzw. kryteria istnienia i jednoznaczności są odbiciem determinizmu zjawisk w przyrodzie, bez którego przy powtarzaniu eksperymentów nie można by było oczekiwać powtarzalności wyników. Kryterium stabilności jest natomiast konieczne z dwu powodów:

— dane eksperymentalne są zawsze zawarte w pewnym małym obszarze błędu, który nie powinien powodować zbyt wielkiej niepewności co do rozwiązania;

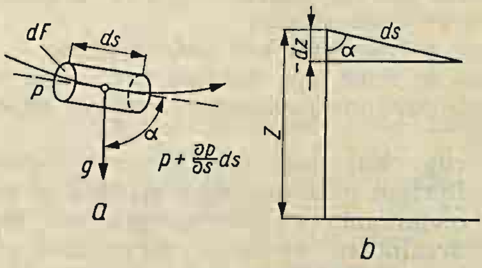
— zagadnienia z równań różniczkowych rozwiązuje się zwykle za pomocą metod przybliżonych. Kryterium stabilności gwarantuje nam w tym przypadku, że otrzymane rozwiązanie dobrze przybliża rozwiązanie ścisłe.

W pewnych uproszczonych, lecz ważnych dla praktyki przypadkach równania różniczkowe dają się łatwo scałkować. Dzięki temu dysponujemy szeregiem związków, które oddają nam nieocenione usługi przy rozwiązywaniu przede wszystkim zagadnień technicznych. Ale wyprowadzone na podstawie wyidealizowanego modelu wzory matematyczne nie dają zgodnych wyników z doświadczeniem. Aby usunąć tę rozbieżność, do wzorów tych wprowadza się poprawki wyrażone za pomocą współczynników ważnych w określonych zakresach parametrów, które uwzględniają w sposób ogólny efekty procesów rzeczywistych, wyabstrahowane z założonego modelu matematycznego.

Dla przykładu rozważmy bardzo prosty przypadek przepływu*. W tym celu w przepływie wydzielamy element płynu w kształcie walca o przekroju poprzecznym dF i długości ds (rys. 9.1). Oś walca pokrywa się z kierunkiem ruchu, a więc leży na linii prądu. Masa walca wynosi $\varrho dFds$ (gdzie ϱ jest gęstością płynu). Wyprowadzamy związek dynamiczny między ciśnieniem i siłą maso-

* L. Prandtl; *Dynamika przepływów*, [42].

wą — z jednej strony, a wielkościami kinematycznymi — z drugiej. Wychodzimy z zasady Newtona, ustalającej zależność między siłą, masą i przyspieszeniem. Zakładając brak tarcia wewnętrznego w płynie można przyjąć, że na rozpatrywany element działają tylko siły masowe i siły powierzchniowe (różnice ciśnień). Jeżeli w lewym przekroju poprzecznym walca panuje ciśnienie p, to siła powierzchniowa działająca na pole dF



Rys. 9.1. Model przepływu

tego przekroju wynosi pdF i jest kierowana wzdłuż osi w kierunku przepływu. W przekroju przeciwległym panuje ciśnienie $p + \dfrac{\partial p}{\partial s}\, ds$, a odpowiadająca temu siła powierzchniowa wynosi $\left(p + \dfrac{\partial p}{\partial s}\, ds\right) dF$ i jest skierowana przeciwnie do siły pdF. Wypadkowa tych dwu sił powierzchniowych jest równa

$$pdF - \left(p + \frac{\partial p}{\partial s}\, ds\right) dF = - \frac{\partial p}{\partial s}\, dsdF$$

Na płyn działa siła masowa, na przykład siła ciężkości, której wielkość odniesioną do jednostki masy oznaczamy przez g. Na wydzielony element cylindryczny masy płynu $\varrho dFds$ w kierunku przepływu działa składowa siły masowej równa

$$\varrho dFdsg \cos \alpha$$

gdzie α oznacza kąt między linią działania siły masowej i linią prądu. Pozostaje teraz do wyznaczenia składowa przyspieszenia w kierunku ruchu, tzw. przyspieszenie styczne. Niech w oznacza prędkość rozważanego elementu. Jest ona zależna od położenia elementu na linii prądu i od czasu, a więc jest funkcją s i t.

Zatem przyspieszenie styczne wyraża się jak następuje

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\partial w}{\partial s}\frac{ds}{dt} + \frac{\partial w}{\partial t}$$

Uwzględniając, że $\frac{ds}{dt} = w$, otrzymamy

$$\frac{dw}{dt} = w\frac{\partial w}{\partial s} + \frac{\partial w}{\partial t} \qquad \text{lub} \qquad \frac{dw}{dt} = \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{w^2}{2}\right) + \frac{\partial w}{\partial t}$$

Wielkość $\frac{\partial w}{dt}$ oznacza pochodną cząstkową prędkości względem czasu (przy stałym s), $\frac{dw}{dt}$ zaś — pochodną zupełną prędkości rozpatrywanego elementu. Występująca w tym związku wielkość $w\frac{\partial w}{ds} = \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{w^2}{2}\right)$ oznacza część przyspieszenia wynikającą z tego, że rozpatrywany element płynu przepływa do punktu, w którym panuje inna prędkość niż w punkcie, z którego wyszedł; wielkość $\frac{\partial w}{\partial t}$ jest częścią przyspieszenia spowodowaną zmianą stanu przepływu w czasie w danym miejscu. Dla przepływów ustalonych oczywiście $\frac{\partial w}{\partial t} = 0$. Zgodnie więc z zasadą dynamiki otrzymujemy

$$-\frac{\partial p}{\partial s}dsdF + \varrho dsdFg\cos\alpha = \varrho\, dsdF\left[\frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{w^2}{2}\right) + \frac{\partial w}{\partial t}\right]$$

Równanie to można skrócić przez czynnik $dsdF$, występujący przy każdym wyrazie tego równania (to oznacza, że wynik końcowy wywodu jest niezależny od dowolnie obranej objętości płynu). Po podzieleniu jeszcze całego równania przez ϱ otrzymamy

$$-\frac{1}{\varrho}\frac{\partial p}{\partial s} + g\cos\alpha = \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{w^2}{2}\right) + \frac{\partial w}{\partial t}$$

Zwykle jako siła masowa występuje tylko siła ciężkości i wówczas wielkość g można uważać za stałą zarówno co do wartości, jak i kierunku. Wielkość $\cos\alpha$ może być określona za pomocą współrzędnej pionowej (rys. 9.1b). Z rysunku tego wynika, że $\cos\alpha = \frac{\partial z}{\partial s}$.

Po podstawieniu tego wyrażenia do ostatniego równania otrzymamy następującą jego postać:

$$-\frac{1}{\varrho}\frac{\partial p}{\partial s} - g\frac{\partial z}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{w^2}{2}\right) + \frac{\partial w}{\partial t}$$

Jeżeli rozpatrywany przepływ jest ustalony $\left(\frac{\partial w}{\partial t} = 0\right)$ i nieściśliwy (to znaczy $\varrho = \text{const}$), wówczas w powyższym równaniu będą występowały tylko pochodne względem s i dlatego też można je scałkować wzdłuż linii prądu. Równanie

$$\frac{1}{\varrho}\frac{\partial p}{\partial s} + g\frac{\partial z}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{w^2}{2}\right) = 0$$

po scałkowaniu daje zależność

$$\frac{p}{\varrho} + gz + \frac{w^2}{2} = \text{const}$$

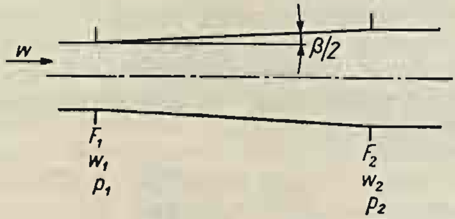
Równanie to, zwane równaniem Bernoullego, wyraża zasadę zachowania energii. Poszczególne występujące w nim wyrazy przedstawiają różne rodzaje energii przypadającej na jednostkę masy, a mianowicie: pierwszy wyraz: p/ϱ przedstawia pracę sił ciśnienia (energię potencjalną zależną od rozkładu ciśnień i gęstości w płynie), drugi wyraz: gz — energię potencjalną siły ciężkości i wreszcie trzeci wyraz: $w^2/2$ — energię kinetyczną.

Gdy podzielimy wszystkie wyrazy powyższego równania przez g, to otrzymamy równanie Bernoullego w postaci najczęściej stosowanej w technice

$$\frac{p}{\gamma} + z + \frac{w^2}{2g} = \text{const}$$

gdzie $\gamma = g\varrho$ oznacza ciężar właściwy płynu.

Wszystkie występujące w tym równaniu wielkości mają wymiar liniowy i są rozumiane jako wysokości. Wielkość p/γ oznacza wysokość słupa płynu wywierającego swoim ciężarem ciśnienie p i dlatego nosi nazwę wysokości ciśnienia. Wielkość z oznacza wysokość położenia punktu przepływu nad dowolnie obraną poziomą płaszczyzną odniesienia i nazywa się wysokością geometryczną. Wreszcie trzecia wielkość $\frac{w^2}{2g}$ jest wysokością, z której musiałoby spaść ciało, aby w swobodnym spadku mogło uzyskać prędkość w, i dlatego nazywamy ją wysokością prędkości. Zgodnie więc z równaniem Bernoullego, suma wysokości ciśnienia, wysokości geometrycznej i wysokości prędkości jest stałą wzdłuż danej linii prądu. Stała ta może przybierać różne wartości przy przejściach od jednej linii prądu do drugiej. Jeżeli jednak wszystkie linie prądu wychodzą z obszaru, w którym płyn jest w stanie spoczynku, albo porusza się ruchem jednostajnym i prostoliniowym, to wówczas wielkość stała pozostaje jednakowa dla wszystkich linii prądu. W tym przypadku równanie Bernoullego jest słuszne dla całego obszaru objętego przez przepływ.



Rys. 9.2. Przepływ przez dyfuzor

Zastosujmy wyprowadzone równanie do rzeczywistego przypadku przepływu wody przez dyfuzor (rys. 9.2). Przed tym porównajmy model matematyczny, z którego wynika to równanie, z modelem fizycznym.

W modelu matematycznym założono:

— płyn nieściśliwy i nielepki;

— nie ma oddziaływania ścianek na przepływ.

W modelu fizycznym natomiast przyjmujemy:

— występowanie tarcia między płynem i ściankami;

— istnienie wirów powstających w wyniku oderwań strug przyściennych od ścianek kanału.

Przepływający strumień na skutek rozszerzania się kanału zmniejsza swą prędkość, co wywołuje (zgodnie z ogólnym prawem zachowania energii, wyrażonym za pomocą równania Bernoulliego) wzrost ciśnienia.

Teoretyczną wartość tego ciśnienia możemy wyznaczyć z równań (oznaczenia wg rys. 9.2):

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g} \quad (z = \text{const})$$

$$F_1 w_1 = F_2 w_2$$

Drugie z tych równań (równanie ciągłości strugi) stanowi matematyczną postać prawa zachowania masy i zawiera jedynie założenie co do stałości ciężaru właściwego wody. W równaniach tych są dane:

p_1, w_1, γ — parametry strumienia na wejściu,
F_1, F_2 — powierzchnie przekroju na wejściu i wyjściu z dyfuzora.

Niewiadome p_2 i w_2 są jednoznacznie określone z dwu równań. Jednak pomierzona w rzeczywistości wartość p_2 będzie mniejsza niż otrzymana z obliczeń teoretycznych. Wynika to z nieuwzględnienia w modelu matematycznym tarcia i zawirowań. Zgodnie z omówioną już ogólną metodą wpływy te uwzględniamy za pomocą współczynników. Stratę ciśnienia w wyniku tarcia odnosi się do ciśnienia dynamicznego w końcu dyfuzora i ocenia za pomocą następujących zależności

$$\Delta p_T = \zeta_1 \frac{\gamma w_2^2}{2g}$$

$$\zeta_1 = \frac{Ct}{2 \sin \frac{\beta}{2}} \left[\left(\frac{F_2}{F_1} \right)^2 - 1 \right]$$

gdzie: $C_t = 0{,}005 — 0{,}006$ — współczynnik tarcia,
$\beta = 10 \div 20°$ — kąt rozwarcia dyfuzora,
Δp_T — spadek ciśnienia w dyfuzorze spowodowany tarciem,
ζ_1 — współczynnik strat przepływu spowodowany tarciem.

Stratę ciśnienia w wyniku powstawania oderwań i wirów można określić za pomocą równań

$$\Delta p_w = \zeta_2 \gamma \frac{w_2^2}{2}$$

$$\zeta_2 = K \left[\left(\frac{F_2}{F_1} \right)^2 - 1 \right]$$

gdzie: $K = (0{,}015 \div 0{,}02)\,\beta$, dla $\beta = 10—20°$

Całkowita strata ciśnienia w dyfuzorze wynosi

$$\Delta p = \Delta p_T + \Delta p_w = \frac{\gamma w_2^2}{2} (\zeta_1 + \zeta_2)$$

Ostatecznie więc rzeczywista wartość ciśnienia na końcu dyfuzora przybierze wartość

$$p'_2 = p_2 - \Delta p$$

Z przytoczonego przykładu wynikają następujące uogólnione wnioski:

— model matematyczny jest zawsze pewną idealizacją modelu fizycznego. W związku z tym otrzymane na podstawie tego modelu związki matematyczne nie opisują ściśle modelu fizycznego, a tym bardziej rzeczywistości;

— w celu dopasowania wyników analizy matematycznej do rzeczywistych potrzeb należy otrzymane na drodze teoretycznej równania skorygować za pomocą współczynników otrzymanych na drodze eksperymentalnej;

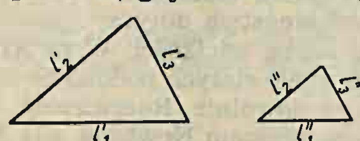
— ponieważ tabele współczynników nie mogą obejmować wszystkich spotykanych przypadków, więc ostatecznym sprawdzianem właściwego wyboru znów może być tylko eksperyment;

— w ten sposób eksperyment staje się niezastąpionym składnikiem wszelkich badań kryjących w sobie, przynajmniej docelowo, aspekt użyteczności. Inaczej mówiąc, każda mająca utylitarny charakter teoria matematyczna musi być nie tylko sprawdzona, ale uzupełniona przez eksperyment.

Teoria podobieństwa. Często zdarza się, że zbudowany na podstawie przyjętego modelu matematycznego układ równań nie może być rozwiązany analitycznie. W takich przypadkach pozostaje metoda rozwiązania doświadczalnego, oparta na teorii podobieństwa i na badaniach modelowych.

Teoria podobieństwa ustala warunki podobieństwa zjawisk fizycznych.

Pierwszym warunkiem podobieństwa zjawisk jest zachodzenie ich w układach podobnych geometrycznie. Układy można uważać za geometrycznie podobne, gdy stosunki długości wszystkich od-



Rys. 9.3. Trójkąty podobne

powiadających sobie odcinków w tych układach są takie same. Na przykład w dwu podobnych trójkątach, przedstawionych na rys. 9.3, istnieje zależność

$$\frac{l_1''}{l_1'} = \frac{l_2''}{l_2'} = \frac{l_3''}{l_3'} = C_l \qquad [9.1]$$

gdzie: C_l — stała podobieństwa.

Odcinkami odpowiadającymi nazywamy odcinki łączące odpowiadające punkty (w przypadku boków trójkątów podobnych, jako odcinków odpowiadających — punktami odpowiadającymi są odpowiednie wierzchołki). Z tego wynika inna definicja układów geometrycznie podobnych:

Dwa układy są geometrycznie podobne, jeżeli każdy punkt w jednym układzie ma odpowiadający mu punkt w układzie drugim, przy czym za punkty odpowiadające sobie uważamy te punkty, których współrzędne spełniają warunek [9.1].

Drugim warunkiem podobieństwa zjawisk fizycznych jest warunek podobieństwa pól wielkości jednorodnych, występujących w zjawisku, to jest wielkości, które mają takie samo znaczenie fizyczne i taki sam wymiar. Porównywane ze sobą są wielkości jednorodne, występujące w odpowiadających sobie punktach układu i chwilach. Dwie chwile t'' i t' odpowiadają sobie, jeżeli mają wspólny początek pomiaru i związane są przekształceniem podobieństwa, to jest, jeżeli

$$\frac{t''}{t'} = C_t$$

Taki sam warunek muszą spełniać wszystkie wielkości jednorodne, charakteryzujące badane zjawisko. Znaczy to, że w odpowiadających punktach układu i odpowiadających chwilach dowolna wielkość φ' zjawiska pierwszego jest proporcjonalna do jednorodnej wielkości φ'' zjawiska drugiego, to jest

$$\frac{\varphi''}{\varphi'} = C_\varphi \qquad [9.2]$$

Każda wielkość fizyczna może mieć swoją stałą podobieństwa, liczbowo różniącą się od innych. W celu rozróżnienia stałych, każda z nich ma odpowiedni wskaźnik.

Trzeci warunek podobieństwa dotyczy zjawisk złożonych, które są określone dużą liczbą wielkości. W związku z tym w tych zjawiskach występuje wiele stałych podobieństwa. Stałe te jednak nie mogą być wybrane dowolnie. Rozpatrzmy następujący przykład. Zgodnie z drugim prawem Newtona, siła P równa się masie m pomnożonej przez przyśpieszenie a, to jest

$$P = ma = m\frac{w}{t}$$

gdzie: w — prędkość,
t — czas.

Stosując to równanie do odpowiadających sobie cząstek dwóch układów podobnych otrzymamy:

— dla układu pierwszego

$$P' = m'\frac{w'}{t'}$$

— dla układu drugiego

$$P'' = m'' \frac{w''}{t''}$$

Ponieważ rozpatrywane układy są podobne, więc na podstawie określenia podobieństwa [9.2] wszystkie wielkości zmienne układu drugiego można wyrazić przez zmienne układu pierwszego:

$$P'' = C_p P' \qquad m'' = C_m m' \qquad w'' = C_w w' \qquad t'' = C_t t'$$

Podstawiając otrzymane wartości do równania opisującego drugi układ, otrzymujemy

$$C_p P' = \frac{C_m C_w}{C_t} \frac{m' w'}{t'}$$

Z równania tego ze względu na zależność

$$P' = \frac{m' w'}{t'}$$

wynika związek

$$C_p = \frac{C_m C_w}{C_t} \text{ albo } \frac{C_p C_t}{C_m C_w} = 1$$

Ostatnie równanie tworzy warunek, który uniemożliwia dowolny wybór stałych podobieństwa C_p, C_t, C_m, C_w.

Podstawiając do tego równania wartości stałych podobieństwa

$$C_p = \frac{P''}{P'}; \quad C_m = \frac{m''}{m'}; \quad C_w = \frac{w''}{w'}; \quad C_t = \frac{t''}{t'}$$

i przenosząc wszystkie wielkości układu pierwszego do lewej części równania, a wielkości układu drugiego do prawej — otrzymamy

$$\frac{P' t'}{m' w'} = \frac{P'' t''}{m'' w''} \text{ lub } \frac{Pt}{mw} = \text{idem}$$

Równanie to wyraża podstawową cechę układów podobnych: istnienie charakterystycznych wielkości, które dla wszystkich zjawisk podobnych zachowują jedną i tę samą wartość liczbową. Są to tak zwane kryteria, niezmienniki lub liczby podobieństwa.

Liczby podobieństwa mają dwie zasadnicze cechy:

— są bezwymiarowe;

— mają pewien sens fizyczny i dzięki temu w jakiś sposób charakteryzują układ.

Na przykład wyprowadzona wyżej liczba podobieństwa stanowi stosunek impulsu do ilości ruchu i w ten sposób charakteryzuje układ pod względem dynamicznym.

Liczby podobieństwa nazywa się przeważnie od nazwisk naukowców, którzy pracowali w danej dziedzinie nauki i oznacza się symbolami składającymi się z początkowych liter ich nazwisk. I tak wyprowadzoną powyżej liczbę podobieństwa nazywamy liczbą Newtona i oznaczamy

$$\mathrm{Ne} = \frac{Pt}{mw}$$

Podstawiając w tym równaniu zamiast t stosunek $\frac{l}{w}$ otrzymamy

$$\mathrm{Ne} = \frac{Pl}{mw^2}$$

Przekształcenie to nie pozbawiło liczby Newtona sensu fizycznego. Wyraża ona tym razem stosunek pracy wykonanej przez siłę p na drodze l do podwójnej energii kinetycznej masy m odpowiadającej prędkości w.

Określanie liczb podobieństwa za pomocą równań różniczkowych. Każdemu równaniu fizycznemu możemy przyporządkować równanie wymiarowe, przedstawiające zależność między wymiarami wielkości fizycznych, przy czym równanie wymiarowe ma taką samą postać jak równanie fizyczne, a wymiary wielkości są uporządkowane w ten sam sposób jak wielkości w równaniu fizycznym.

W każdym układzie wielkości podstawowych jednemu równaniu fizycznemu odpowiada jedno równanie wymiarowe.

Na przykład równaniu fizycznemu określającemu siłę tarcia T w zależności od gradientu prędkości w kierunku n

$$T = -\mu \frac{dw}{dn} dF$$

odpowiada w układzie wielkości podstawowych: masa m, długość L i czas t równanie wymiarowe

$$\frac{mL}{t^2} = \left(\frac{m}{Lt}\right)\left(\frac{L}{t}\right)\left(\frac{1}{L}\right) L^2$$

Drugą istotną cechą równań fizycznych jest jednorodność wymiarowa, co można wyrazić za pomocą następującej zasady:

Każde zupełne równanie fizyczne jest bądź wymiarowo jednorodne, bądź też może być rozdzielone na dwa lub więcej oddzielnych równań, które są wymiarowo jednorodne.

Przez równanie fizyczne zupełne rozumiemy taką zależność matematyczną między wielkościami fizycznymi, której postać nie ulega zmianie, gdy zmienimy wartości jednostek podstawowych wielkości fizycznych występujących w tym równaniu, pozostając jednakże w obrębie tego samego układu wielkości podstawowych. Przykładem równania niejednorodnego może być na przykład słuszne i zupełne równanie w postaci

$$w + s = at + {}^1/_2\, at^2$$

gdzie: w — prędkość [m/s];
s — droga [m];
a — przyspieszenie [m/s²];
t — czas [s].

Równaniu temu odpowiada następujące równanie wymiarowe

$$\left(\frac{L}{t}\right) + (L) = \left(\frac{L}{t^2}\right)(t) + \left(\frac{L}{t^2}\right)(t^2) = \left(\frac{L}{t}\right) + (L)$$

Widać stąd, że sumy wyrazów po lewej i prawej stronie równania nie mają sensu fizycznego (co właśnie jest wyróżniającą cechą równań niejednorodnych). Można jednak to równanie zgodnie z zasadą o jednorodności równań rozdzielić na dwa równania jednorodne

$$w = at$$

$$s = {}^1/_2\, at^2$$

Wielkości, które wchodzą w skład równań fizycznych, są trzech rodzajów: zmienne wielkości fizyczne, stałe liczbowe i stałe wymiarowe.

Wielkości fizyczne mierzy się za pomocą różnych systemów jednostek miar, zależnie od rodzaju danej wielkości fizycznej i od czynności wykonywanych przy jej mierzeniu. Jednostki miar są w każdym układzie jednostek związane ze sobą łączącą je definicją. Na przykład jednostka miary prędkości jest związana z jednostkami długości i czasu, jednostka miary lepkości — z jednostkami siły prędkości i długości itd. Liczba jednostek miary, które muszą być ustalone w celu określenia pozostałych jednostek, zależy w dużym stopniu od rodzaju mierzonego układu fizycznego.

Przyjęty w 1960 r. Międzynarodowy System Jednostek składa się z sześciu jednostek podstawowych: metr, kilogram (jako jednostka masy), sekunda, amper, stopień Kelwina i kandela. Ale na przykład w technice, w dyscyplinach mechanicznych, przyjmuje się przeważnie inny układ, a mianowicie: kilogram siły [kG], kilogram masy [kg], metr [m], sekunda [s], stopień Kelwina [°K] i kilokaloria [kcal]. Czasami układ ten redukuje się do układów: kilogram masy, metr, sekunda lub kilogram siły, metr, sekunda. Istnieje jeden ważny warunek, który powinny spełniać wszystkie jednostki miary używane w teorii podobieństwa, a mianowicie stosunki liczb, określających dwie różne wartości danej zmiennej, muszą zachowywać stałą wartość, bez względu na zmianę absolutnej wartości jednostki miary. Na przykład stosunek dwóch temperatur w skali absolutnej jest ten sam, bez względu na to, czy są one mierzone w stopniach Kelwina, czy w stopniach Rankina, natomiast nie dotyczy to stopni Celsjusza i stopni Fahrenheita, dlatego też stosowanie tych ostatnich jednostek miary w teorii podobieństwa jest niedopuszczalne.

Gdy ten warunek jest spełniony, wtedy wszystkie wtórne jednostki miary mogą być wyrażone jako iloczyn potęgowy jednostek podstawowych pomnożony przez liczbę stałą. Na przykład, jeżeli absolutne wartości podstawowych jednostek masy, długości i czasu oznaczy się odpowiednio symbolami m, L, t, to wartość odpowiadającej im jednostki lepkości określa wyrażenie

$$C\left(\frac{m}{Lt}\right)$$

gdzie: C — wartość stała.

Wyrażenie to wskazuje, że jeżeli zwiększy się absolutną wartość jednostek podstawowych odpowiednio do $2\,m$, $3\,L$ i $4\,t$, to jednostka lepkości wyniesie

$$\left(\frac{2}{3\times 4}\right)$$

czyli $^1/_6$ wielkości poprzedniej jednostki. Stąd liczba określająca daną lepkość w nowym układzie byłaby 6 razy większa niż w układzie starym. Jeśli chce się na przykład przeliczyć lepkość z jednostek układu centymetr — gram — sekunda (poisy), na jednostki układu stopa — funt — godzina, jednostka w układzie stopa — funt — godzina wyniesie

$$\frac{454}{30{,}48\cdot 3600}$$

czyli 0,00416 wielkości jednostki w układzie centymetr — gram — sekunda.

Stałe liczbowe wchodzące do wzorów fizycznych są bezwymiarowe. Przykładem stałej liczbowej jest liczba $\pi = 3{,}1459...$

Stałe wymiarowe natomiast mają wzory wymiarowe podobne do wzorów wymiarowych zmiennych wielkości fizycznych i mogą być za pomocą tych wzorów przekształcane z jednego układu jednostek miary na drugi. Przykładem stałych wymiarowych są: stała gazowa występująca w równaniu stanu — R[kGm/kg°K] lub mechaniczny równoważnik cieplny J[kGm/kcal].

Każde wymiarowo jednorodne równanie fizyczne można przedstawić w postaci funkcji uwikłanej ułamków bezwymiarowych składających się ze zmiennych wielkości fizycznych, utworzonych przez podzielenie wszystkich wyrazów przez dowolny wyraz i przegrupowanie. Na przykład równanie

$$s = wt + {}^1/_2\, at^2$$

można napisać w postaci

$$\frac{wt}{s} + \frac{at^2}{2s} - 1 = 0$$

Równania fizyczne, zarówno różniczkowe, jak i całkowe, można rozłożyć na następujące składowe:

— siła napędowa lub różnica potencjałów;

— czynnik oporu lub jego odwrotność — przewodnictwo;

— wielkość wynikowa.

Czynniki pierwszy i drugi dobiera się w taki sposób, aby wielkość wynikowa była wprost proporcjonalna do siły napędowej i odwrotnie proporcjonalna do oporu. Siła napędowa procesu nie musi koniecznie mieć wymiaru siły w sensie mechanicznym, może ona być na przykład gradientem temperatur lub stężeń, wywołującym przepływ ciepła lub masy. Klasycznym przykładem tego w termodynamice jest równanie Fouriera rządzące przewodzeniem ciepła

$$q = -\lambda \text{ grad } T$$

gdzie: q — strumień cieplny (wielkość wynikowa);
grad T — gradient temperatury (siła napędowa);
λ — przewodność cieplna (przewodnictwo).

Wymiary współczynników oporu lub przewodnictwa zależą od wymiarów sił napędowych oraz wymiarów wielkości wynikowej. Wielkościami wynikowymi mogą być następujące wielkości:

— przemieszczenie lub wielkość sumaryczna, to jest zerowa pochodna względem czasu;

— prędkość lub szybkość, to jest pierwsza pochodna względem czasu;

— przyspieszenie, to jest druga pochodna względem czasu.

Poszczególne równania mogą zawierać pochodne względem czasu wszystkich trzech rzędów, przy czym każda z nich jest związana z innymi wielkościami zmiennymi w taki sposób, że człony równania są wymiarowo jednorodne.

Każda rzeczywista przemiana fizyczna lub chemiczna obejmuje więcej niż jedno zjawisko. Dlatego w równaniu opisującym je wystąpi kilka różnych sił napędowych oraz szereg współczynników oporu lub przewodnictwa. Stosunki tych wielkości będą określały fizyczne ukształtowanie układu i stanowiły odpowiednie liczby podobieństwa. Procedura otrzymywania liczb (kryteriów) podobieństwa polega na sprowadzeniu równania różniczkowego najpierw do uogólnionej formy wymiarowej, z pominięciem znaków różniczkowych i stałych liczbowych, a następnie na podzieleniu przez każdy z wyrazów tak, aby otrzymać wszystkie wyrazy w postaci bezwymiarowej.

Weźmy pod uwagę np. równanie różniczkowe izotermicznego przepływu cieczy lepkiej (Naviera-Stokesa), będące bilansem sił działających wzdłuż osi x na jednostkę objętości cieczy

$$\underbrace{\varrho \frac{\partial w_x}{\partial t}}_{\mathrm{I}} + \underbrace{\varrho \left(w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} \right)}_{\mathrm{II}} =$$

$$= \underbrace{\varrho g_x}_{\mathrm{III}} - \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x}}_{\mathrm{IV}} + \underbrace{\mu \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right)}_{\mathrm{V}}$$

gdzie: x, y, z — współrzędne;
w_x, w_y, w_z — składowe prędkości cieczy;
ϱ — gęstość cieczy;
μ — lepkość dynamiczna;
p — ciśnienie;
g_x — składowa przyspieszenia ziemskiego;
t — czas.

Kolejne wyrazy w tym równaniu mają następujące znaczenie:

I — siła potrzebna do nadania przyspieszenia jednostce masy cieczy przy przepływie nieustalonym;
II — przenoszenie ruchu przez ciecz przepływającą przez jednostkę powierzchni przekroju poprzecznego;
III — siła ciężkości;
IV — gradient ciśnienia statycznego;
V — opór tarcia.

Równaniu temu odpowiada następujące równanie wymiarowe

$$\underset{\mathrm{I}}{\left(\frac{\varrho w}{t}\right)} + \underset{\mathrm{II}}{\left(\frac{\varrho w^2}{L}\right)} = \underset{\mathrm{III}}{(\varrho g)} - \underset{\mathrm{IV}}{\left(\frac{\Delta p}{L}\right)} + \underset{\mathrm{V}}{\left(\frac{\mu w}{L^2}\right)}$$

gdzie: L — długość lub wymiar liniowy.

Dzieląc kolejno wyraz II przez wszystkie pozostałe wyrazy otrzymujemy cztery liczby podobieństwa:

$\frac{\mathrm{II}}{\mathrm{I}}$ daje $\frac{wt}{L} = \mathrm{Ho}$ — liczba równoczesności;

$\frac{\mathrm{II}}{\mathrm{V}}$ daje $\frac{\varrho w L}{\mu} = \mathrm{Re}$ — liczba Reynoldsa, która jest stosunkiem sił bezwładności do sił lepkości;

$\frac{\mathrm{II}}{\mathrm{III}}$ daje $\frac{w^2}{Lg} = \mathrm{Fr}$ — liczba Frouda, która jest stosunkiem sił bezwładności do sił ciężkości;

$\frac{\mathrm{IV}}{\mathrm{II}}$ daje $\frac{\Delta p}{w^2} = \mathrm{Eu}$ — liczba Eulera, która jest stosunkiem spadku ciśnienia statycznego do ciśnienia dynamicznego.

Metoda całkowania nierozwiązalnych analitycznie równań różniczkowych opiera się na sformułowanym przez Buckinghama tak zwanym twierdzeniu π, które na razie podamy w uproszczonej postaci:

całkę ogólną równania różniczkowego można przedstawić jako funkcję kryteriów podobieństwa określonych za pomocą tego równania.

A więc różniczkowe równanie Naviera-Stokesa można napisać na podstawie twierdzenia π w następującej postaci całkowej

$$\mathrm{Eu} = \Phi(\mathrm{Ho}, \mathrm{Fr}, \mathrm{Re})$$

Funkcję Φ określa się na podstawie badań doświadczalnych przeprowadzonych w warunkach modelowych. Na ogół, w przypadkach ważnych w technice, funkcję tę stanowi wielomian potęgowy

$$\mathrm{Eu} = k\,\mathrm{Ho}^{\alpha}\,\mathrm{Fr}^{\beta}\,\mathrm{Re}^{\gamma}$$

gdzie k, α, β, γ — stałe określane na podstawie badań.

Analiza wymiarowa. W przypadku gdy nie są znane równania różniczkowe, opisujące badane zjawisko do określenia liczb podobieństwa, służy analiza wymiarowa. Analiza wymiarowa umożliwia opisanie układu fizycznego za pomocą najmniejszej liczby zmiennych niezależnych. Dokonuje się tego przez odpowiednie uporządkowanie tych zmiennych w postaci liczb podobieństwa.

Podstawą analizy wymiarowej jest uogólniona postać twierdzenia π. Twierdzenie π w postaci uogólnionej składa się z dwóch części:

— rozwiązanie każdego wymiarowo jednorodnego równania fizycznego ma postać

$$\Phi (\pi_1, \pi_2 ...) = 0$$

gdzie: π_1, π_2... — zupełny zespół liczb podobieństwa utworzonych ze zmiennych wielkości fizycznych i stałych wymiarowych, wchodzących w skład równania. Zespół zupełny liczb podobieństwa zawiera maksymalną liczbę niezależnych wyrażeń bezwymiarowych, jaką można wyprowadzić z danego zbioru zmiennych fizycznych i stałych wymiarowych;

— jeżeli w skład równania wchodzi n osobnych zmiennych wielkości fizycznych i stałych wymiarowych, a ich wzory wymiarowe są wyrażone za pomocą m wielkości podstawowych, to liczba bezwymiarowych wyrażeń w zespole zupełnym (liczb podobieństwa) wyniesie $n—m$.

Z części drugiej twierdzenia π wynika, że im większa jest liczba wielkości podstawowych m, którą można zastosować bez zwiększania liczby zmiennych i stałych n, tym mniejsza jest liczba kryteriów podobieństwa w zespole zupełnym. W ten sposób analiza wymiarowa lepiej spełnia swoje zadanie. To jest powodem, dla którego częstokroć powiększa się ilość podstawowych jednostek poza System Międzynarodowy, włączając do niego kilokalorię i kilogram siły.

Określenia liczb podobieństwa w analizie wymiarowej dokonuje się za pomocą metody wykładników wprowadzonej przez Raleygha.

Postępowanie zaczyna się od ustalenia ilości zmiennych interweniujących w przyjętym modelu fizycznym badanego zjawiska. Załóżmy, że chcemy określić równanie przepływu cieczy rzeczywistej. W tablicy 9.1 są zebrane wszystkie zmienne wielkości fizyczne, które naszym zdaniem mogą mieć wpływ na przebieg zjawiska, oraz ich symbole i wzory wymiarowe w układzie mLt (masa, długość, czas). W związku z tym równanie przepływu powinno mieć następującą postać

$$\Phi (w, L, F, \varrho, \mu, \sigma, g)\, F = 1$$

Tablica 9.1.

Wykaz wielkości fizycznych występujących w izotermicznym przepływie cieczy rzeczywistej

Prędkość cieczy	w	Lt^{-1}
Wymiar liniowy	L	L
Siła	F	mLt^{-2}
Gęstość	ϱ	mL^{-3}
Lepkość	μ	$mL^{-1}t^{-1}$
Napięcie powierzchniowe	σ	mt^{-2}
Przyspieszenie ziemskie	g	Lt^{-2}

Równanie to dogodniej jest przedstawić w takiej postaci, aby siła F występowała bezpośrednio

$$\Phi'(w, L, \varrho, \mu, \sigma, g)\, F = 1$$

Jeżeli to równanie jest wymiarowo jednorodne, to wzory wymiarowe zmiennych wielkości muszą podlegać następującej zależności potęgowej

$$[w]^{\alpha}\, [L]^{\beta}\, [\varrho]^{\gamma}\, [\mu]^{\delta}\, [\sigma]^{\varepsilon}\, [g]^{\Theta}\, [F] = 0$$

gdzie: α, β, γ... — nieznane wykładniki.

Symbole w nawiasach kwadratowych przedstawiają wzory wymiarowe zmiennych wielkości. Wstawiając na ich miejsce rzeczywiste wzory wymiarowe, otrzymujemy

$$[Lt^{-1}]^{\alpha}\, [L]^{\beta}\, [mL^{-3}]^{\gamma}\, [mL^{-1}\, t^{-1}]^{\delta}\, [mt^{-2}]^{\varepsilon}\, [Lt^{-2}]^{\Theta}\, [mLt^{-2}] = 0$$

Następnie układamy równania wykładników wielkości podstawowych (zwane równaniami warunków)

Warunek dla m: $\quad \gamma + \delta + \varepsilon + 1 = 0$

Warunek dla L: $\quad \alpha + \beta - 3\gamma - \delta + \Theta + 1 = 0$

Warunek dla t: $\quad -\alpha - \delta - 2\varepsilon - 2\Theta - 2 = 0$

Równania powyższe można rozwiązać względem dowolnych trzech nieznanych wykładników, uzyskując zespół rozwiązań, wyrażających jeden ze składników za pomocą trzech innych. Zależnie od tego, które wykładniki zostaną wyeliminowane, otrzymamy różne zespoły wyrażeń bezwymiarowych.

Rozwiązując równania względem α, β oraz γ otrzymamy

$$\alpha = \delta - 2\varepsilon - 2\Theta - 2$$
$$\beta = -\delta - \varepsilon + \Theta - 2$$
$$\gamma = -\delta - \varepsilon - 1$$

skąd, po podstawieniu do wyjściowego równania wymiarowego, mamy

$$[w]^{-\delta-2\varepsilon-2\Theta-2}\,[L]^{-\delta-\varepsilon+\Theta-2}\,[\varrho]^{-\delta-\varepsilon-1}\,[\mu]^{\delta}\,[\sigma]^{\varepsilon}\,[g]^{\Theta}\,[F] = 0$$

lub po podstawieniu wzorów wymiarowych

$$\left[\frac{wL\varrho}{\mu}\right]^{-\delta}\left[\frac{\varrho\, w^2 L}{\sigma}\right]^{-\varepsilon}\left[\frac{w^2}{Lg}\right]^{-\Theta}\left[\frac{F}{\varrho\, w^2 L^2}\right] = 0$$

Te cztery wyrażenia tworzą zupełny zespół wyrażeń bezwymiarowych, składających się ze zmiennych wielkości wymienionych w tabeli 9.1. Są to powszechnie znane następujące liczby podobieństwa

$$\frac{F}{\varrho\, w^2 L^2} \sim \frac{\Delta p}{\varrho\, w^2} = \mathrm{Eu} \quad \text{— liczba Eulera;}$$

$$\frac{wL\varrho}{\mu} = \mathrm{Re} \quad \text{— liczba Reynoldsa;}$$

$$\frac{\varrho\, w^2 L}{\sigma} = \mathrm{We} \quad \text{— liczba Webera;}$$

$$\frac{w^2}{Lg} = \mathrm{Fr} \quad \text{— liczba Frouda.}$$

Zgodnie więc z twierdzeniem π równanie przepływu izotermicznego dla cieczy rzeczywistej powinno mieć następującą postać

$$\mathrm{Eu} = \Phi\,(\mathrm{Re}, \mathrm{We}, \mathrm{Fr})$$

gdzie Φ — funkcja, którą należy określić doświadczalnie. Jak już o tym wspominano, na ogół przyjmuje się, że należy ona do klasy wielomianów potęgowych.