

## BADANIA ROZWOJOWE URZĄDZEŃ TECHNICZNYCH

Typowe, nowo konstruowane urządzenie techniczne przechodzi następujące stadia rozwoju:

*Warunki techniczne.* Nazywane są często warunkami taktyczno-technicznymi. Powinny one jasno określać cel oraz charakterystyki nowej konstrukcji. Ustala je zleceńodawca w oparciu o studia operacyjne.

*Projekt wstępny.* Jest on właściwie odpowiedzią zleceniobiorcy na warunki taktyczno-techniczne. Zawiera szczegółową koncepcję realizacji nowo projektowanego urządzenia w postaci zestawieniowych rysunków całości i ważniejszych zespołów, obliczeń funkcjonalnych i wytrzymałościowych, opisowego uzasadnienia przyjętego rozwiązania w oparciu o dotychczasową wiedzę i istniejące konstrukcje oraz założenia do przyszłego programu prac badawczych.

*Projekt techniczny.* Projekt taki zawiera wykonawcze rysunki poszczególnych części oraz złożeniowe rysunki zespołów i całości. Przed oddaniem go na warsztat projekt techniczny jest uzupełniony w biurze technologicznym szczegółową instrukcją dotyczącą wykonawstwa i kontroli. Równocześnie z projektem technicznym opracowuje się projekty nowych stoisk badawczych względnie adaptuje stoiska już istniejące. Na tych stoiskach w przyszłości będzie się badać poszczególne zespoły oraz całość urządzenia.

*Seria prototypowa.* Wykonuje się ją w ilości kilku, kilkunastu lub więcej sztuk na specjalnie przystosowanym do produkcji jednostkowej warsztacie — prototypowni.

*Dopracowanie prototypu.* Prototyp nigdy nie odpowiada od razu warunkom taktyczno-technicznym. Poszczególne części, zespoły, a następnie całość muszą przejść szereg badań i udoskonalień. Badania prowadzi się metodą prób i poprawek. Na poszczególnych etapach doskonalenia uzupełnia się dokumentację i uruchamia nową wersję serii prototypowej. Wersji tych może być kilka.

*Próba typu.* Jeśli zdaniem zleceńbiiorcy prototyp odpowiada już warunkom taktyczno-technicznemu, wtedy w obecności zleceńdawcy przeprowadza on badanie, które ma potwierdzić przydatność nowej konstrukcji.

*Seria informacyjna.* Jeśli próba typu wypadła pozytywnie i zleceńdawca zamierza nowo skonstruowane urządzenie produkować, wtedy we właściwym zakładzie produkcyjnym (nie na prototypowni) uruchamia się serię nowego produktu. Całe to przedsięwzięcie ma na celu wypróbowanie technologiczności konstrukcji oraz prawidłowości technologicznego przygotowania produkcji. Podczas wykonawstwa stosuje się właściwe metody produkcyjne z ewentualnym wyłączeniem automatyzacji oraz innych zabiegów, mających na celu jedynie podniesienie wydajności pracy.

*Próba fabryczna.* Produkt w takim stanie, w jakim powinien być pójść do eksploatacji, jest poddany badaniu przez producenta. Podczas próby można dokonywać dodatkowych przeglądów nieprzewidzianych warunkami technicznymi.

*Próba państwowa.* Jeśli wynik próby fabrycznej jest pozytywny, wtedy na wybranym drogą losowania z serii prototypowej urządzeniu (lub kilku urządzeniach) przeprowadza się próbę w obecności przedstawicieli zleceńdawcy.

*Produkcja seryjna.* W przypadku pomyślnego zakończenia próby państwowej zakład produkcyjny uruchamia produkcję seryjną. Z każdej serii drogą losowania wybiera się jeden lub kilka produktów, które przechodzą próby kontrolne. Program prób kontrolnych jest w zasadzie taki sam jak program prób państwowych, ale w pewnych przypadkach może ulec skróceniu.

*Prace rozwojowe.* Niemal w każdej konstrukcji nawet w pełni dopracowanej do warunków taktyczno-technicznych tkwią pewne rezerwy. Rezerwy te można ujawnić czy to w postaci zwiększonego resursu, czy też poprawionych charakterystyk, w wyniku przeprowadzenia doskonalących konstrukcję prac rozwojowych. Przy wyborze koncepcji nowej konstrukcji trzeba stale mieć na uwadze, o co chodzi w całym przedsięwzięciu. Jeśli zależy nam na szybkiej realizacji, wtedy należy ukrócić wodze fantazji. Niech konstrukcja będzie nawet trochę mniej nowoczesna i oryginalna, ale za to niech możliwie od razu działa. Jeśli konstrukcja ma charakter wybitnie doświadczalny, wtedy wodze fantazji można popuścić. Należy jednak wyraźnie wydzielić w konstrukcji elementy nowe i nieprzebadane i bez zbytniego optymizmu ocenić czas potrzebny na ich eksperymentalne dopracowanie.

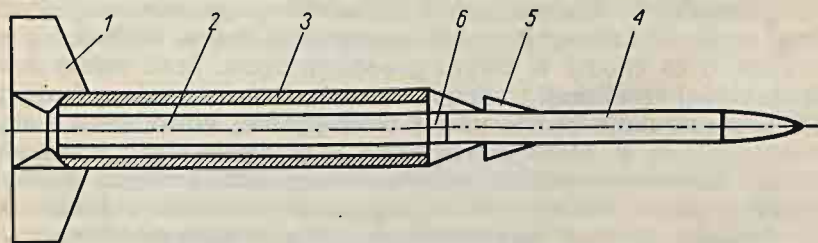
Prowadzenie konstrukcyjnych prac doświadczalnych ma pełny sens tylko w tym przypadku, gdy przejdą one przez wszystkie

stadia rozwoju i zostaną doprowadzone do końca, choć nie zawsze z najpomyślniejszym wynikiem. Jeśli konstrukcja zawierać będzie zbyt wiele elementów nie znanych danej grupie wykonawców, wtedy prace będą się przeciągać, co w końcu zniechęci zleceniodawcę i może doprowadzić do cofnięcia zlecenia. Szczególnie trzeba unikać zbyt wygórowanych wymagań odnośnie do nowych tworzyw i nowej technologii wykonawstwa. Te sprawy zawsze są najtrudniejsze i najdłużej się ciągną. W każdym bądź razie należy uważać, aby koncepcja rozwiązania konstrukcyjnego była na miarę posiadanego przez nas doświadczenia i nie przekraczała możliwości wykonawczych. Bardzo istotnym czynnikiem w wyborze koncepcji jest perspektywiczność konstrukcji, czyli jej możliwości rozwojowe. Oczywiście starać się trzeba, aby możliwości te były jak największe. W tym przypadku korzystniej jest zetknąć się początkowo nawet z poważniejszymi trudnościami, aby potem mieć drogę otwartą do ulepszeń.

Prowadzenie prac rozwojowych urządzeń technicznych, jak każde zresztą rozwiązywanie problemów jest działalnością typu „prób i błędów”. Składa się na nią szereg hipotez, które kolejno są poddawane badaniom. Nowa hipoteza jest zawsze wnioskiem wypływającym z konfrontacji wyników badania z poprzednią hipotezą.

Zasada prowadzenia prac rozwojowych polega na kolejno następujących po sobie analizach i syntezach.

W doskonalonej konstrukcji wydzielamy istotne dla niej problemy, które staramy się możliwie niezależnie rozwiązywać. Następnie łączymy je w całość i badamy wspólnie. Często (ale nie zawsze) poszczególne problemy utożsamiają się z odpowiednimi zespołami konstrukcji. Wtedy analiza polega po prostu na rozczłonkowaniu konstrukcji na zespoły i niezależnym ich badaniu. Synteza zaś na połączeniu w całość i badaniu wspólnym.



Rys. 15.1. Schemat rakiety meteorologicznej:

1 — stateczniki pierwszego stopnia, 2 — pierwszy stopień, 3 — stały materiał pędny,  
4 — drugi stopień, 5 — stateczniki drugiego stopnia, 6 — miejsce połączenia obu  
stopni rakiety



Przypuśćmy, że naszym zadaniem jest realizacja rakiety meteorologicznej (rys. 15.1), która będzie służyć do określania kierunku i prędkości wiatru w górnych warstwach atmosfery. Rakieta składa się z dwu stopni. Pierwszy stopień stanowi zaopatrzone w brzechwy rakietowy silnik na stały materiał pędny. Zadaniem pierwszego stopnia jest rozpędzenie całego układu do takiej prędkości, aby drugi stopień po rozcaleniu się rakiety mógł lotem bezwładnościowym osiągnąć wymagany pułap. Na pułapie następuje wyrzucenie z drugiego stopnia spadochronu wykonanego z materiału o powierzchni metalizowanej. Dzięki temu lot spadochronu, na który działa wiatr, może być śledzony i rejestrowany przez naziemne stacje radarowe.

Aby wykonać powyższe zadanie, należy rozwiązać następujące problemy:

- dobrać taki układ aerodynamiczny rakiety, który gwarantowałby jej przy minimalnych oporach maksymalną stateczność;
- opracować sztywną i jednocześnie lekką konstrukcję całości;
- wykonać silnik rakietowy na stały materiał pędny zdolny do pracy bez zakłóceń przy dużych przyspieszeniach;
- opanować rozcalanie rakiety po zakończeniu pracy silnika pierwszego stopnia;
- dobrać właściwy materiał na spadochron i opracować sposób jego otwierania się na pułapie;
- wykonać wyrzutnię;
- zapewnić powtarzalność współrzędnych, na przecięciu których następuje otwarcie spadochronu. Spełnienie tego warunku jest konieczne, w przeciwnym razie radar może nie znaleźć spadochronu. Poszczególne problemy można rozwiązać w różny sposób.

Aerodynamikę układu bada się i doskonali w tunelu aerodynamicznym. W podobny sposób można także badać rozcalanie się rakiety, jeżeli następować ono będzie na zasadzie różnicy oporów pierwszego i drugiego stopnia.

Silnik bada się najpierw na hamowni, później zaś w locie, zastępując drugi stopień makietą. Badanie to należy oczywiście połączyć ze sprawdzeniem rozcalania się rakiety.

Próby rozwijania się spadochronu można prowadzić zrzucając drugi stopień z samolotu lub śmigłowca.

Gdy wydaje się, że poszczególne problemy są już rozwiązane, wtedy można przystąpić do próby rakiety kompletnej. Jeżeli jednak wynik próby nie jest zadowalający, należy wrócić do poprzednio prowadzonych badań elementarnych. W wielu przy-

padkach korzystnie jest przeprowadzić szereg prób całości nawet przed zakończeniem dopracowania poszczególnych zespołów. Pozwala to bowiem stosunkowo wcześniej wykryć szereg problemów, które nie występują w badaniach elementarnych, a trudne są do przewidzenia jedynie na drodze czystego rozumowania.

Metody prowadzenia badań rozwojowych oraz metody dopracowania prototypu do warunków taktyczno-technicznych są analogiczne. Różnica niknie szczególnie wtedy, gdy w prototypie występuje znaczny procent elementów nowych, nieznanych konstruktorowi. Bywają jednak przypadki, gdy program badań znacznie odbiega od przedstawionego tu schematu. Zachodzi to wtedy, gdy prototypu nie można rozbić na elementy nadające się do badań elementarnych. Tak dzieje się na przykład z silnikiem tłokowym. Na szczęście silnik tłokowy jest już u szczytu swego rozwoju i gdy konstruktor posiada odpowiednio duże doświadczenie, dopracowanie prototypu nie napotyka zwykle na większe trudności. Bywa czasem i tak, że badanie zespołów związane jest z bardzo dużymi kosztami inwestycyjnymi budowy stoisk badawczych. Wtedy opłaca się nieraz prowadzić od początku próby całości, ubrajać tylko odpowiednio prototyp w aparaturę pomiarową, za pomocą której można kontrolować pracę poszczególnych elementów i zespołów. Taki przypadek może zaistnieć na przykład w pewnych warunkach przy chęci realizacji silnika turbinowo-odrzutowego. Ale i tu niektóre badania elementarne są niezbędne, na przykład niezależne badanie układu regulacyjnego czy przynajmniej modelowe badanie komory spalania.

Istnieją także przypadki, gdy realizacja jakiegoś urządzenia jest uzależniona od równoczesnego rozwiązania szeregu ściśle związanych ze sobą problemów (niekoniecznie konstrukcyjnych), których nie można wydzielić i badać niezależnie. Taki wewnętrznie sprzężony układ wydaje się być (szczególnie w początkowej fazie rozwoju) jakimś zamkniętym kołem trudności, z którego nie ma wyjścia.

Klasycznym przykładem tego rodzaju przypadku jest historia powstania samolotu. Aby zbudować aparat cięższy od powietrza i zdolny przenieść człowieka drogą powietrzną z jednego punktu na ziemi do drugiego, należało najpierw wybrać metodę, za pomocą której zrealizuje się to zadanie. Z trzech możliwych układów statku powietrznego: skrzydłowca, śmigłowca i samolotu, ten ostatni wydawał się po pierwszych próbach i analizach najłatwiejszy do urzeczywistnienia. Od razu jednak ujawniły się trzy główne trudności:

— należało zbudować sterowny i stateczny płatowiec, zdolny do startu i lądowania oraz do lotu w zmiennych warunkach;

— należało wyposażyć go w niezawodnie działający silnik rozwijający niezbędną moc potrzebną do startu i wznoszenia;

— należało usadowić w nim odpowiednio przeszkolonego pilota, który potrafiłby właściwie manewrować płatowcem i silnikiem.

Jest to oczywiste, że trudności: pierwsza i trzecia są ze sobą tak ściśle zazębiane, że nie mogą być rozwiązane niezależnie. Bo to czy płatowiec jest odpowiednio sterowny i stateczny, może stwierdzić tylko wyszkolony pilot, a pilota można szkolić jedynie na dobrym płatowcu.

Początkowo wydawało się, że główną trudność w realizowaniu samolotu stanowi wykonanie silnika o odpowiedniej mocy i odpowiednim ciężarze. Pierwszym konstruktorem, który rozporządził takim silnikiem (parowym) był Klemens Ader. Na zbudowanym przez siebie samolocie (w kształcie nietoperza) wykonał on w roku 1890 lot blisko 50-metrowy. Lot ten jednak zakończył się rozbiciem samolotu i silnym potłuczeniem konstruktora. Trudno jest obecnie odpowiedzieć na pytanie, co tu bardziej zdecydowało o niepowodzeniu: niedoskonałość urządzenia czy brak umiejętności pilota. Podobnie jak Ader próbowali rozwiązać to zagadnienie i inni konstruktorzy, ale z takim samym skutkiem.

Pewnego postępu w metodzie realizacji tego zagadnienia dokonał Langley, który zaczął od prób modelowych. Jego 13-kilogramowy model samolotu, wyposażony w silniczek parowy pokonał odległość 1200 m. W tym czasie nie umiano jeszcze przenosić wyników z badań modelowych na obiekty w skali naturalnej. Z drugiej strony nie miały one prawie żadnego wpływu na wiedzę pilota o prowadzeniu samolotu w locie. Toteż lot obiektu z pilotem i w tym przypadku nie udał się.

Prawdziwej rewolucji w sposobie urzeczywistnienia idei lotów za pomocą aparatów cięższych od powietrza dokonał dopiero Otto Lilienthal. Obserwując loty ptaków szczególną uwagę zwrócił on na ich lot szybowy, w którym wykorzystują one prądy wznoszące. Lilienthal wytyczył samolotom następującą drogę rozwoju:

— dokonując lotów szybowych, bezsilnikowych, należy równocześnie doskonalić płatowiec-szybowiec i szkolić pilota,

— dopiero po opanowaniu lotów szybowych należy płatowiec wyposażyć w silnik i urzeczywistniać coraz dłuższe loty silnikowe.

W celu zrealizowania pierwszej części swego planu zbudował on skrzydła z prętów wierzbowych i płótna i dokonywał na nich



zeskoków z niewielkiego wzgórza, przelatując kolejno kilka, kilkanaście, a potem kilkadziesiąt metrów. W ten sposób wykonał przeszło 2000 wzlotów i zaczął pokonywać odległości 100-metrowe. Ostatni z tych lotów był jednak nieudany i zakończył się tragiczną śmiercią Lilienthala. Ale drogą przez niego wytyczoną poszli naśladowcy, z których najszybciej cel osiągnęli bracia Wright. Poczynając od roku 1900 prowadzili oni wzorem Lilienthala nieprzerwanie próby ze swym dwupłatowym szybowcem, na którym ostatecznie w roku 1903 zabudowali silnik spalinowy. W tym też roku wykonali oni pierwszy udany lot silnikowy. Ten lot i następne przekonały ostatecznie świat o możliwości zbudowania samolotu, który mógłby znaleźć realne zastosowanie.

Wydaje się, że przytoczony przykład narodzin samolotu jest dość typowy i można wyciągnąć z niego wnioski o charakterze ogólnym.

Wnioski te są następujące:

— jeśli realizacja jakiegoś celu o charakterze technicznym jest uzależniona od równoczesnego rozwiązania kompleksu problemów ściśle ze sobą zazębionych, to nie należy w żadnym przypadku zaczynać od prób całości, gdyż na pewno zakończą się one niepowodzeniem;

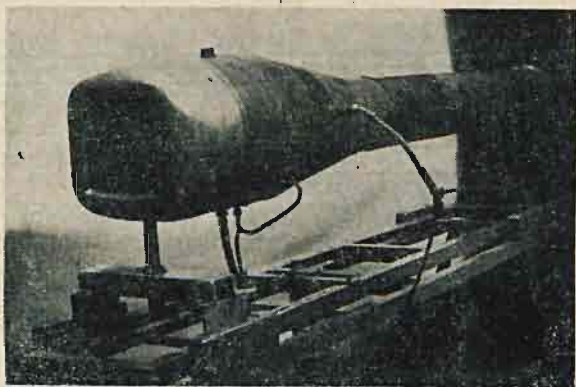
— problemy należy sklasyfikować według ich ważności, ustalając właściwą kolejność, w jakiej będzie się je rozwiązywać (w naszym przykładzie Ader uważał, że najważniejszy jest silnik, Langley, że układ płatowiec—silnik, Lilienthal natomiast, że o powodzeniu przedsięwzięcia decyduje zespół pilot—płatowiec);

— jeśli niektóre problemy nie można rozwiązywać niezależnie (w naszym przykładzie zespół płatowiec—pilot), wtedy należy poszukiwać najwłaściwszej (przeważnie najmniej kosztownej) metody badania kompleksowego, w której możnaby realizować zasadę „krok za krokiem” (w naszym przykładzie badanie zespołu płatowiec—pilot, metodą szybowcową);

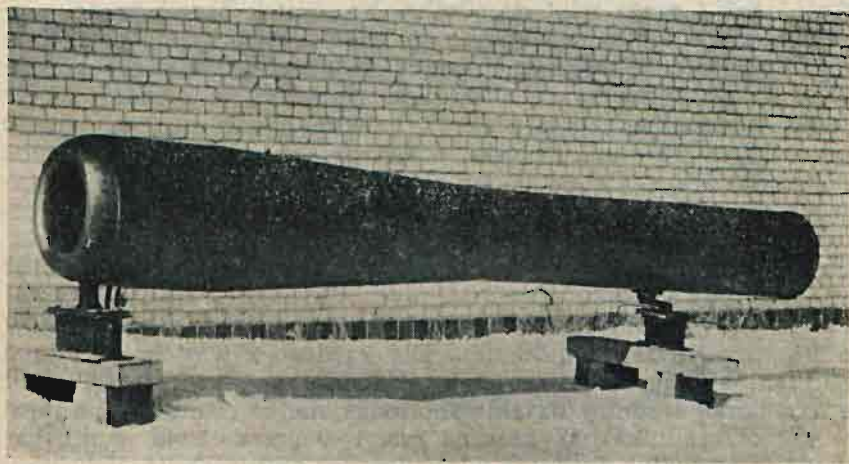
— program badań należy tak opracować, aby przynajmniej w pierwszej fazie jego realizacji, wyeliminować z niego te zagadnienia, które nie mają istotnego wpływu na urzeczywistnienie głównego celu przedsięwzięcia (w naszym przykładzie Lilienthal potrafił w odpowiedni sposób wyeliminować ze swoich lotów drugorzędny początkowo problem startu i lądowania).

Dla szczegółowej ilustracji opisanej poprzednio metody prowadzenia badań rozwojowych przytoczone zostaną dwa przykłady rozwoju konstrukcji zrealizowanych w ubiegłych latach w Instytucie Lotnictwa w Warszawie.

Pierwszy przykład odnosi się do konstrukcji bezzaworowego silnika pulsacyjnego o ciągu 10 kG, przeznaczonego do badań mających na celu sprawdzenie możliwości zastosowania silników pulsacyjnych jako napędu pomocniczego dla szybowców. W chwili rozpoczęcia pracy nad tą konstrukcją wiadomości dotyczące pulsacyjnych silników bezzaworowych były bardzo skąpe. Ukazał się właściwie tylko jeden artykuł na ten temat, opublikowany w szwajcarskim miesięczniku *Interavia* (nr 6/1953) przez wy-



Rys. 15.2. Pulsacyjny silnik zaworowy o ciągu 70 kG na stoisku badawczym

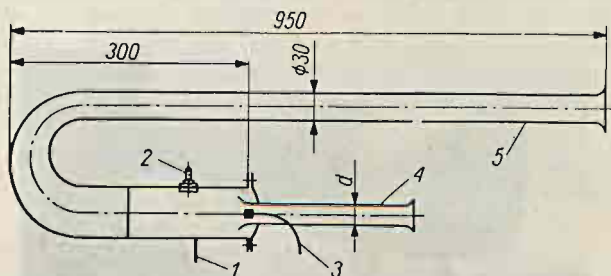


Rys. 15.3. Pulsacyjny silnik zaworowy o ciągu 500 kG



lancę tego typu silnika — M. Bertina, był on przy tym pozbawiony jakichkolwiek danych konkretnych. Pracownicy Instytutu mieli wprawdzie pewne doświadczenie w konstruowaniu silników pulsacyjnych (o ciągu od 30 do 500 kG), ale dotyczyło ono wyłącznie silników zaworowych (rys. 15.2 i 15.3).

Pracę rozpoczęto od badania rozpoznawczego na modelowym silniku zasilanym acetylenem (rys. 15.4). Zasada działania silnika



Rys. 15.4. Bezzaworowy silnik pulsacyjny przeznaczony do badań modelowych:

1 — pomiar średniego ciśnienia statycznego w komorze spalania, 2 — świeca, 3 — wtryskiwacz, 4 — wlot, 5 — dysza

jest pozornie bardzo prosta. Mieszanka acetyleny i powietrza zostaje zapalona od iskry przeskakującej między elektrodami świecy. Powstałe w ten sposób spaliny wypływają zarówno przez dyszę, jak i przez wlot do silnika. Na skutek bezwładności wypływających spalin w komorze spalania wytworzy się podciśnienie. Podciśnienie to „zassie” przez wlot porcję świeżego powietrza, które wytworzy ze stale dopływającym do komory acetylenem mieszanke, zapalającą się w pewnej chwili od reszty spalin pozostałych w silniku. Cykl powtarza się i silnik rozpoczyna normalną pracę. Celem badania było ustalenie pewnych podstawowych proporcji między zasadniczymi elementami silnika, przede wszystkim zaś optymalnych wymiarów wlotu. Za miarę osiązków silnika przyjęto średnie nadciśnienie panujące w komorze podczas pracy silnika przy ustalonych warunkach zasilania (ustalony wydatek acetyleny). Badanie przeprowadzono dla 8 wlotów o średnicach od 16 do 28 mm. Dla każdego z wlotów określono optymalną długość (to jest taką długość, przy której dla wlotu o określonej średnicy uzyskiwano maksymalne ciśnienie panujące w komorze silnika). Wykres na rys. 15.5 przedstawia wynik badania. Optymalna średnica wlotu leży w granicach 18 — 20 mm, co odpowiada stosunkowi średnic wlotu i dyszy:  $0,6 \div 0,67$ . Śred-

nica ta miałaby zapewne wymiar nieco mniejszy, gdyby nie efekt dławienia, wywołany ustawieniem na końcu wlotu rozpylacza o średnicy 6 mm.

Następnym etapem badania było przystosowanie znanej teorii pulsacyjnego silnika zaworowego do silnika bezzaworowego.

Teoretyczną analizę pracy tego silnika oparto na następującym modelu jego działania:

- zapłon w silniku pojawia się na końcu słupa mieszanki, będącej w ruchu określonym przez przebieg procesów w poprzednim obiegu;

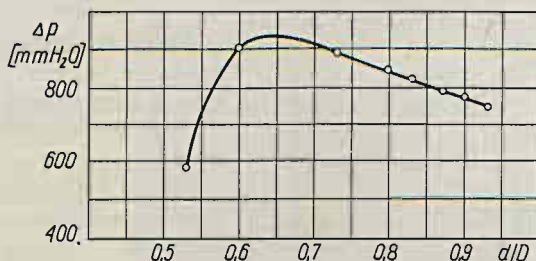
- z miejsca zapłonu rozchodzi się czoło płomienia poruszające się ze stałą prędkością względem gazu i będące początkiem spalania w poszczególnych warstwach mieszanki;

- szybkość wydzielania się ciepła jest stała w czasie;

- wydzielane ciepło powoduje wzrost entropii, temperatury i ciśnienia w obszarze spalania, przy czym wzrost ciśnienia przekazywany jest otoczeniu przez fale zgęszczeniowe, wywołujące ruch w całym silniku pulsacyjnym na zasadach ujętych przez teorię niestacjonarnego ruchu płynu ściśliwego;

- spalanie w poszczególnych elementach mieszanki kończy się po upływie pewnego czasu określonego doświadczalnie;

- przepływ gazu poza obszarem spalania jest izentropowy.

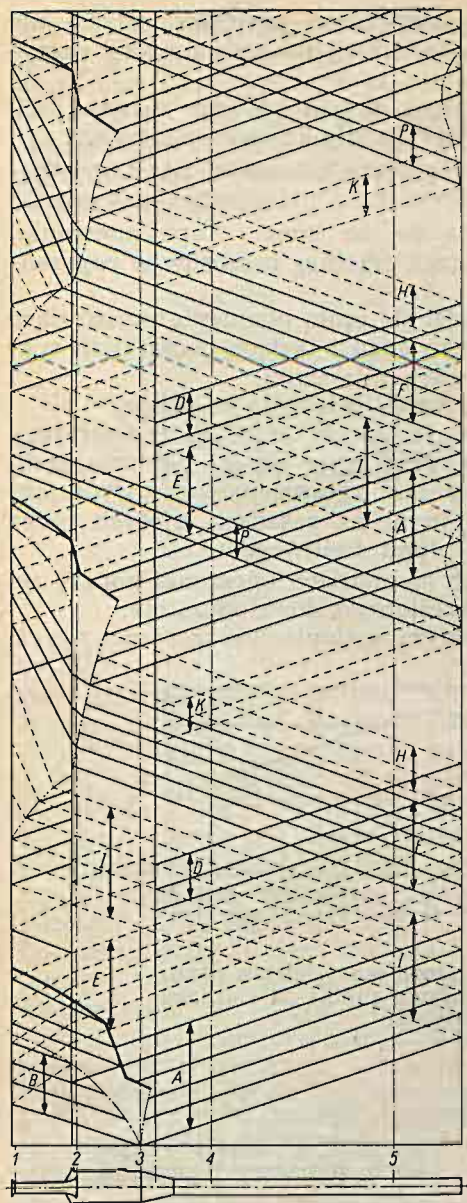


Rys. 15.5. Zależność średniego ciśnienia panującego w komorze spalania silnika od stosunku średnic:

wlotu —  $d$  i wylotu —  $D$

Rys. 15.6 przedstawia poglądowy wykres falowy ilustrujący przebieg procesów przepływu zachodzących w pulsacyjnym silniku bezzaworowym podczas dwóch pierwszych cykli roboczych.

W okresie spalania w obszarze C powstają fale zgęszczeniowe A i B, zapoczątkowujące wypływ gazów z obu końców silnika.



Fale *B* odbijają się na wlocie do silnika i powracają do obszaru spalania jako rozrzedzeniowe, nie wywołując jednak początkowo spadku ciśnienia w komorze spalania ze względu na intensywnie wydzielające się w tym czasie w obszarze spalania ciepło. Po pewnym czasie spadek ciśnienia wywołany przez nie przeważa nad przyrostem ciśnienia od resztek mieszanki płonącej głównie w elemencie wlotowym i zaczyna się spadek ciśnienia w komorze spalania reprezentowany przez pasmo fal rozrzedzeniowych *E*.

Fale *E* odbijają się na obu końcach elementu wlotowego kształtując pulsujący wpływ z komory po zakończeniu spalania.

Fale *A* odbijając się na wylocie tworzą silne pasmo rozrzedzeniowe *I*, które wywołuje zassanie świeżej mieszanki.

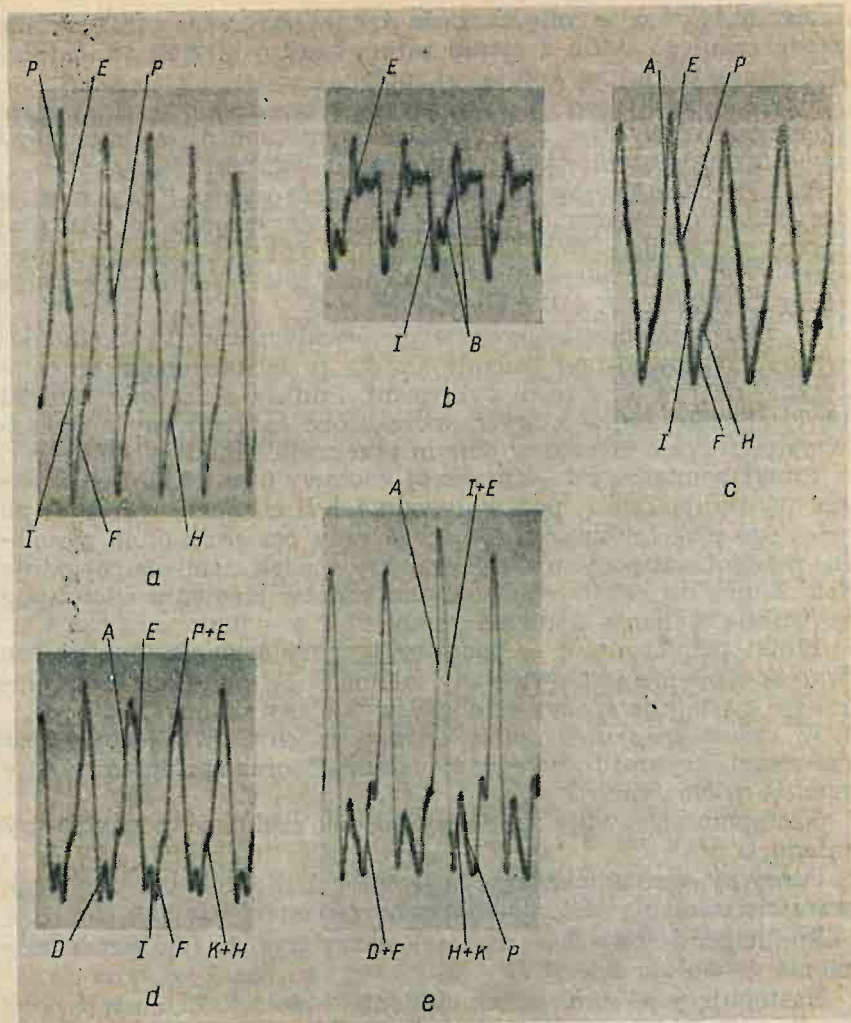
Fale *I* i *F*, odbijając się od tylnego przewężenia komory spalania, tworzą pasma *D* i *K*.

Fale *E* odbijają się na wylocie silnika jako zgęszczeniowe *F*, zatrzymując wpływ spalin przez dyszę. Fale te przy spotkaniu świeżej

Rys. 15.6. Wykres poglądowy ilustrujący przebieg procesów przepływu zachodzących w pulsacyjnym silniku bezwaworowym

— Koniec spalania — Front płomienia  
 — Fale zgęszczeniowe — (początek spalania)  
 - - - Fale rozrzedzeniowe - - - Droga cząstki





Rys. 15.7. Rozkłady ciśnień w charakterystycznych punktach silnika. Oznaczenia punktów (od 1 do 5) oraz poszczególnych fal ( $A$ ,  $B$ ,  $D$  itp.) wg rys. 15.6

mieszkanki (która w międzyczasie została podgrzana przez spaliny z poprzedniego cyklu do temperatury bardzo bliskiej temperaturze samozapłonu) wywołują jej zapłon.

Fale *D* odbijają się na wylocie jako rozrzedzeniowe *H*, tworząc niekorzystny wpływ z silnika przed dojściem do wylotu głównych fal zgęszczeniowych następnego obiegu *A*.

Fale *K* odbijając się na wylocie tworzą pasmo *P* i powodują jednocześnie podessanie powietrza atmosferycznego od tyłu (dodładowanie silnika). W cyklach drugim i dalszych oprócz już opisanych fal cyklu pierwszego występują fale *H* oraz *P* powstałe przez odbicie fal *K* i *D* na wylocie.

W celu sprawdzenia powyższego teoretycznego wykresu falogo przeprowadzono badanie silnika przedstawionego schematycznie na rys. 15.6 (pod wykresem). Punkty oznaczone cyframi określają miejsca, w których sporządzono oscylogramy przedstawiające rozkład ciśnień w danym przekroju silnika w czasie.

Punkt pomiarowy 1 — przekrój wlotowy (rys. 15.7). Podciśnienie wywołują fale *I*, pod wpływem fal *B* ciśnienie rośnie aż do pewnego maksimum występującego przy przejściu czoła płomienia przez obszar pomiarowy. Późniejszy spadek ciśnienia powodują fale *E*, one też odbijając się od obu końców elementu wlotowego wywołują wahania ciśnienia wokół linii  $p = 0$ .

Punkt pomiarowy 2 — początek komory spalania (rys. 15.7b). Wzrost ciśnienia jest wywołany falami *B*. Po przejściu czoła płomienia następuje spadek ciśnienia wywołany falami *E*.

W czasie spadku ciśnienia występuje chwilowy jego wzrost (załamanie wykresu), wywołany falami *P* oraz spalaniem w elemencie wlotowym.

Następnie obserwuje się dalszy spadek ciśnienia spowodowany falami *I*.

Ponowny wzrost ciśnienia wywołują fale *F*. Załamanie przy wzroście ciśnienia jest spowodowane zapłonem i falami *H*.

Punkt pomiarowy 3 — początek dyszy (rys. 15.7c). Wzrost ciśnienia wywołują fale *A*.

Następujący po nim spadek ciśnienia — fale *E*. Załamanie przy spadku ciśnienia powodują fale *D*. Dalszy spadek ciśnienia wytwarza pasmo *I*. Późniejszy wzrost ciśnienia wywołuje fala zgęszczeniowa *F* powodująca zapłon. Załamanie przy wzroście ciśnienia powstaje przy zapłonie lub wywołane jest falami *H*.

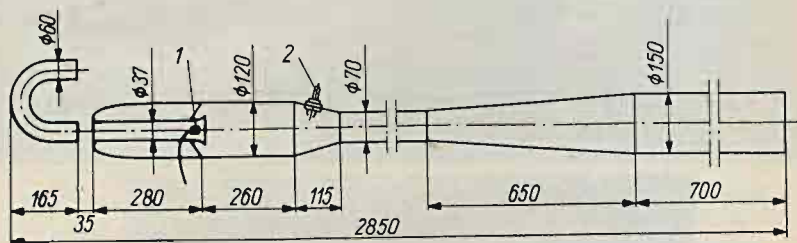
Punkt pomiarowy 4 — początek dyszy (rys. 15.7d). Charakterystyczna dla wykresu jest nieregularnie występująca deformacja wierzchołka krzywej ciśnienia powstająca przy krzyżowaniu się fal *P* i *E*. Wzrost ciśnienia wywołują fale *A*, spadek — fale *E*, ponowny wzrost — fale *D* i następujący po nim spadek — fale *I*.

Dalszy wzrost ciśnienia — fale  $F$ , a załamanie na krzywej wzrostu — fale  $K$  i  $H$ .

Punkt pomiarowy 5 — koniec dyszy (rys. 15.7c). Po osiągnięciu maksymalnego ciśnienia (fala  $A$ ) następuje jego spadek wywołany falami  $E$  i  $I$ . Ponowny wzrost ciśnienia dają fale  $D$  i  $F$ . Następny spadek — fale  $H$  i  $K$ , ponowny jego wzrost — fale  $P$ ; załamanie wykresu przy wzroście ciśnienia wynika z zapłonu.

Dla wszystkich więc punktów pomiarowych uzyskano daleko idącą zgodność teoretycznego wykresu falowego z pomiarami ciśnienia.

W podobny sposób w oparciu o teorię silnika zaworowego opracowano metodę obliczania ciągu i zużycia paliwa silnika bezzaworowego. Wartości doświadczalnych współczynników niezbędnych do obliczeń określono eksperymentalnie na podstawie badań silnika przedstawionego na rys. 15.6 oraz kilku jego wariantów.



Rys. 15.8. Schemat bezzaworowego silnika pulsacyjnego o ciągu 10 kG:

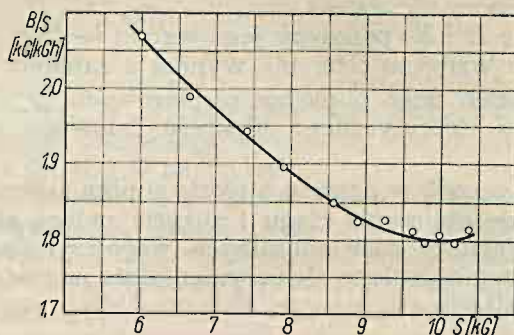
1 — wtryskiwacz paliwa, 2 — świeca zapłonowa

Korzystając z otrzymanych w ten sposób wyników oraz pewnych dodatkowych wiadomości z literatury, zaprojektowano silnik przedstawiony schematycznie na rys. 15.8. Silnik ten zasilany benzyną przebadano na tym samym stoisku, na którym „pozuje” do zdjęcia silnik zaworowy z rys. 15.2.

Po dopracowaniu polegającym przede wszystkim na dobraniu właściwego rozpylacza oraz wlotu o właściwym profilu otrzymano silnik, którego charakterystykę przedstawia rys. 15.9. W tym stanie uznano, że silnik nadaje się już do prób w locie. Wykonano 4 analogiczne silniki i zainstalowano je parami pod skrzydłami dwumiejscowego szybowca *Bocian* (rys. 15.10). Zasilanie silników benzyną odbywało się za pomocą sprężonego azotu. Między butlą z azotem a zbiornikiem benzyny znajdował się zawór redukcyjny, który utrzymywał stałe ciśnienie w zbiorniku.



Silniki uruchamiano w locie parami (rys. 15.11), po jednym z każdej strony. W wyniku przeprowadzonych prób stwierdzono, że zarówno silniki, jak i instalacja zasilająca pracują bez zastrzeżeń. Zauważono jednak wyraźny spadek ciągu silników w locie



Rys. 15.9. Charakterystyka silnika przedstawionego na rys. 15.8

w stosunku do ciągu otrzymanego na hamowni w warunkach stacjonarnych. Ciąg silników w locie określono metodą pośrednią



Rys. 15.10. Zabudowa pulsacyjnych silników bezzaworowych pod skrzydłami szybowca *Bocian*

za pomocą znanej charakterystyki szybowca przez porównanie jego osiągnięć bez silników, z silnikami niepracującymi oraz silnikami pracującymi.



Rys. 15.11. Szybowiec *Bocian* z silnikami pulsacyjnymi w locie

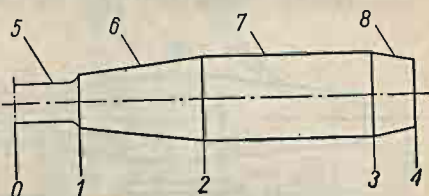
**Drugi przykład** badań rozwojowych dotyczy realizacji doświadczalnego silnika strumieniowego przeznaczonego do napędu wirnika śmigłowca.

Zasada działania tego silnika (rys. 15.12) jest następująca:

— napływające do wnętrza silnika powietrze atmosferyczne zostaje sprężone przed dyfuzorem i w dyfuzorze;

Rys. 15.12. Schemat silnika strumieniowego:

0, 1, 2, 3, 4 — charakterystyczne przekroje silnika, 5 — graniczne linie prądu strumienia powietrza napływającego do silnika, 6 — dyfuzor, 7 — komora spalania, 8 — dysza



— powietrze to podgrzewa się w komorze na skutek spalania w niej paliwa węglowodorowego;

— wytworzone w ten sposób spaliny rozprężają się w dyszy wylotowej.

Ciąg w silniku powstaje jako wypadkowa ciśnień działających na zewnętrzną i wewnętrzną powierzchnię jego ścian. Wypadkowa ta jest skierowana przeciwnie do kierunku przepływu powietrza, gdy prędkość spalin wypływających z dyszy jest większa od prędkości strumienia nabiegającego do silnika. Na podstawie przyjętych założeń konstrukcyjnych dla śmigłowca ustalono następujące warunki techniczne dla silnika strumieniowego:

ciąg netto . . . . . —  $S = 11 \text{ kG}$ ;  
 prędkość . . . . . —  $w = 180 \text{ m/sek}$ ;  
 średnica wirnika . . —  $d = 7 \text{ m}$ .

Z wymiaru średnicy oraz prędkości obwodowej wirnika wynika przyspieszenie dośrodkowe, jakiemu poddany jest silnik podczas pracy. Jest ono rzędu 1000 przyspieszeń ziemskich. Ten fakt wysunął na czołowe miejsce w projekcie silnika zagadnienia wytrzymałościowe.

Na podstawie analizy działania silnika strumieniowego można wysnuć wniosek, że zjawiskiem mającym istotny wpływ na jego osiągi jest przewężenie strumienia wlotowego. Przewężenie to zależy przy danej geometrii silnika od dławienia strugi powietrza przepływającej przez silnik, wywołanego doprowadzeniem ciepła (dławienie termiczne).

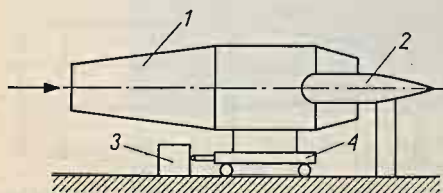
Miarą przewężenia jest stosunek powierzchni wlotu  $F$  do powierzchni poprzecznego przekroju wolnego strumienia przed silnikiem  $F_0$

$$\varphi = \frac{F}{F_0}$$

W celu określenia zależności osiągow silnika strumieniowego od współczynnika przewężenia przeprowadzono dwa następujące badania.

*Badanie „metodą trzpienia”.* Metodę tę ilustruje szkic na rys. 15.13. Silnik ustawiony jest na wózku, który może się przesuwać

wzdłuż osi poziomej. Na silnik działa strumień powietrza. Efekt dławienia termicznego jest w tej metodzie zastąpiony dławieniem wywołanym przez oddziaływanie trzpienia na przekrój wylotowy silnika. Powstały w ten sposób ciąg jest mierzony za pomocą siłomierza mechanicznego. Typową zależność

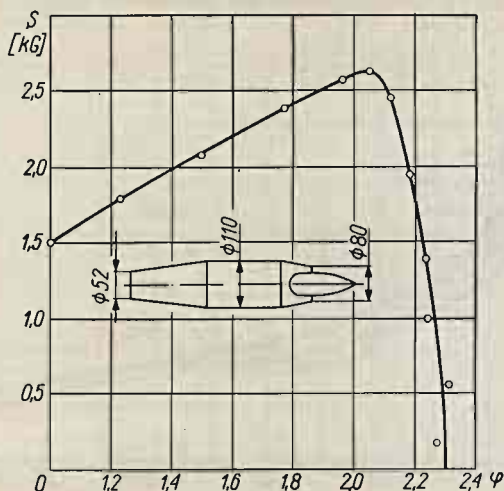


Rys. 15.13. Badanie silnika strumieniowego „metodą trzpienia”:

1 — silnik strumieniowy, 2 — trzpień,  
 3 — siłomierz, 4 — wózek

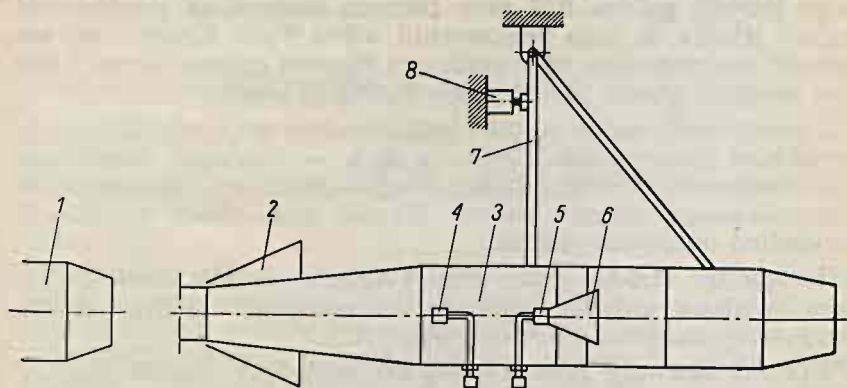


ciągu  $S$  od współczynnika przewężenia  $\varphi$  przedstawia wykres na rys. 15.14. Z wykresu wynika, że maksymalny ciąg silnika strumieniowego uzyskuje się przy współczynniku przewężenia  $\varphi = 2,0$ .



Rys. 15.14. Charakterystyka silnika strumieniowego badanego „metodą trzpienia”

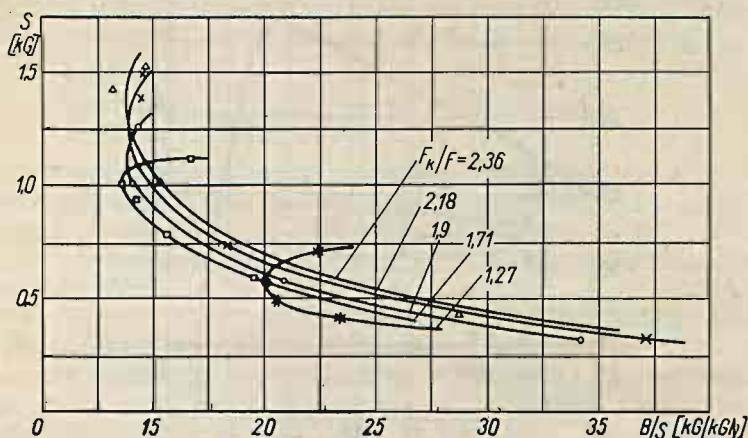
*Badanie silnika modelowego.* Badanie przeprowadzono na stoisku przedstawionym na rys. 15.15. Stoisko umożliwiło pomiar



Rys. 15.15. Stoisko do badań strumieniowego silnika modelowego:

1 — wylot dyszy, 2 — osłona, 3 — badany silnik, 4 — wtryskiwacz przeciwpłomienisty, 5 — wtryskiwacz współprądowy, 6 — statecznik płomienia, 7 — zawieszenie silnika, 8 — siłomierz

wydatku paliwa  $B$ , ciągu silnika  $S$  i termodynamicznych parametrów powietrza w wolnym strumieniu przed silnikiem oraz w przekroju wlotowym silnika. Wyniki badania pokazano na wykresie rys. 15.16. Przedstawia on zależność ciągu od jednostko-



Rys. 15.16. Wyniki badań modelowego silnika strumieniowego. Minimalne jednostkowe zużycie paliwa odpowiada optymalnemu współczynnikowi przewężenia (współczynnik przewężenia dla danego  $F_k/F$  stale rośnie ze wzrostem ciągu)

wego zużycia paliwa  $B/S$  przy różnych stosunkach powierzchni wylotu silnika do jego powierzchni wlotu  $F_k/F$ . Krzywa tej zależności ma minimum odpowiadające ciągowi optymalnemu i jest tym bardziej płaska im stosunek  $F_k/F$  jest większy.

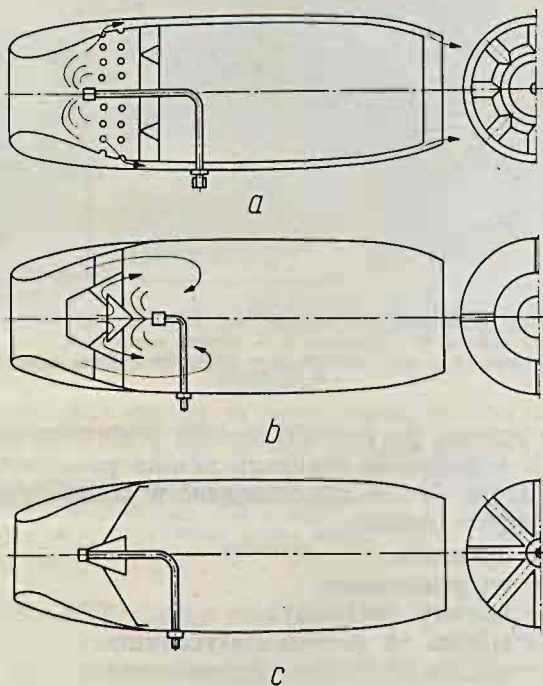
Z powyższych badań wynika istnienie dwu optymalnych współczynników przewężenia. Jeden z nich — większy, odpowiada maksymalnemu ciągowi silnika, drugi — mniejszy, minimalnemu jednostkowemu zużyciu paliwa. Wyniki tych badań umożliwiły racjonalne obliczenie silnika.

Następnym etapem pracy było przyjęcie układu konstrukcyjnego. Wyboru układu dokonano na podstawie analizy trzech wariantów przedstawionych na rys. 15.17.

Wariant pierwszy (rys. 15.17a) ma podwójne ścianki, między którymi przepływa powietrze odessane z dyfuzora na skutek istnienia różnicy ciśnień między końcem dyszy i początkiem komory spalania. Dzięki temu uzyskuje się poprawę sprawności dyfuzora oraz chłodzenie wewnętrznej płaszczki komory spala-

nia. Podwójna ścianka silnika usztywnia jego konstrukcję, zwiększa jednak znacznie ciężar.

W wariantcie drugim (rys. 15.17b) wprowadzono integralny zespół dyfuzor-statecznik płomienia. Paliwo wtryskiwane jest w strefę zaburzeń statecznika. Taki typ komory spalania pozwala uzyskać wysoką sprawność spalania tylko przy niskich obciążeniach cieplnych. Powiększyłoby to znacznie wymiary silnika.

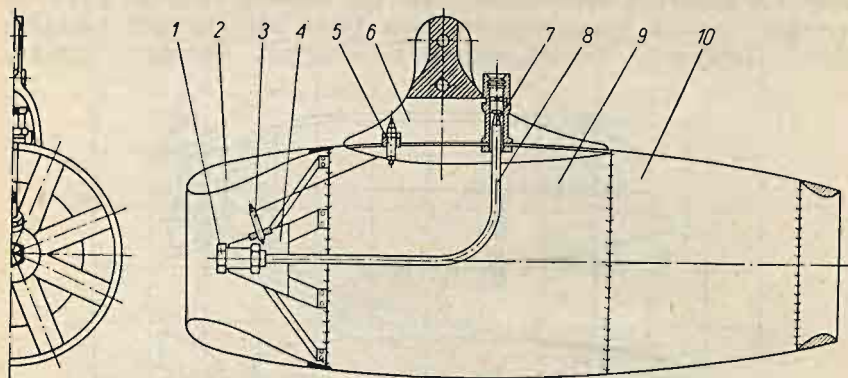


Rys. 15.17. Analizowane układy konstrukcyjne silników strumieniowych

Ostatecznie wybrano trzeci wariant (rys. 15.17c) mający cechy integralności przy jednocześnie najdalej idącej prostocie. Wydaje się, że wybór układu na podstawie badań eksperymentalnych mógłby dać wynik tylko wtedy, gdyby prowadziło się równoległe badania rozwojowe wszystkich trzech układów. Ocena jakości układu tylko na podstawie badań trzech praprototypów mogłaby być mylna (gdyby na przykład w gorszym wariantcie popełniono w pierwszym rozwiązaniu mniej błędów niż w lepszym). Z dru-



giej strony wydaje się, że każdy z tych układów można by doprowadzić do stanu nadającego się do eksploatacji. Przyjęty układ posłużył jako podstawa dla konstrukcji silnika, którą w uproszczonej postaci przedstawia rys. 15.18.



Rys. 15.18. Schemat konstrukcyjny silnika strumieniowego:

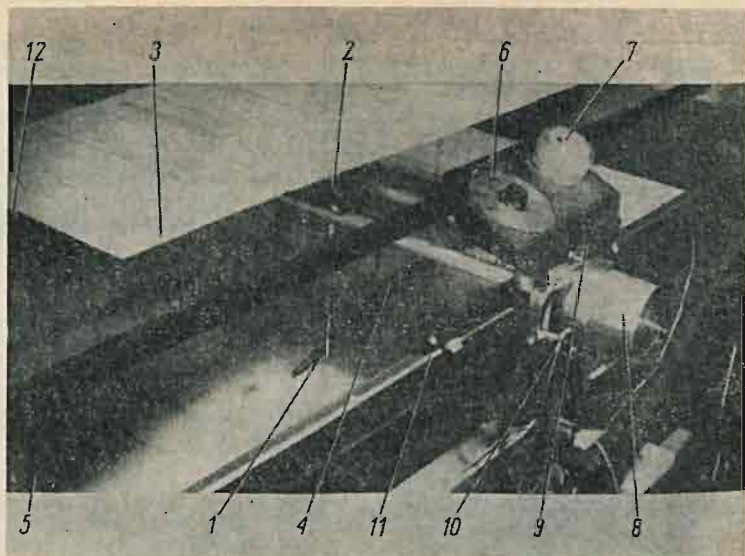
1 — wtryskiwacz paliwa, 2 — dyfuzor, 3 — świeca zapłonowa, 4 — statecznik, 5 — izolator, 6 — uchwyt, 7 — filtr paliwa, 8 — przewód paliwa, 9 — komora spalania, 10 — dysza

Zgodnie z opisaną poprzednio metodą postępowania w pracach rozwojowych zagadnienie realizacji silnika podzielono na szereg problemów, które starano się rozwiązać w trakcie przeprowadzania następujących badań:

- badanie dyfuzora;
- badanie wtryskiwacza;
- badanie komory spalania;
- badanie silnika na stoisku statycznym;
- badanie silnika na stoisku dynamicznym;
- badanie zapłonu;
- badanie długotrwałości pracy silnika;
- badanie wytrzymałości silnika.

Badanie dyfuzora podzielono na badanie części wlotowej oraz na badanie kanału wewnętrznego.

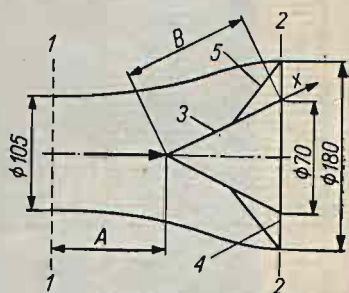
Część wlotową przebadano metodą analogii elektrycznej. Podstawą tej metody jest identyczność linii prądu, przy ustalonym ruchu cieczy, z liniami ekwipotencjalnymi odpowiednio wytworzonego pola elektrycznego w elektrolicie. Stoisko badawcze służące do tego celu przedstawia fotografia na rys. 15.19. Wynik jednego z badań ilustrują rys. 15.20a i b. Rys. 15.20a przedstawia linie prądu w przypadku współczynnika przewężania



Rys. 15.19. Stoisko do badania przepływów metodą analogii elektrycznej:

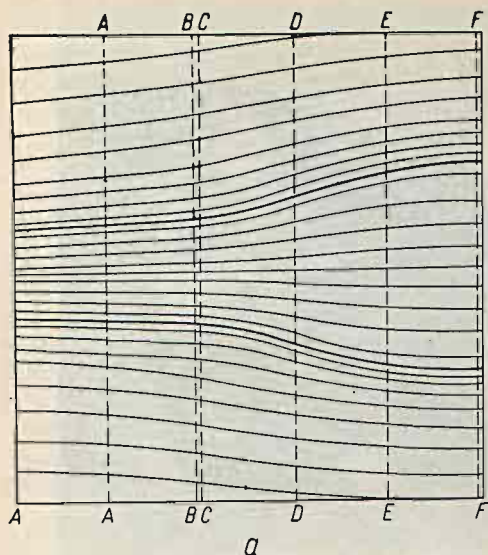
1 — sonda, 2 — układ optyczny, za pomocą którego rzuca się na rozpięty arkusz kalki obraz punktowego źródła światła, umieszczonego na przedłużeniu osi sondy (obraz ten wskazuje położenie sondy), 3 — arkusz kalki rozpięty na szybie, na którym po zaznaczeniu położenia i kształtu modelu oraz elektrod głównych rysuje się linie ekwipotencjalne, 4 — model ścianki dyfuzora, 5 — wanna pomiarowa z elektrolitem, 6 — potencjometr, 7 — galwanometr, 8 — prostownik, 9, 10 — gałki do przesuwania sondy, 11 — prowadnica wózka sondy, 12 — jedna z elektrod głównych

$\varphi = 1,23$ . Rys. 15.20b podaje rozkłady prędkości w przekrojach zaznaczonych na rys. 15.20a. Badanie to umożliwiło takie ukształtowanie wlotu dyfuzora, który dla danego współczynnika przewężenia zapewnia „bezuderzeniowy” napływ powietrza do dyfuzora. Badanie kanału wewnętrznego dyfuzora przeprowadzono „przedmuchując” strumieniem powietrza szereg wersji dyfuzorów na rys. 15.21 i mierząc straty przepływu. W ten sposób wybrano dyfuzor o optymalnym kształcie i wymiarach.



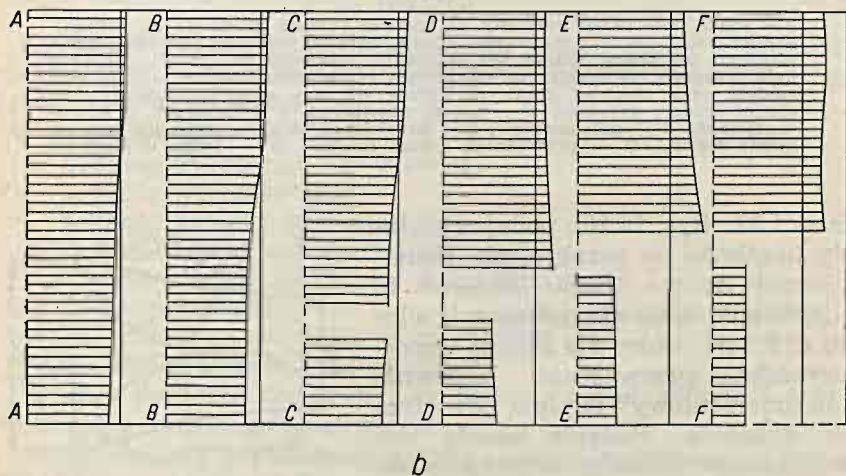
Rys. 15.21. Schemat badanego dyfuzora:

1 — 1 — przekrój wlotowy, 2 — 2 — przekrój wylotowy, A — długość części cylindrycznej, B — długość części pierścieniowej, 3 — statcznik, 4 — palce proste, 5 — palce skośne



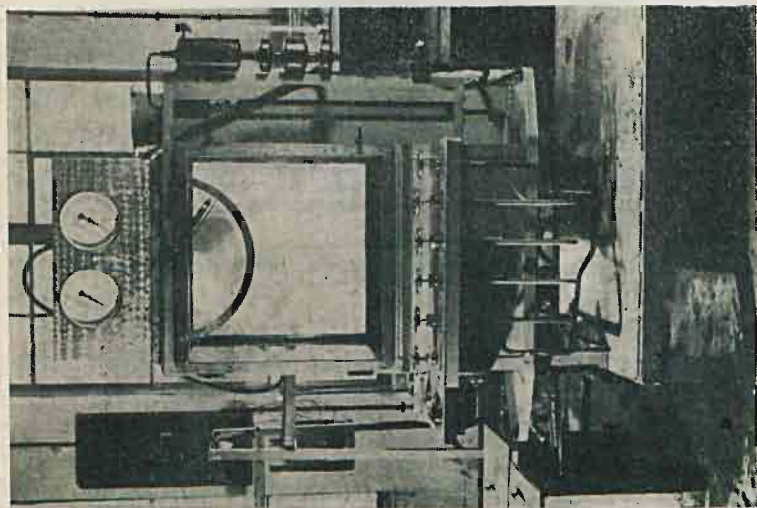
Rys. 15.20. Przepływ przez dyfuzor poddźwiękowy, przedstawiony metodą analogii elektrycznej:

$a$  — obraz linii prądu,  $b$  — rozkład prędkości w odpowiednich przekrojach z rys.  $a$

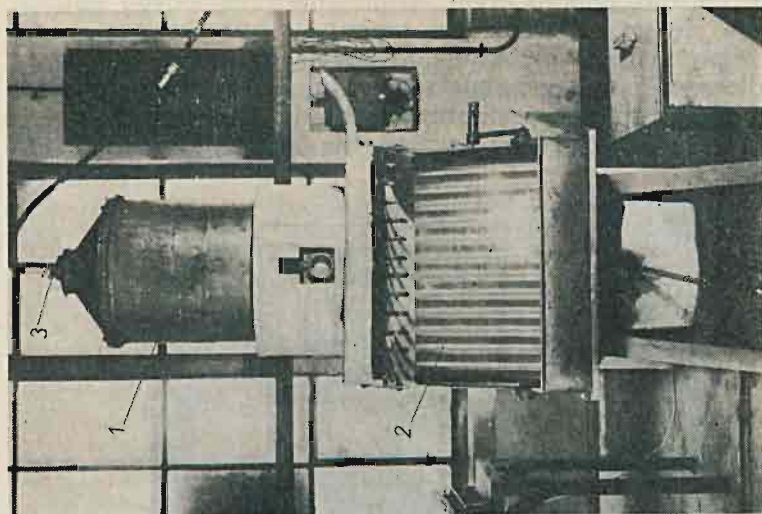


Badanie wtryskiwacza przeprowadzono na dwu stoiskach przedstawionych na fotografiach (rys. 15.22 i 15.23). Pierwsze z tych stoisk służy do sporządzania charakterystyki wtryskiwacza (tj. zależności jego wydatku od ciśnienia wtrysku) oraz do określania kąta wtrysku, drugie natomiast — do badania rozkładu strefo-



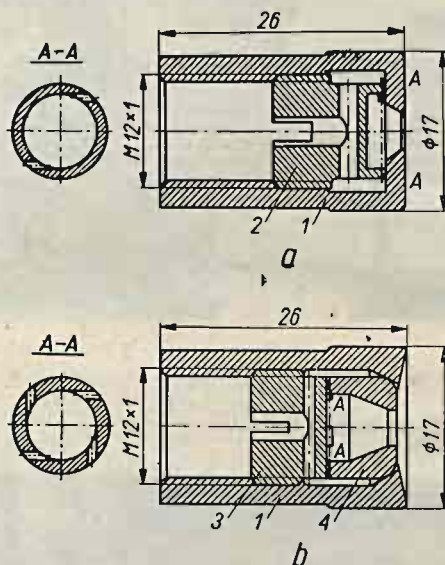


Rys. 15.22. Stoisko do badania wtryskiwaczy (służy do określania kąta wtrysku oraz sporządzania charakterystyki)



Rys. 15.23. Stoisko do badania wtryskiwaczy (służy do badania rozkładu strefowego)

wego, który jest miarą równomierności przepływu kropelek cieczy w przekroju poprzecznym strumienia rozpylonego paliwa. Otrzymuje się go, umieszczając pracujący wtryskiwacz w osi komory z promieniowymi ściankami dzielącymi komorę o przekroju kołowym na odpowiednie segmenty. Zbierające się w tych segmentach paliwo zostaje odprowadzone do ustawionych w szeregu menzurek. W ten sposób uzyskuje się od razu obraz rozkładu strefowego.



Rys. 15.24. Schematy konstrukcyjne wtryskiwaczy wirowych:

a — wersja wyjściowa, b — wersja ostateczna; 1 — osłona, 2 — rdzeń, 3 — wkręt dociskający, 4 — zawór wirowy

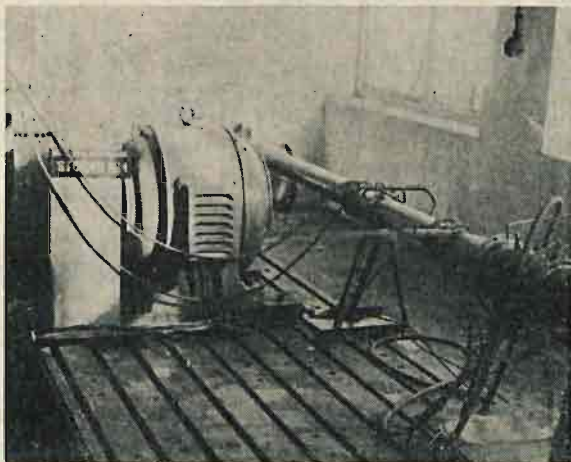
Wtryskiwacz do silnika strumieniowego powinien odpowiadać następującym warunkom:

- powinien mieć prawidłowy rozkład strefowy ( $\pm 5\%$ );
- powinien być szczelny (maksymalne ciśnienie wtrysku wynosi 150 ata);
- powinien być zabezpieczony przed występowaniem erozji.

Po długich próbach, wielokrotnych przeróbkach i doskonaleniach, tak konstrukcyjnych jak i technologicznych, uzyskano rozpylacz spełniający powyższe wymagania. Konstrukcję ostatecznej wersji rozpylacza na tle wersji wyjściowej przedstawia rys. 15.24.

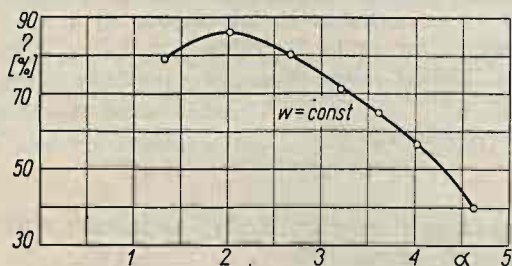
Badanie komory spalania prowadzono na stoisku przedstawionym na rys. 15.25. Stoisko umożliwiało dokonanie następujących pomiarów:

- pomiar wydatku powietrza i paliwa;
- pomiar parametrów termodynamicznych powietrza na wejściu do komory spalania;
- pomiar parametrów termodynamicznych spalin na wylocie z komory.



Rys. 15.25. Stoisko do badania komór spalania

Na podstawie tych pomiarów można było określić straty ciśnienia w komorze oraz jej sprawność. Przykładową charakterystykę komory, wyrażoną w postaci zależności sprawności spalania  $\eta$



Rys. 15.26. Charakterystyka komory spalania

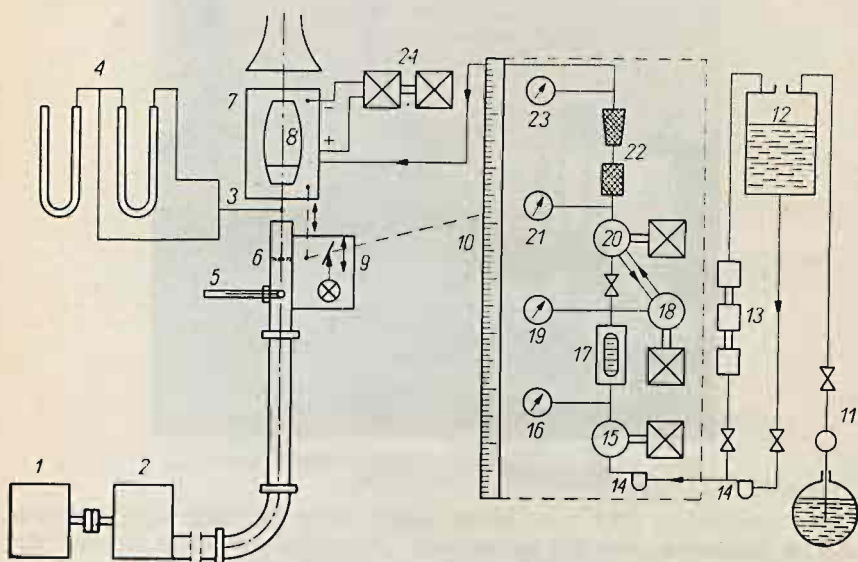
od współczynnika nadmiaru powietrza  $\alpha$  przedstawia wykres na rys. 15.26. Na podstawie tych badań stwierdzono, że decydujący wpływ na pracę komory ma nie tyle rodzaj statecznika płomienia



nia, co usytuowanie rozpylacza, jego kąt wtrysku oraz rozkład strefowy.

*Badania statyczne silnika* przeprowadzono na stoisku przedstawnym schematycznie na rys. 15.27. Na stoisku można było mierzyć następujące wielkości:

- ciąg silnika (rys. 15.28);
- parametry powietrza napływającego do silnika;
- wydatek  $B$  i ciśnienie paliwa  $p$ .

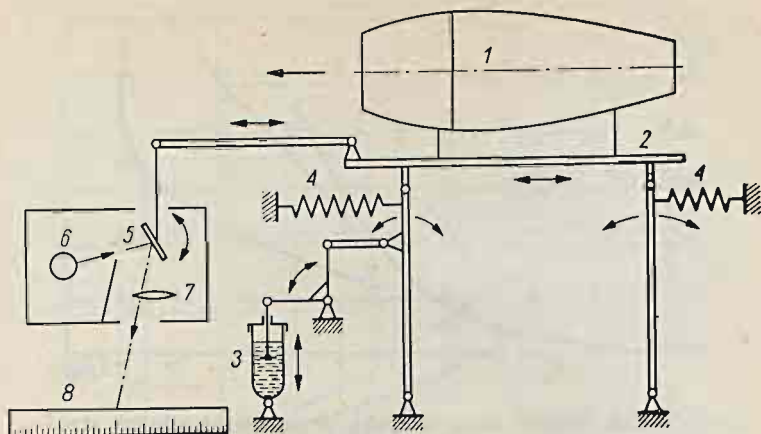


Rys. 15.27. Schemat stoiska do badania silników strumieniowych w warunkach statycznych:

1 — zespół napędowy, 2 — zespół dmuchaw, 3 — rurka Pitota, 4 — manometry cieczowe, 5 — termometr, 6 — kierownica, 7 — stojak, 8 — badany silnik, 9 — układ optyczny, 10 — skala, 11 — pompa ręczna, 12 — zbiornik paliwa, 13 — butla pomiarowa, 14 — filtr niskiego ciśnienia, 15 — pompa zasilająca, 16 — manometr ciśnienia zasilania, 17 — rotametr, 18 — pompa oleju, 19 — manometr ciśnienia oleju, 20 — pompa wysokiego ciśnienia, 21 — manometr obciążenia pompy, 22 — filtry wysokiego ciśnienia, 23 — manometr wysokiego ciśnienia za filtrem, 24 — iskrownik z silnikiem napędowym

Celem badania było między innymi ustalenie wpływu na osiągi silnika poniższych czynników:

- położenie wtryskiwacza;
- kąt wtrysku paliwa  $\beta$ ;
- kształt statecznika;
- prędkość napływu powietrza do silnika  $w$ ;
- kąt odchylenia osi silnika od kierunku strumienia.



Rys. 15.28. Schemat urządzenia do pomiaru ciągu:

1 — badany silnik, 2 — stół wahliwy, 3 — hydrauliczny tłumik drgań, 4 — sprężyna, 5 — lusterko, 6 — żarówka z prostym włóknem, 7 — soczewka, 8 — skala

Niektóre z otrzymanych charakterystyk przedstawiono na rys. 15.29, 15.30 i 15.31. Badania statyczne pozwoliły ustalić geometrię silnika, który nadawał się już do prób dynamicznych. Sprawdzającą próbę statyczną takiego silnika przedstawia rys. 15.32.

Badania na stoisku dynamicznym (rys. 15.33) miały na celu sprawdzenie pracy silnika w warunkach działania pola sił odśrodkowych. Obok stoiska ustawiono stalowy bunkier (niewidoczny na zdjęciu), z którego obserwowano pracę silnika za pomocą stroboskopu. Obserwacje te wykazały, że zakłócenia w pracy komory spalania silnika strumieniowego, spowodowane działaniem pola sił odśrodkowych, nawet przekraczających tysiąckrotnie przyspieszenie ziemskie, są bardzo nieznaczne.

Ciąg silnika na stoisku dynamicznym określano pośrednio z zależności:

$$(S - P_x)r = J\varepsilon$$

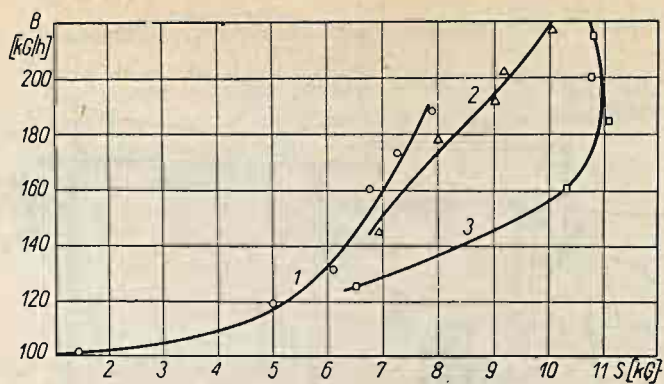
gdzie:  $S$  — ciąg silnika;

$P_x$  — opór aerodynamiczny i mechaniczny ramienia;

$r$  — długość ramienia, na którym był zamocowany silnik;

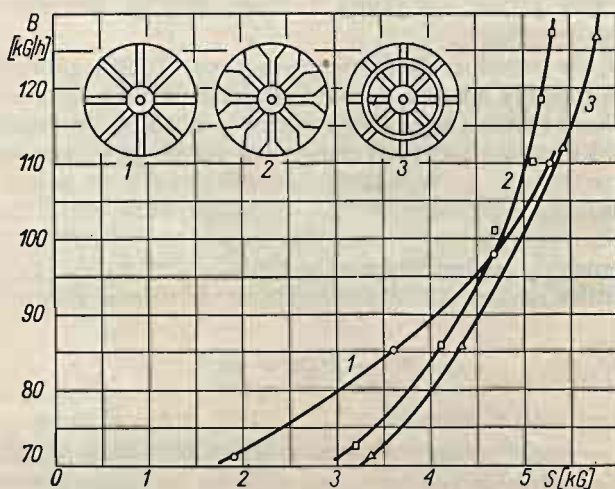
$J$  — moment bezwładności ramienia z silnikiem;

$\varepsilon$  — przyspieszenie kątowe.



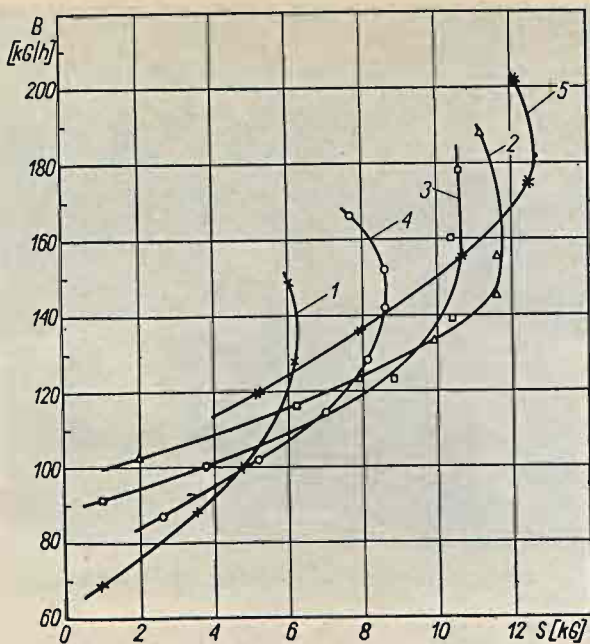
Rys. 15.29. Wpływ kąta wtrysku  $\beta$  na osiągi silnika strumieniowego:

1 —  $\beta = 100^\circ$ , 2 —  $\beta = 120^\circ$ , 3 —  $\beta = 140^\circ$



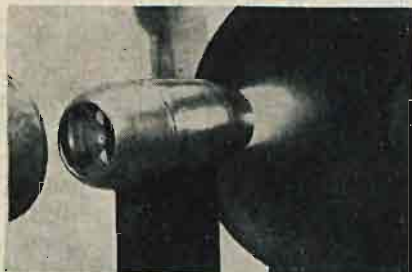
Rys. 15.30. Wpływ kształtu statecznika na osiągi silnika strumieniowego



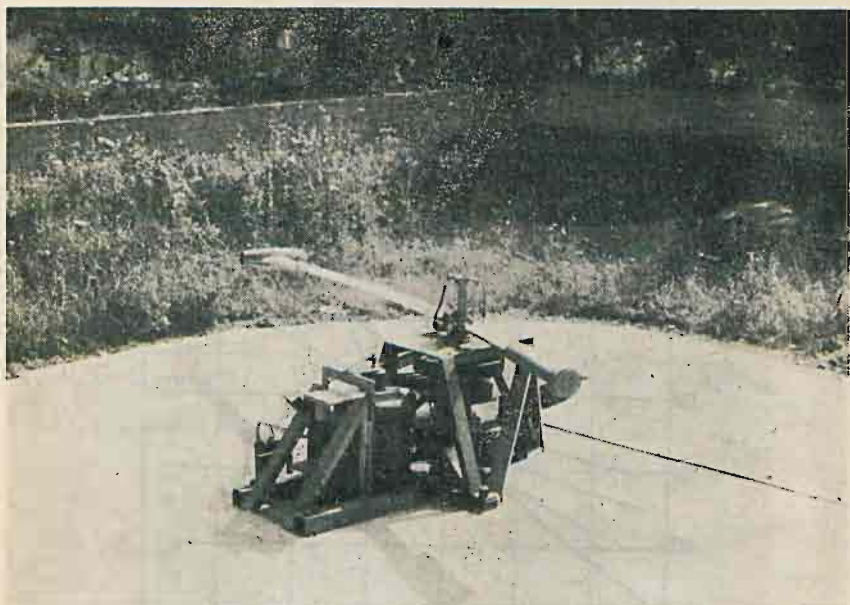


Rys. 15.31. Wpływ prędkości nabiegającego strumienia na osiągi silnika:

1 —  $w = 183 \text{ m/s}$ , 2 —  $w = 166 \text{ m/s}$ , 3 —  $w = 156 \text{ m/s}$ ,  
4 —  $w = 139 \text{ m/s}$ , 5 —  $w = 113 \text{ m/s}$



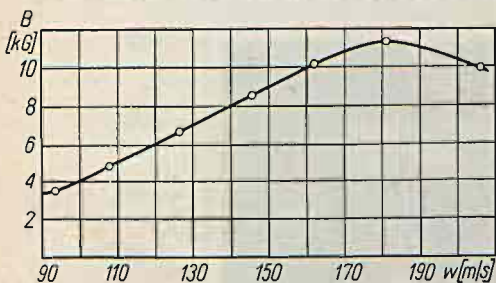
Rys. 15.32. Silnik strumieniowy podczas próby statycznej



Rys. 15.33. Stoisko do badań dynamicznych

Moment bezwładności ramienia obliczono posługując się metodą wahadła fizycznego. Przyspieszenie kątowe odczytywano z zapisów obrotomierza rejestrującego na taśmie zmianę prędkości obrotowej w funkcji czasu. Opór ramienia ustalono rozkręcając go do pewnych prędkości obrotowych, a potem mierząc opóźnienie kątowe podczas „swobodnego” hamowania.

Ostateczne wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 15.34.

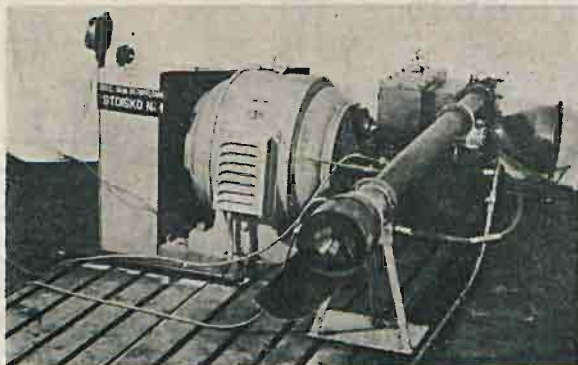


Rys. 15.34. Charakterystyka silnika strumieniowego sporządzona na stoisku dynamicznym

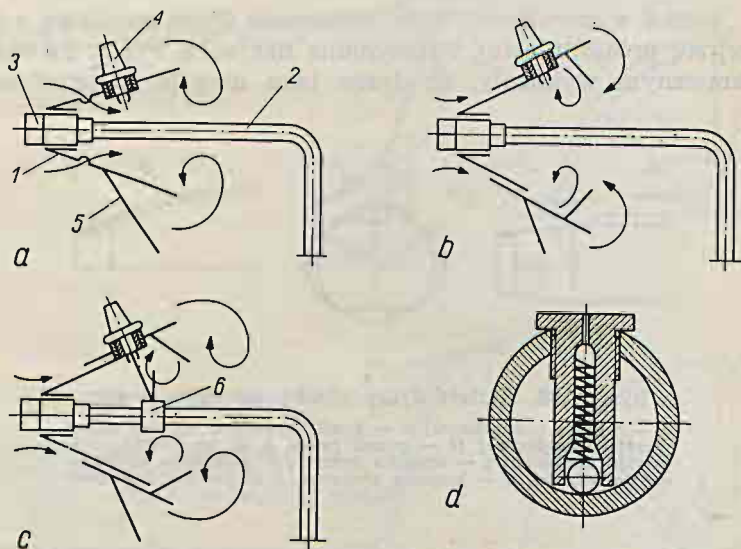
Badanie zapłonu silnika strumieniowego przy różnych prędkościach lotu oraz w różnych warunkach atmosferycznych prowadzono na stoisku dynamicznym oraz na specjalnie do tego celu przystosowanym stoisku do badania komór spalania (rys. 15.35). Rozwój stosowanych metod zapło-

nu ilustruje rys. 15.36. W wersji ostatecznej wprowadzono rozpylacz rozruchowy z samoczynnie odcinającym się przy około 120 m/s zaworem.

Podczas pracy silnika strumieniowego na stoiskach statycznym i dynamicznym występowały uszkodzenia, które wynikały z działania sił odśrodkowych oraz działania wysokiej temperatury.



Rys. 15.35. Stoisko do badania zapłonu



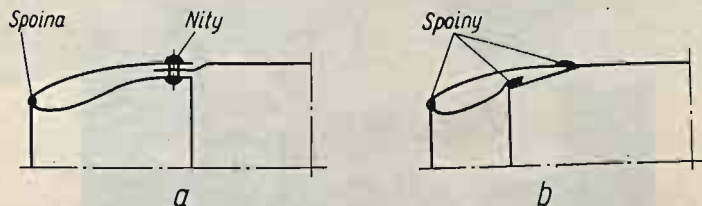
Rys. 15.36. Rozwój metody zapłonu silnika strumieniowego:

- 1 — stożek statecznika, 2 — przewód paliwa, 3 — wtryskiwacz główny, 4 — świeca, 5 — palec statecznika, 6 — wtryskiwacz rozruchowy, 7 — przekrój przez wtryskiwacz rozruchowy; a, b, c — kolejne wersje



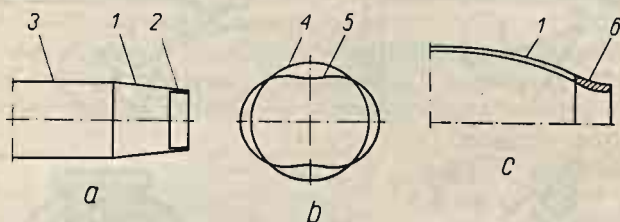
Poniżej zestawiono przykładowo niektóre zmiany konstrukcyjne wprowadzone do konstrukcji silnika w wyniku prób stoiskowych:

— zamocowanie dyfuzora. Dyfuzor był początkowo do komory spalania nitowany. Podczas prób na stoisku dynamicznym stwierdzono kilkakrotnie uszkodzenie takiego połączenia i zastąpiono je spawanym (rys. 15.37);



Rys. 15.37. Połączenie dyfuzora z komorą:  
a — wersja początkowa, b — wersja końcowa

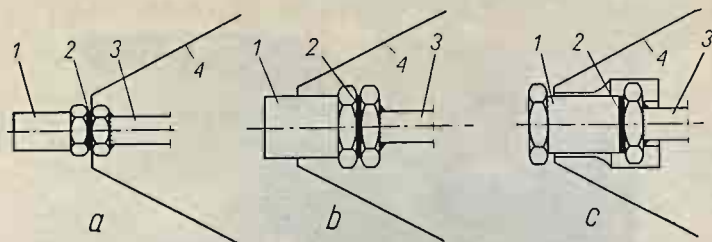
— kształt dyszy. Początkowo stosowano dyszę stożkową o tworzącej się prostoliniowej, wzmocnioną nakładką. Próby na stoisku dynamicznym wykazały, że dysza taka ulegała odkształceniom



Rys. 15.38. Kształt dyszy silnika strumieniowego:  
a — wersja początkowa, b — profil krawędzi spływu dyszy wersji początkowej (4 — przed pracą, 5 — po pracy), c — wersja końcowa; 1 — ścianka dyszy, 2 — nakładka zgrzewana do ścianki, 3 — komora spalania, 6 — pierścień wzmacniający

(rys. 15.38). Zastosowano ostatecznie dyszę o ściankach krzywo liniowych zakończonych na krawędzi spływu pierścieniem wzmacniającym;

— zamocowanie wtryskiwacza. Rozwój metody zamocowania wtryskiwacza przedstawiono na rys. 15.39. Ostateczne rozwiązanie umożliwiło łatwą wymianę wtryskiwacza i zabezpieczało sta-

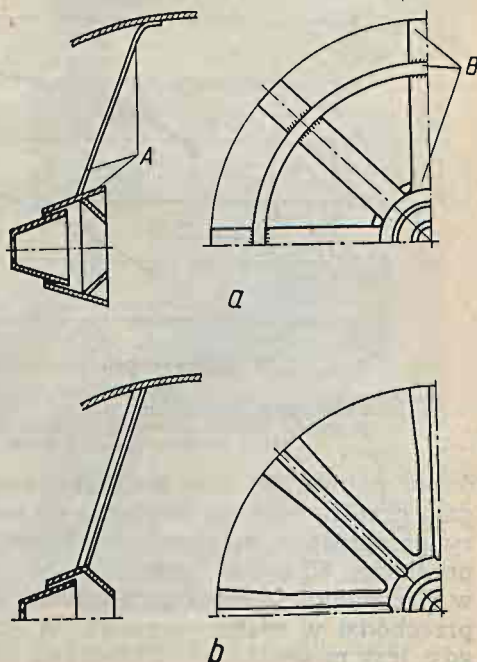


Rys. 15.39. Rozwój metody zamocowania wtryskiwacza:

1 — wtryskiwacz, 2 — podkładka, 3 — przewód paliwa, 4 — statecznik;  
a, b, c — kolejne wersje

tecznik płomienia przed trwałymi odkształceniami wywołanymi różnicą wydłużania się pod wpływem temperatury przewodu doprowadzającego paliwo i statecznika;

— geometria stateczników. Przedstawiony na rys. 15.40a statecznik płomienia w wersji początkowej ulegał uszkodzeniom.



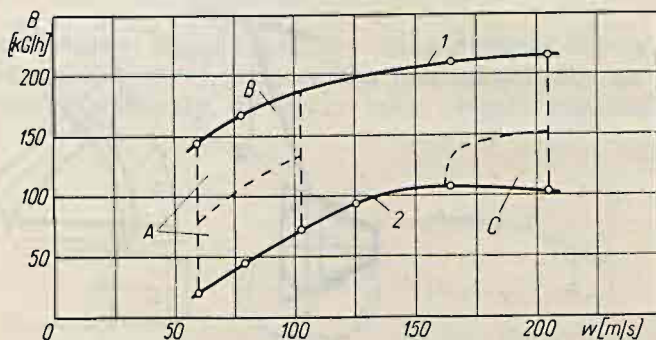
Rys. 15.40. Zmiana geometrii statecznika płomienia w wyniku prób długotrwałości pracy:

a — wersja początkowa, b — wersja końcowa, A — miejsca, w których występuje przegrzanie, B — miejsca, w których występuje deformacja

Uszkodzenia te były następstwem przegrzewania pewnych partii statecznika (rys. 15.41) przy równoczesnym działaniu dużych sił odśrodkowych. Na podstawie badań stwierdzono (rys. 15.42), że występowanie przegrzań zależy od prędkości lotu oraz wy-



Rys. 15.41. Przeznaczony do prób na stoisku statycznym silnik strumieniowy podczas pracy. Widać nagrzewanie się palców statecznika w okolicy ich połączenia ze stożkiem

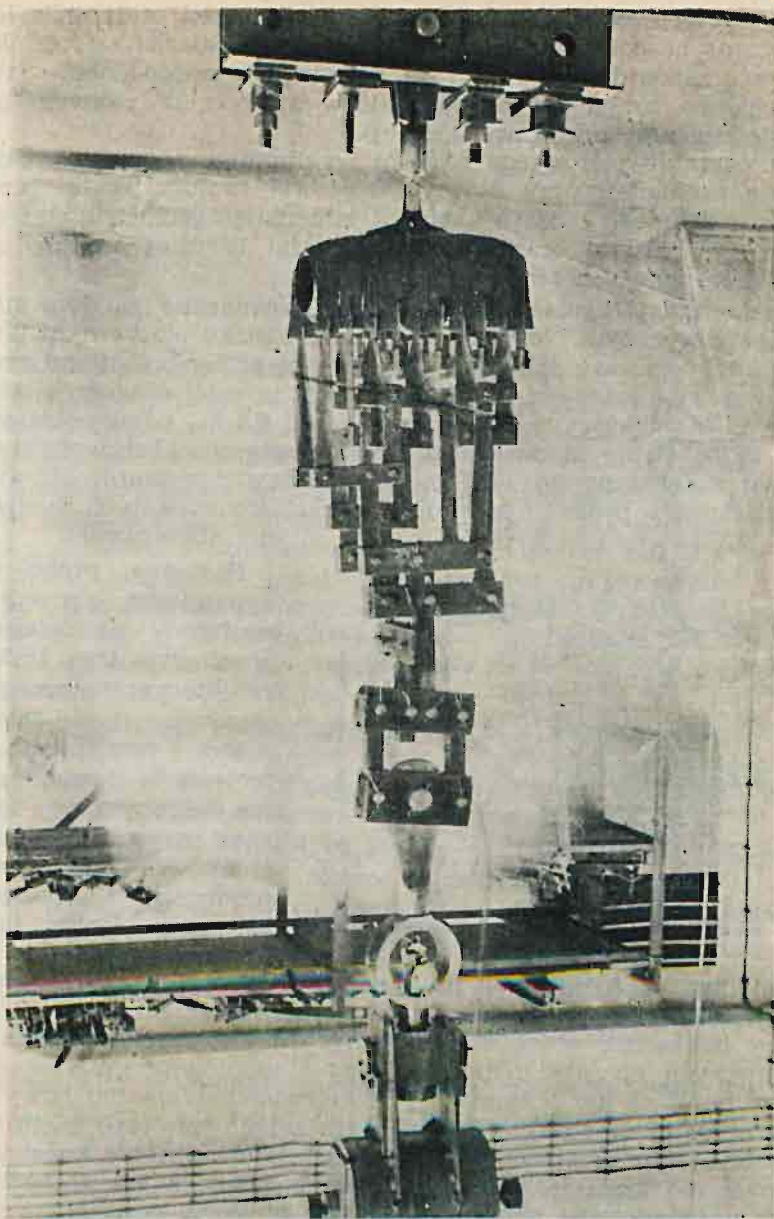


Rys. 15.42. Zakresy pracy silnika, w których występuje przegrzanie statecznika:

1 — bogata granica spalania, 2 — uboga granica spalania; A — pierwszy obszar przegrzania, B — obszar przerzutu płomienia przed statecznik, C — drugi obszar przegrzania

datku paliwa. W polu statecznego spalania (między ubogą i bogatą granicą utrzymywania się płomienia) wydzielono dwa obszary przegrzania stateczników. Pierwszy, występujący w zakresie prędkości  $60 \div 100$  m/s i drugi powyżej 160 m/s (ale tylko w przypadku mieszanek ubogich). Przez pierwszy obszar silnik przechodzi w czasie rozruchu. W obszarze drugim znajduje się, gdy jest niedociążony. Przyczyną przegrzań pierwszego rodzaju





Rys. 15.43. Statyczne stoisko do badania wytrzymałości silnika

jest występowanie przerzutów płomienia przed statecznik lub w obszar bezpośredniego oddziaływania na materiał statecznika.

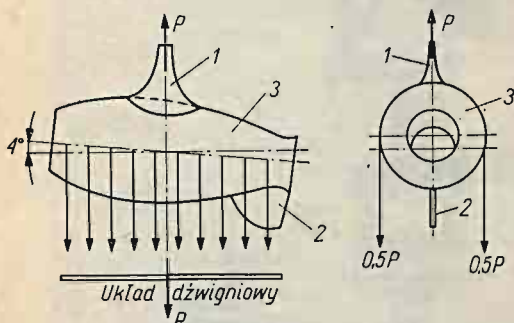
Przegrzania drugiego rodzaju powstają prawdopodobnie jako następstwo braku chłodzenia palców statecznika paliwem (co występuje przy mieszance ubogiej).

Przegrzanie pierwszego rodzaju wyeliminowano przez zwiększenie prędkości, przy której następował zapłon. Skutki przegrzania drugiego rodzaju usunięto, zmieniając geometrię statecznika (rys. 15.37b) oraz stosując materiał bardziej odporny na działanie wysokich temperatur.

Badanie wytrzymałości silnika przeprowadzano na dwu stoiskach: statycznym i dynamicznym. Na stoisku statycznym (rys. 15.43) siły masowe działające na powłokę zastąpiono siłami równomiernie rozłożonymi po obu stronach na całej długości silnika (rys. 15.44). Wazący w ostatecznej wersji 6,4 kG silnik obciążono siłą 6720 kG, co odpowiada 1050 g, a następnie obciążenie stopniowo zwiększano do 1790 g. Na podstawie pomiarów średnic silnika przed próbą i po próbie, odkształceń trwałych powłoki

nie stwierdzono.

Następną próbę — dynamiczną, przeprowadzono na stoisku obrotowym (rys. 15.33), w którym normalnie stosowane ramię zastąpiono ramieniem o mniejszym promieniu tak dobranym, aby uzyskać przyspieszenie dośrodkowe 1790 g przy prędkości obrotowej 220 m/s. Próba dała wynik pozytywny.



Rys. 15.44. Schemat obciążenia powłoki silnika:

1 — uchwyt, 2 — statecznik, 3 — powłoka silnika

Obydwa przedstawione tu przykłady dotyczą urządzeń choć stosunkowo nowych, to jednak bardzo prostych. Mimo to wkład pracy badawczej w ich realizacji był duży (w przeglądzie prac badawczych nie uwzględniono pracy technologów). Wzrasta on i tym bardziej jest widoczny w urządzeniach tak samo nowych, lecz bardziej skomplikowanych. Nieuwzględnienie tego faktu we wszelkich zamierzeniach realizatorskich o charakterze konstrukcyjnym nie może zakończyć się powodzeniem. Wiara pozbawionych doświadczenia konstruktorów, że da się tu coś ominąć lub przeskoczyć, jest oparta wyłącznie na przesłankach irracjonalnych i musi doprowadzić do rozczerowań.

## OPRACOWANIE WYNIKÓW BADANIA

Ukoronowaniem pracy eksperymentatora jest sprawozdanie, opracowane najlepiej od razu w postaci nadającej się do druku. Trzon takiego sprawozdania stanowi opis metody badania, analiza wyników pomiarów oraz wynikające z tej analizy wnioski.

**Analiza wyników pomiaru.** Wskutek niedoskonałości przyrządów pomiarowych, którymi się posługujemy, jak również wskutek niedoskonałości organów zmysłów, biorących udział w obserwacjach, wszystkie pomiary mogą być dokonywane tylko z pewnym określonym stopniem dokładności. W związku z tym przyjęto zapisywać wyniki pomiarów w liczbach dziesiętnych w ten sposób, że cyfra przedostatnia może uchodzić jeszcze za pewną, a tylko ostatnia jest obciążona błędem.

Niedokładności pomiarów wynikające z błędów systematycznych mogą być wyrównane przez wprowadzenie poprawek. Na przykład do odczytu różnicy ciśnień wyrażonej w mm słupa Hg dla hydrostatycznego manometru rtęciowego (np. rys. 12.4) należy przy bardzo dokładnych pomiarach wprowadzić następujące poprawki:

— *poprawkę na zmianę temperatury pomiaru w stosunku do temperatury odniesienia rtęci i skali*

$$\Delta h_1 = \frac{(0,000182 - a) (t - t_0)}{1 + 0,000182 t} h$$

gdzie:  $a$  — współczynnik rozszerzalności liniowej materiału skali (0,000019 dla mosiądzu i 0,000008 dla szkła);

$t$  — temperatura, przy której wykonano pomiar;

$t_0$  — temperatura odniesienia skali;

$h$  — wysokość pomierzona.

Temperatura odniesienia rtęci wynosi tu 0°C.



— poprawkę na włoskowatość w rurkach

$$\Delta h_2 = + \left( \frac{6,45}{d} - \frac{1}{6} d \right) \text{ [mm]}$$

gdzie:  $d$  — średnica rurki w mm;

— poprawkę na ściśliwość rtęci

$$\Delta h_3 = \frac{1}{2} \kappa p^2$$

gdzie:  $\kappa = 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{kG}$  — współczynnik ściśliwości rtęci,  
 $p$  (w  $\text{kG}/\text{cm}^2$ ) — ciśnienie mierzone;

— poprawkę na zmianę przyspieszenia ziemskiego w stosunku do przyspieszenia ziemskiego normalnego, wynoszącego  $980,665 \text{ cm/s}^2$

$$h_4 = (g/980,665 - 1)h$$

gdzie:  $g$  — przyspieszenie ziemskie w danym miejscu (np. 981,24 dla Warszawy);

— poprawkę uwzględniającą ciężar płynu przekazującego ciśnienie z punktów pomiarowych na menniski rtęci po obu stronach manometru hydrostatycznego.

Pozbawione błędów systematycznych na skutek wprowadzenia poprawek wyniki pomiarów tworzą ciąg wartości przybliżonych  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , które są w pewien sposób skupione dokoła dokładnej wartości  $a$ . Wartość ta jest nieznana i naszym zadaniem jest na podstawie uzyskanych wyników znaleźć jej możliwie najlepsze przybliżenie. Zagadnienie to wymaga stosowania pojęć i twierdzeń rachunku prawdopodobieństwa oraz przyjęcia pewnych założeń.

Podstawowe założenie, które się tu przyjmuje, polega na tym, że pomiary  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , traktowane jako zmienne losowe, powinny mieć wszystkie ten sam rozkład prawdopodobieństwa

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}$$

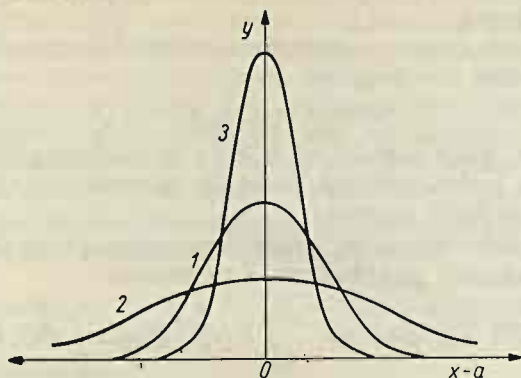
gdzie:  $a$  — dokładna wartość wielkości mierzonej;  
 $\sigma$  — odchylenie standartowe.

Odchyleniem standartowym nazywamy wielkość

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x-a)^2}{n}}$$

która jest miarą dokładności pomiarów. Przy większej dokładności a więc przy mniejszym  $\sigma$  otrzymamy więcej błędów bliskich

zera i mniej błędów większych (krzywa błędów, rys. 16.1 — będzie bardziej stroma).



Rys. 16.1. Krzywe rozkładu błędów przypadkowych:

1 —  $\sigma = k$ , 2 —  $\sigma = 2k$ , 3 —  $\sigma = 0,5k$

Opierając się na takim założeniu można wykazać, że przy dowolnej wartości liczby pomiarów o jednakowej dokładności  $n \geq 2$  wielkość

$$t = \frac{\bar{x} - a}{S\bar{x}}$$

ma jako funkcję gęstości rozkładu prawdopodobieństwa wyrażenie

$$S(t, k) = \frac{\Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right)}{\sqrt{k\pi} \Gamma\left(\frac{k}{2}\right)} \left(1 + \frac{t^2}{k}\right)^{-\frac{k+1}{2}}$$

gdzie:  $k = n - 1$  — parametr rozkładu;

$S\bar{x} = \frac{S}{\sqrt{n}}$  — błąd średni kwadratowy średniej arytmetycznej serii pomiarów;

$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$  — błąd średni kwadratowy pomiaru pojedynczego określony na podstawie serii pomiarów;

$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$  — średnia arytmetyczna serii pomiarów, uważana za przybliżoną wartość, wartości dokładnej  $a (\bar{x} \approx a)$ .

Powyższe wyrażenie przedstawia gęstość prawdopodobieństwa w rozkładzie o nieznanym odchyleniu standardowym, tzw. rozkładzie Studenta.

Pozwala ono zupełnie dokładnie rozwiązać zagadnienie prawdopodobieństwa nierówności

$$-t_a < t < t_a, t_a > 0$$

dla danego  $t_a$ , przy dowolnym  $n \geq 2$  i dowolnym odchyleniu standardowym  $\sigma$  podstawowego rozkładu normalnego, któremu podlegają poszczególne pomiary.

Prawdopodobieństwo to, które oznaczymy przez  $\alpha$  i nazywamy poziomem ufności, znajdujemy z równania

$$\alpha = P(-t_a < t < t_a) = \int_{-t_a}^{t_a} S(t, k) dt = 2 \int_0^{t_a} S(t, k) dt$$

Wartości  $t_a$  spełniające powyższą równość znajdują się w załączniku 2 na końcu książki.

Nierówności  $-t_a < t < t_a$  można zapisać jako

$$\bar{x} - t_a S_{\bar{x}} < a < \bar{x} + t_a S_{\bar{x}}$$

lub też oznaczając  $t_a S_{\bar{x}} = \varepsilon$  — w jeszcze prostszej postaci

$$\bar{x} - \varepsilon < a < \bar{x} + \varepsilon$$

Odpowiednio do tych przekształceń otrzymujemy

$$P(\bar{x} - t_a S_{\bar{x}} < a < \bar{x} + t_a S_{\bar{x}}) = \alpha = 2 \int_0^{t_a} S(t, k) dt$$

i

$$P(\bar{x} - \varepsilon < a < \bar{x} + \varepsilon) = \alpha$$

Opierając się na powyższych równaniach, można stwierdzić, że przy dostatecznie dużej liczbie pomiarów  $n$  wartość  $X$  będzie się bezwzględnie różniła od wartości dokładnej  $a$  o dowolnie małą liczbę  $\varepsilon$ . Przyjmując zatem poziom ufności  $\alpha$  można określić granice  $\bar{x} - \varepsilon$  i  $\bar{x} + \varepsilon$  zwane granicami ufności, a tym samym i przedział  $(\bar{x} - \varepsilon, \bar{x} + \varepsilon)$ , tzw. przedział ufności. Odwrotnie, przyjmując z góry dokładność  $\varepsilon > 0$  można określić odpowiadający jej poziom ufności  $\alpha$  przybliżonej równości  $\bar{x} \approx a$ .

Oprócz tych zagadnień istotnymi w teorii błędów są dwa następujące problemy:

- oszacowanie pomiarów „wyskakujących”,
- wymagana ilość pomiarów dla znalezienia niewiadomej wartości wielkości mierzonej.



Rozwiązanie pierwszego z tych problemów polega na znalezieniu odpowiedzi na pytanie, czy błąd pomiaru „wyskakującego” jest błędem przypadkowym i wobec tego należy go uwzględnić przy ocenie wartości wielkości mierzonej, czy też jest błędem grubym i należy go odrzucić. Niech  $x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}$  będą wartościami pomiarów wielkości  $a$  i podlegają rozkładowi normalnemu, przy czym jeden z pomiarów jest „wyskakujący”. Określmy prawdopodobieństwo, że błąd tego pomiaru jest przypadkowy.

Założmy, że te  $n+1$  pomiarów wykonano w dwu seriach  $n_1$  i  $n_2$  otrzymując odpowiednie średnie arytmetyczne serii  $\bar{x}_1$  i  $\bar{x}_2$ . W tym przypadku średni błąd określa równość

$$S_\delta = \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2}} \sqrt{\frac{\Sigma (x_1 - \bar{x}_1)^2 + \Sigma (x_2 - \bar{x}_2)^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

Natomiast wyrażenie

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_\delta}$$

podlega rozkładowi Studenta z parametrem rozkładu

$$k = n_1 + n_2 - 2$$

Przyjmując, że w pierwszej serii dokonano  $n$  pomiarów, zaś w drugiej 1 pomiar, otrzymujemy

$$S_\delta = \sqrt{\frac{n+1}{n}} S$$

Wielkość  $t = \frac{x_{n+1} - \bar{x}}{S}$  podlegać będzie rozkładowi Studenta o gęstości  $S(t, n-1)$ . Prawdopodobieństwo bezwzględnego odchylenia  $x_{n+k}$  od  $\bar{x}$  o wartość  $\varepsilon$  wynosi

$$P[(x_{n+1} - \bar{x}) \geq \varepsilon] = 2 \int_{\varepsilon/S_\delta}^{\infty} S(t, n-1) dt = \beta$$

Jeśli przyjąć

$$t'_\beta = t_\beta \sqrt{\frac{n+1}{n}} = \frac{\varepsilon}{S}$$

to w przypadku, gdy zachodzi nierówność

$$\frac{x_{n+1} - \bar{x}}{S} \geq t'_\beta$$

odchylenie „wyskakujące” można uznać za nieprzypadkowe przy założonym dostatecznie małym poziomie ufności  $\beta$ .

Wartości  $t'_\beta$  zostały stabelaryzowane. Można je odczytać dla założonego prawdopodobieństwa  $\beta$  i określonej liczby pomiarów  $n$  z tablicy w załączniku 3.

Drugi problem, a mianowicie ustalenie wystarczającej liczby pomiarów  $n$  w celu otrzymania przybliżonej wartości  $x$  wielkości mierzonej o wymaganej dokładności  $\varepsilon$  i poziomie ufności  $\alpha$  rozwiązuje się w następujący sposób. Prawdopodobieństwo odchylenia wartości  $\bar{x}$  od wartości dokładnej  $a$  wynosi

$$P(-t_\alpha S_{\bar{x}} < \bar{x} - a < t_\alpha S_{\bar{x}}) = \int_0^{t_\alpha} S(t, k) dt = \alpha$$

gdzie dokładność

$$\varepsilon = t_\alpha S_{\bar{x}} = \frac{t_\alpha}{\sqrt{n}} S$$

Z zależności tych wynika, że można twierdzić z prawdopodobieństwem  $\alpha$ , iż bezwzględne odchylenie średniej  $\bar{x}$  z  $n$  pomiarów różnić się może od wartości prawdziwej  $a$  nie więcej niż

$$\frac{t_\alpha}{\sqrt{n}} = q_\alpha$$

średnich błędów pojedynczego pomiaru  $S$ . Wartość  $t_\alpha$  dla przyjętego prawdopodobieństwa  $\alpha$  i złożonej wartości  $n$  odczytuje się z tablic Studenta-Fishera (załącznik 2), następnie określa się  $q_\alpha$  z powyższej zależności i porównuje wynik z wartością  $q_\alpha$  podaną w tablicy (załącznik 4). W ogólnym przypadku wartości te są różne, rachunek dokonuje się więc metodą kolejnych przybliżeń, w wyniku których zostanie określona wartość  $n$ . Ze stabelaryzowanych w załączniku 4 wartości  $q_\alpha$  (zależnych od  $n$  i  $\alpha$ ) można wyciągnąć ważny wniosek, że dla osiągnięcia większej dokładności wyniku pomiarów należy bardziej troszczyć się o dokładność poszczególnych pomiarów (zmniejszyć  $S$ ) niż o ich liczbę, ponieważ wymagana liczba pomiarów  $n$  rośnie bardzo szybko, gdy zmniejsza się  $q_\alpha$  i zwiększa ufność  $\alpha$ .

**Przykład.** Wykonano pomiar prędkości strumienia powietrza w osi przewodu za pomocą rurki Prandtla. Wyniki pomiarów są podane w tablicy 16.1. Należy:

- ocenić pomiary „wyskakujące”;
- określić wartość mierzonej prędkości;
- sprawdzić, czy ilość pomiarów jest wystarczająca, aby błąd był na poziomie ufności  $\alpha = 0,95$ ;
- obliczyć granice przedziału ufności dla powyższego poziomu.

Wyniki pomiarów prędkości strumienia w m/s

Lp.	$X$	$X_i - \bar{X}$	$(X_i - \bar{X})^2$
1	110,0	0	0
2	110,5	0,5	0,25
3	109,5	-0,5	0,25
4	114,0*	4,0	16,0
5	110,5	0,5	0,25
6	111,0	1,0	1,0
7	109,5	-0,5	0,25
8	109,0	-1,0	1,0

Ocena pomiaru „wyskakującego”. Pewną wątpliwość co do przypadkowego pochodzenia błędu budzi pomiar oznaczony gwiazdką ( $x_4 = 114,0$ ); wartość tego pomiaru zostanie oszacowana przy założeniu poziomu ufności błędu przypadkowego  $\beta = 0,05$ . Błąd średni pojedynczego pomiaru bez uwzględnienia pomiaru wyskakującego wynosi

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} = 0,7071$$

Odchylenie wartości rozpatrywanego pomiaru ( $x_4$ ) od średniej arytmetycznej pozostałych pomiarów jest

$$\frac{x_{n+1} - \bar{x}}{S} = \frac{114 - 110}{0,7071} = 5,657$$

Z tabeli w załączniku 3 dla  $n = 7$  i  $\beta = 0,05$ ,  $t'_\beta = 2,616$ . Dokładność  $\varepsilon$  wynosi zatem

$$\varepsilon = t'_\beta S = 2,616 S \approx 1,82$$

A więc prawdopodobieństwo bezwzględnego odchylenia wartości mierzonej o  $\varepsilon > 2,616S$  jest mniejsze niż 0,05, czyli wartość  $x = 114$  nie mogła być otrzymana wskutek błędu przypadkowego. Z tego powodu pomiar ten odrzucamy.

Określenie wartości mierzonej prędkości

$$a \approx \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = 110 \text{ m/s}$$



Ocena niezbędnej ilości pomiarów, którą należy wykonać, aby  $q_\alpha$  było na poziomie ufności  $\alpha = 0,95$ .

Dla  $n = 7$  i  $\alpha = 0,95$  z tablicy w załączniku 2,  $t_\alpha = 2,447$ . Stąd

$$q_\alpha = \frac{t_\alpha}{\sqrt{n}} = \frac{2,447}{\sqrt{7}} = 0,9251$$

W tablicy w załączniku 4 jest  $q_\alpha = 1,0$

Ale już dla  $n = 6$  i  $\alpha = 0,95$ ,  $t_\alpha = 2,571$  i

$$q_\alpha = \frac{2,571}{\sqrt{6}} = 1,05$$

Jest to więc więcej niż wartość tablicowa, a zatem należało wykonać właśnie 7 pomiarów.

Obliczenie granic przedziału ufności dla poziomu  $\alpha = 0,95$ .

Błąd średniej arytmetycznej

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0,7071}{\sqrt{7}} = 0,2672$$

Odchylenie  $\varepsilon$  wynosi

$$\varepsilon = t_\alpha S_{\bar{x}} = 2,447 \cdot 0,2672 = 0,6538$$

A zatem z prawdopodobieństwem  $\alpha = 0,95$  można stwierdzić, że wartość prędkości zawiera się w granicach

$$109,4462 < a < 110,6538$$

Powyższe rozważania dotyczyły pomiarów bezpośrednich. W praktyce spotykamy się jednak najczęściej z pomiarami pośrednimi. W tym przypadku, podobnie jak i przy pomiarach bezpośrednich, wartość wielkości mierzonej określamy zazwyczaj jako wartość średniej arytmetycznej szeregu pomiarów. Błąd wyniku obliczamy na podstawie błędów poszczególnych pomiarów wielkości składowych, od których zależy mierzona wielkość.

Jeśli wielkość ta (np.  $A$ ) dana jest jako funkcja wielkości  $L_1, L_2 \dots L_k$

$$A = f(L_1, L_2 \dots L_k)$$

przy czym błędy średnie kwadratowe pomiarów poszczególnych wielkości  $L_1, L_2 \dots L_k$  wynoszą odpowiednio  $S_1, S_2 \dots S_k$ , to można wykazać, że średni błąd kwadratowy  $A$  wynosi

$$S_A = \pm \sqrt{\Delta A_1^2 + \Delta A_2^2 + \dots \Delta A_k^2}$$

gdzie

$$\Delta A_1 = \frac{\partial A}{\partial L_1} S_1; \quad \Delta A_2 = \frac{\partial A}{\partial L_2} S_2 \dots \Delta A_k = \frac{\partial A}{\partial L_k} S_k$$

oznaczają błędy cząstkowe pomiarów pośrednich.

**Wzory doświadczalne.** Uporządkowane i w określony sposób usystematyzowane wyniki pomiarów układu się w tablice. Tablice te następnie służą jako podstawa do opracowania graficznego, które wyraźniej ilustruje przebieg badanych zależności. Najprostszą postacią matematycznego opisu zjawisk fizycznych jest funkcja dwu zmiennych

$$y = f(x)$$

Graficznym przedstawieniem takiej funkcji bywa najczęściej krzywa w prostokątnym układzie współrzędnych. Ponieważ współrzędne punktów doświadczalnych obarczone są błędami przypadkowymi, więc punkty te nie leżą nigdy na określonej krzywej o najbardziej prawdopodobnej postaci (przy założeniu regularności przebiegu zjawiska). Gdy nie zależy nam na dużej dokładności, postać krzywej dobieramy „na oko”, prowadząc ją „płynnie” za pomocą krzywek między naniesionymi na wykres punktami. Matematyczny opis krzywej uzyskamy przystosowując w tym celu odpowiedni wielomian  $n$ -tego stopnia

$$y = a + bx + cx^2 + \dots + mx^n$$

Stałe w równaniu wyznaczamy, posługując się którymś ze wzorów interpolacyjnych, np. wzorem Lagrangea:

$$\begin{aligned} y = & y_0 \frac{(x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_n)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2) \dots (x_0 - x_n)} + \\ & + y_1 \frac{(x - x_0)(x - x_2) \dots (x - x_n)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2) \dots (x_1 - x_n)} + \\ & + y_{n-1} \frac{(x - x_0) \dots (x - x_{n-2})(x - x_n)}{(x_{n-1} - x_0) \dots (x_{n-1} - x_{n-2})(x_{n-1} - x_n)} + \\ & + y_n \frac{(x - x_0) \dots (x - x_{n-2})(x - x_{n-1})}{(x_n - x_0) \dots (x_n - x_{n-2})(x_n - x_{n-1})} \end{aligned}$$

gdzie  $x_0, x_1, x_2 \dots x_n$  oraz  $y_0, y_1, y_2 \dots y_n$  współrzędne punktów dowolnie wybranych na krzywej doświadczalnej.

*Przykład.* Znaleźć wielomian, który w punktach  $x = -2, 1, 2, 4$  przyjmuje wartości  $y = 4, 2, -1, 10$ .

Stosując powyższy wzór interpolacyjny otrzymuje się

$$y = 4 \frac{(x-1)(x-2)(x-4)}{(-2-1)(-12-2)(-2-4)} + 2 \frac{(x+2)(x-2)(x-4)}{(1+2)(1-2)(1-4)} +$$

$$-1 \frac{(x+2)(x-1)(x-4)}{(2+2)(2-1)(2-4)} + 10 \frac{(x+2)(x-1)(x-2)}{(4+2)(4-1)(4-2)} =$$

$$= \frac{41}{72}x^3 - \frac{83}{72}x^2 - \frac{127}{36}x + \frac{55}{9}$$

Ilość wyrazów w wielomianie określa się następująco. Wybieramy szereg wartości zmiennej niezależnej  $x$ , tworzących postępowanie arytmetyczne, czyli spełniających warunek

$$x_{i+1} - x_i = \Delta x = \text{const}$$

Następnie układamy tablicę różnic funkcji, obliczając kolejno:  
— pierwsze różnice funkcji

$$\Delta y_1 = y_{i+1} - y_i,$$

— drugie różnice funkcji

$$\Delta^2 y_i = \Delta y_{i+1} - \Delta y_i,$$

— trzecie różnice

$$\Delta^3 y_i = \Delta^2 y_{i+1} - \Delta^2 y_i$$

itd.

Jeżeli wszystkie liczby jednej z kolumn, zawierającej różnice  $n$ -tego rzędu, osiągną niemal jednakowe wartości, wówczas zaprzestajemy dalszego obliczania różnic; oznacza to bowiem, że wielomian  $n$ -tego stopnia wyraża poszukiwaną zależność z dostateczną dokładnością.

*Przykład.* W tablicy 16.2 (kolumna 2) podano ciepło właściwe wody w temperaturze  $t$  (kolumna 1) oraz obliczone różnice pierwszego i drugiego rzędu funkcji  $c = f(t)$ . Ponieważ różnice drugiego rzędu są w przybliżeniu stałe, więc zależność  $c$  od  $t$  można dostatecznie dokładnie wyrazić za pomocą wielomianu drugiego stopnia

$$c = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$$

Gdy wymagania dotyczące dokładności położenia krzywej w stosunku do naniesionych w układ współrzędnych punktów doświadczalnych są szczególnie duże, wtedy postępujemy następująco:

Wartości ciepła właściwego wody  $c$  w funkcji temperatury  $t$ 

$t$	$c$	$\Delta c$	$\Delta^2 c$
5	1,0029	-16	3
10	1,0013	-13	3
15	1,0000	-10	3
20	0,9990	- 7	3
25	0,9983	- 4	3
30	0,9979	- 1	4
35	0,9978	3	3
40	0,9981	6	3
45	0,9987	9	
50	0,9998		

— wybieramy równanie krzywej najlepiej pasującej do układu punktów doświadczalnych;

— sprawdzamy możliwość zastosowania wybranego równania metodą prostowania wykresów funkcji (anamorfozy);

— obliczamy parametry przyjętego równania. Wyboru równania krzywej dokonujemy albo na podstawie teoretycznej analizy badanej zależności, albo przez dopasowanie któregoś z typowych wykresów funkcji do naniesionych w układ współrzędnych punktów doświadczalnych. Takie typowe wykresy są zebrane w załączniku 5. Możliwość zastosowania wybranego równania potwierdzamy, posługując się metodą prostowania wykresów funkcji. Metoda ta polega na przekształceniu funkcji  $y = \varphi(x)$  na funkcję liniową. Uzyskujemy to przez zastąpienie zmiennych  $x$  i  $y$  zmiennymi  $X = \psi(x, y)$  i  $Y = \zeta(x, y)$ , które dobieramy tak, aby otrzymać równanie linii prostej

$$Y = A + BX$$

Prowadzi to do zastąpienia podziałek na osiach układu współrzędnych odpowiednio dobranymi skalami funkcyjnymi.

Po obliczeniu wartości  $X_i$  i  $Y_i$  według danych doświadczalnych  $x_i$  i  $y_i$  zaznaczamy je na wykresie w układzie prostokątnym  $(X, Y)$ . Jeśli tak naniesione na wykres punkty leżą na linii prostej (lub są wzdłuż tej linii równomiernie rozrzucone, co zależy od dokładności pomiarów), to wybrany wzór empiryczny  $y = \varphi(x)$  jest odpowiedni dla wyrażenia badanej zależności.



*Przykład.* Przy badaniu szybkości pewnej reakcji chemicznej otrzymano wyniki przedstawione w tablicy 16.3 ( $\tau$  — oznacza czas od początku doświadczenia,  $y$  — ilość reagującej substancji w mieszaninie w chwili  $\tau$ ). Dane doświadczalne są przedstawione

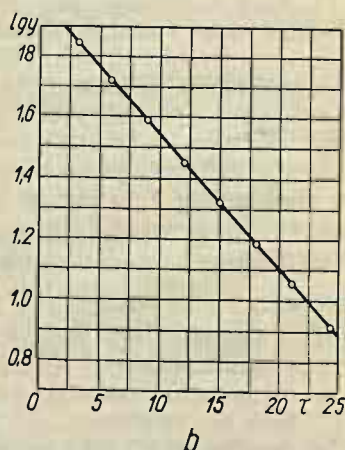
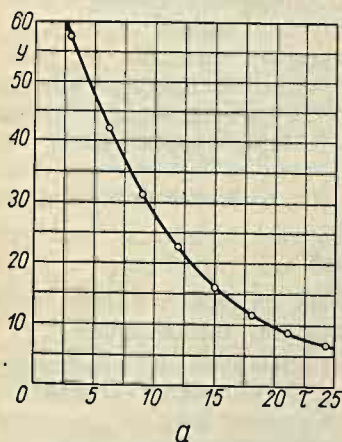
Tablica 16.3

Dane do przykładu

$\tau$	$y$	$\lg y$
3	57,6	1,7604
6	41,9	1,6222
9	31,0	1,4912
12	22,7	1,3560
15	16,6	1,2201
18	12,2	1,0864
21	8,9	0,9494
24	6,5	0,8129

na wykresie (rys. 16.2a). Zakładając, że reakcja jest jednocząsteczkowa, należy sprawdzić możliwość zastosowania do jej matematycznego opisu równania

$$y = ae^{b\tau}$$



Rys. 16.2. Wykres funkcji wykładniczej:

a — układ współrzędnych o stałej podziałce, b — układ współrzędnych z rzędną logarytmiczną

Aby wyprostować wykres, tj. aby otrzymać funkcję liniową, logarytmujemy wybrane równanie, otrzymując

$$\lg y = \lg a + \frac{b}{2,303} \tau$$

Następnie obliczamy wartości  $\lg y$  i nanosimy otrzymane punkty w układzie współrzędnych  $\lg y - \tau$ . Wykres (rys. 16.2b) wskazuje, że punkty te leżą wzdłuż linii prostej, co dowodzi, że wzór

$$y = a e^{b\tau}$$

został zastosowany prawidłowo oraz potwierdza założenie, że reakcja jest jednocząsteczkowa. Po ustaleniu, czy wybrane równanie nadaje się do wyrażenia badanej zależności, przystępujemy do określenia liczbowych wartości parametrów tego równania. Często można w tym celu użyć wykresu, ponieważ dla równania liniowego jego parametry ustala nachylenie prostej oraz punkty przecięcia z osiami współrzędnych.

*Przykład.* Ciśnienie gazu  $p$  i jego objętość  $v$  są podczas przemiany izentropowej związane równaniem

$$pv^\kappa = \text{const}$$

Na podstawie pięciu obserwacji

$p$ [kG/cm <sup>2</sup> ]	1,1	1,5	2,0	2,5	3,0
$v$ [litry]	0,95	0,75	0,62	0,52	0,47

należy wyznaczyć parametry równania.

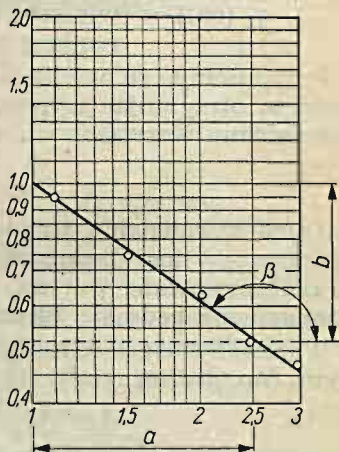
Wykres funkcji potęgowej w postaci zlinearyzowanej uzyskamy przedstawiając ją w układzie współrzędnych logarytmicznych (rys. 16.3). Przekształcając równanie izentropy, otrzymujemy

$$v = A p^{-\frac{1}{\kappa}}$$

lub po zlogarytmowaniu

$$\lg v = \lg A - \frac{1}{\kappa} \lg p$$

Parametry tego równania wyznaczamy następująco:



Rys. 16.3. Wykres funkcji potęgowej w układzie logarytmicznym

— wykładnik potęgowy z zależności

$$-\frac{1}{z} = \frac{\lg v - \lg A}{\lg p} = -\frac{b}{a} = -0,71$$

gdzie  $b$  i  $a$  są długościami odcinków mierzonych wprost na rys. 16.3;

— współczynnik  $A$  odczytując jego wartość na przecięciu prostej z rzędną odpowiadającą  $p = 1$ . Stąd

$$A = 1$$

$A$  więc równanie izentropy dla badanego gazu otrzymuje następującą postać

$$v = p^{-0.71} \text{ lub } pv^{1.41} = 1$$

W przypadku zaistnienia potrzeby dokładniejszego wyznaczenia parametrów równań doświadczalnych korzystamy z metod numerycznych.

Najdokładniejszą metodą numeryczną jest metoda najmniejszych kwadratów. Pozwala ona na takie ukształtowanie wybranej funkcji, aby różnice między wartościami funkcji i wartościami zmierzonymi doświadczalnie spełniały warunek

$$\Sigma d_i^2 = \min$$

gdzie:  $d_i = y_i - y_i(\text{obl})$ ,

$y_i$  = wielkość zmierzona,

$y_i(\text{obl})$  = wielkość obliczona za pomocą przyjętego równania w postaci ostatecznej.

Przypuśćmy, że wielkość  $y$  badano jako funkcję innej wielkości  $x$ , otrzymując wyniki  $f_1, f_2 \dots f_n$ . Wielkości te związane są równaniami warunkowymi o postaci

$$y_i = f(x_i, A, B \dots) \quad [16.1]$$

Jeżeli w równaniu jest  $m$  stałych ( $A, B \dots$ ) przy czym  $m < n$  (gdzie  $n$  — ilość będących w dyspozycji wartości zmiennej  $y$ ), to zaobserwowane wartości  $y$  ze względu na przypadkowe błędy pomiaru nie będą się zgadzały z wartościami obliczonymi.

Wartości stałych określamy początkowo metodami przybliżonymi (np. graficznymi), tak że

$$A = A_0 + a, B = B_0 + a, \text{ itd.}$$

gdzie:  $A_0, B_0 \dots$  — przybliżone wartości stałych;

$A, B \dots$  — dokładne wartości stałych;

$a, b \dots$  — poprawki.

Wówczas równanie [16.1]

$$f_i(A, B \dots) = y_i - d_i$$

można napisać (odrzucając pochodne wyższych rzędów) w postaci

$$f_i(A_0, B_0, \dots) + a \frac{\partial f_i}{\partial A_0} + b \frac{\partial f_i}{\partial B_0} + \dots = y_i - d_i \quad [16.2]$$

Oznaczając

$$\frac{\partial f_i}{\partial A_0} = u_i, \quad \frac{\partial f_i}{\partial B_0} = v_i$$

oraz

$$y_i - f_i(A_0, B_0 \dots) = F_i$$

przedstawiamy równanie [16.2] jako

$$u_i a + v_i b + \dots - F_i + d_i = 0$$

gdzie  $u_i, v_i \dots$  oraz  $F_i$  — znane,

$a, b \dots$  oraz  $d_i$  — niewiadome.

Ponieważ chcemy, by spełniony był warunek

$$\sum_{i=1}^n d_i^2 = \min$$

musimy więc żądać, by wyrażenie

$$\sum_{i=1}^n (u_i a + v_i b + \dots - F_i)^2 = \varphi(a, b)$$

miało wartość minimalną, czyli aby

$$\frac{\partial \varphi}{\partial a} = 2 \sum (u_i a + v_i b + \dots - F_i) u_i = 0$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial b} = 2 \sum (u_i a + v_i b + \dots - F_i) v_i = 0$$

Równań tych zwanych równaniami normalnymi jest tyle, ile niewiadomych.

Bardzo często przyjmując, że zależność  $y$  od  $x$  jest wielomianem, można wprowadzić pewne uproszczenia metody. W tym przypadku równania warunkowe będą miały postać

$$A + Bx_i + Cx_i^3 + \dots = y_i \quad [16.3]$$

Równania normalne z tych równań, tworzy się następująco:

— każde z równań [16.3] mnożymy przez współczynnik przy pierwszej niewiadomej (przez jedność, ponieważ niewiadomą jest  $A$ ) i dodajemy otrzymane  $n$  równań;



— mnożymy każde równanie przez współczynnik przy następnej niewiadomej (przez  $x_i$ ) i dodajemy te równania;

— postępujemy w ten sposób dalej tak długo, aż każde równanie będzie pomnożone przez współczynniki przy wszystkich niewiadomych.

Uzyskany w ten sposób układ równań normalnych rozwiązujemy jedną ze znanych metod rozwiązywania równań liniowych.

*Przykład.* Określono doświadczalnie wartości stałej szybkości reakcji  $k$  w sześciu różnych temperaturach  $t$  (tabl. 16.4). Zależność stałej szybkości reakcji od temperatury bezwzględnej  $T$  wyraża się funkcją wykładniczą

$$k = k_0 e^{-\frac{E}{RT}}$$

Tablica 16.4

Zależność stałych szybkości reakcji od temperatury

$k$	$t$	$\ln k$	$\frac{1}{T}$	$\left(\frac{1}{T}\right)^2$	$\frac{1}{T} \ln k$
3,23	400	1,1725	$1,486 \cdot 10^{-3}$	$2,208 \cdot 10^{-6}$	$1,742 \cdot 10^{-3}$
7,80	452	2,0541	$1,379 \cdot 10^{-3}$	$1,902 \cdot 10^{-6}$	$2,833 \cdot 10^{-3}$
15,43	493	2,7363	$1,306 \cdot 10^{-3}$	$1,706 \cdot 10^{-6}$	$3,574 \cdot 10^{-3}$
24,21	528	3,1867	$1,248 \cdot 10^{-3}$	$1,558 \cdot 10^{-6}$	$3,977 \cdot 10^{-3}$
37,95	561	3,6362	$1,199 \cdot 10^{-3}$	$1,438 \cdot 10^{-6}$	$4,360 \cdot 10^{-3}$
60,09	604	4,0958	$1,140 \cdot 10^{-3}$	$1,300 \cdot 10^{-6}$	$4,669 \cdot 10^{-3}$
		16,8816	$7,758 \cdot 10^{-3}$	$10,112 \cdot 10^{-6}$	$21,155 \cdot 10^{-3}$

Należy określić najbardziej prawdopodobne wartości parametrów  $k_0$  i  $\frac{E}{R}$ .

Przez logarytmowanie funkcji wykładniczej otrzymujemy równanie liniowe

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E}{R} \frac{1}{T}$$

Zgodnie z liczbą obserwacji wielkości  $k$  możemy ułożyć sześć warunkowych równań typu

$$y_i = A + Bx_i$$

gdzie:  $y_i = \ln k_i$ ,  $A = \ln k_0$ ,  $B = -\frac{E}{R}$ ,  $x_i = \frac{1}{T}$

czyli

$$\ln k_i = \ln k_0 - \frac{E}{R} \frac{1}{T_i}$$

Ponieważ w naszym zagadnieniu występują dwie niewiadome, więc powinniśmy ułożyć dwa równania normalne.

Układ równań normalnych będzie więc następujący:

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E}{R} \frac{1}{T}$$

$$\frac{1}{T} \ln k = \frac{1}{T} \ln k_0 - \frac{E}{R} \left( \frac{1}{T} \right)^2$$

Aby znaleźć liczbowe wartości parametrów, obliczamy wielkości  $\left( \frac{1}{T} \right)^2$  i  $\frac{1}{T} \ln k_i$  oraz sumy tych wielkości (dolny wiersz tabeli 16.4).

Podstawiając otrzymane liczby, układamy następujące równania

$$16,8816 = 6 \ln k_0 = 7,758 \cdot 10^{-3} \frac{E}{R}$$

$$21,155 \cdot 10^{-3} = 7,758 \cdot 10^{-3} \ln k_0 - 10,112 \cdot 10^{-6} \frac{E}{R}$$

Rozwiązując ten układ znajdujemy

$$\frac{E}{R} = 8328 \text{ i } k_0 7,9 \cdot 10^5$$

Nieco mniej dokładnym sposobem obliczania parametrów równań doświadczalnych jest metoda średnich. Można ją stosować w przypadku, gdy równanie, podobnie jak w uproszczonej metodzie najmniejszych kwadratów, jest wielomianem. Dzielimy wtedy pomiary na grupy o ilości równej liczbie nieznanymi stałych, umieszczając, jeśli to jest możliwe, w każdej z grup równą ilość wyników. Podstawiając w ten sposób uporządkowane dane do przyjętego wzoru, otrzymujemy równania, które osobno dodajemy w każdej grupie, tworząc układ o tej samej ilości równań co niewiadomych. Rozwiązując następnie taki układ znajdujemy szukane wartości parametrów równania doświadczalnego.

*Przykład.* Znaleźć parametry równania

$$y = a e^{bx}$$

określającego szybkość reakcji chemicznej według danych zawartych w tabeli 16.3.

Właściwą postać równań warunkowych otrzymamy po zlogarytmowaniu funkcji wykładniczej

$$\lg y_i = \lg a + \frac{b}{2,303} \tau_i$$

Osiem par wartości  $\tau$  i  $\lg y$  wziętych z tabeli 16.3 dzielimy na dwie równe grupy i dla każdej grupy układamy po cztery równania warunkowe, a następnie dodajemy je stronami

$$1,7604 = \lg a + 3 \cdot \frac{1}{2,303} b$$

$$1,2201 = \lg a + 15 \cdot \frac{1}{2,303} b$$

$$1,6222 = \lg a + 6 \cdot \frac{1}{2,303} b$$

$$1,0864 = \lg a + 18 \cdot \frac{1}{2,303} b$$

$$1,4914 = \lg a + 9 \cdot \frac{1}{2,303} b$$

$$0,9494 = \lg a + 21 \cdot \frac{1}{2,303} b$$

$$1,3560 = \lg a + 12 \cdot \frac{1}{2,303} b$$

$$0,8129 = \lg a + 24 \cdot \frac{1}{2,303} b$$

$$I) 6,2300 = 4 \lg a + 30 \cdot \frac{1}{2,303} b$$

$$II) 4,0688 = 4 \lg a + 78 \cdot \frac{1}{2,303} b$$

Rozwiązując układ dwu równań I i II z dwoma niewiadomymi  $a$  i  $b$  znajdujemy

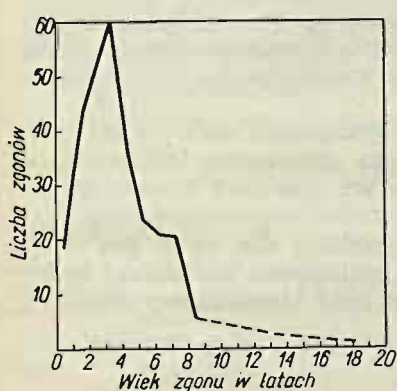
$$a = 78,76 \text{ i } b = 0,1037$$

**Analiza wyników badań statystycznych.** Analiza statystyczna służy do interpretacji wyników badań zjawisk, które podlegają różnym niekontrolowanym lub nawet nieprzewidzianym wpływom czynników ubocznych. Jej zadaniem jest wyeliminowanie tych wpływów w tym sensie, aby można było ustalić rzeczywiste związki między badanymi wielkościami.

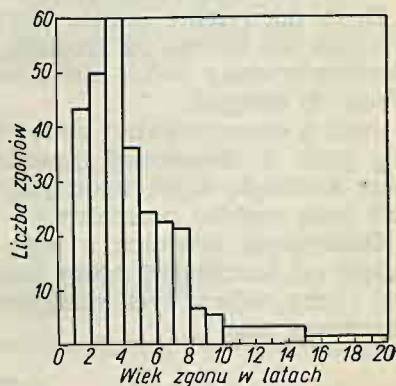
W celu uwydatnienia głównych cech danych statystycznych przedstawia się je w postaci wykresów. Najbardziej poglądowym sposobem takiego przedstawienia jest ujęcie zależności liczbowych jako pewnej krzywej łamanej (rys. 16.4a) lub histogramu (rys. 16.4b), będących ilustracją rozkładu częstości badanej cechy. W obu przypadkach cechę tę oznacza się na osi odciętych, na osi rzędnych natomiast — jej częstość pojawiania się.

Rozkład częstości charakteryzują: wartość przeciętna oraz odchylenie standardowe. Do oszacowania wartości przeciętnej służą: średnia arytmetyczna (nazywana krótko średnią), mediana i moda. Mediana jest wartością środkową, gdy wszystkie obserwacje są uporządkowane w postaci ciągu liczb rosnących, moda natomiast — obserwacją, która pojawia się najczęściej. W przybliżeniu te trzy wartości są związane następującą zależnością

$$\text{moda} = \text{średnia} - 3 (\text{średnia} - \text{mediana}).$$



a



b

Rys. 16.4. Częstość zgonów z powodu błonnicy w zależności od wieku:  
a — krzywa łamana, b — histogram

Równanie powyższe jest ważne jedynie w przypadkach, gdy rozkład częstości niewiele odbiega od rozkładu symetrycznego.

Najczęściej jako wartości przeciętnej używa się średniej arytmetycznej. W przypadku jednak gdy wartość średniej jest nadmiernie zniekształcona przez bardzo duże lub też bardzo małe obserwacje odbiegające od pozostałych, wtedy lepiej jest zastąpić ją medianą. W szeregu normalnym wszystkie wymienione trzy wielkości przeciętne są sobie równe.

Miarą rozproszenia wyników obserwacji statystycznych wokół średniej jest odchylenie standardowe, zdefiniowane jako pierwiastek kwadratowy średniej arytmetycznej kwadratów różnic pomiędzy obserwacjami i ich średnią. Dla małych prób lepiej jest tę wartość pomnożyć przez

$$\sqrt{\frac{n}{n-1}}$$



Ogólnie więc otrzymujemy

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - a)^2}{n - 1}}$$

gdzie:  $\sigma$  — odchylenie standartowe;

$x_i$  — wartości wielkości obserwowanej;

$a$  — średnia arytmetyczna tych wartości;

$n$  — liczebność próby.

Duże odchylenie standartowe wskazuje, że rozkład częstości rozciąga się daleko od średniej, natomiast małe, że jest on ściśle skoncentrowany wokół niej z małymi wahaniami od jednej obserwacji do drugiej.

Jeśli z obserwowanej zbiorowości generalnej wybierzemy szereg prób o określonej liczebności, to otrzymamy odpowiednią ilość średnich, które uporządkowane we właściwy sposób stanowią będą rozkład normalny.

Odchylenia średnich z prób od średniej dla całej populacji zależą od liczebności próby oraz od zmienności osobniczej badanej cechy. Miara tych odchyleń jest błąd standartowy średniej, określony jako

$$S = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

gdzie  $\sigma$  oznacza odchylenie standartowe obserwacji z próby o liczebności  $n$ .

Założenie o rozkładzie normalnym średnich pozwala wyznaczyć prawdopodobieństwo położenia prawdziwej średniej dla całej populacji w stosunku do średniej otrzymanej z próby w granicach określonej wielokrotności błędu standartowego. I tak:

— prawdopodobieństwo, że średnia z próby różni się od prawdziwej średniej nie więcej niż o wartość jednego błędu standartowego jest 0,683;

— prawdopodobieństwo, że średnia z próby różni się od prawdziwej średniej nie więcej niż o wartość dwu błędów standartowych jest 0,955;

— prawdopodobieństwo, że średnia z próby różni się od prawdziwej średniej nie więcej niż o wartość trzech błędów standartowych jest 0,997.

Powyższe stwierdzenie pozwala rozstrzygnąć problem istotności różnicy między dwiema średnimi z prób. Mówi się, że różnica taka jest istotna, to znaczy, że jest ona za duża, aby mogła się łatwo pojawić przypadkowo, gdy rozpatrywane średnie różnią się o więcej niż dwa razy wzięty błąd standartowy takiej różnicy.

Błąd ten określa równanie

$$S_R = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}$$

gdzie:  $\sigma_1, \sigma_2$  — odchylenie standardowe obserwacji w próbach,  
 $n_1, n_2$  — liczebności tych prób.

*Przykład.* Średni wzrost pewnej grupy 6194 Anglików wynosi 171,0 cm, a średni wzrost pewnej grupy 1304 Szkotów 174,0 cm. Odchylenia standardowe wynosiły odpowiednio: 6,5 i 6,3 cm.

Czy Szkoci są przeciętnie wyżsi od Anglików, czy też różnica ta jest dziełem przypadku przy pobieraniu prób?

Znajdujemy kolejno:

— różnica między średnimi [cm]

$$R = 174,0 - 171,0 = 3$$

— błąd standardowy różnicy (w cm)

$$S_r = \sqrt{\frac{6,5^2}{6194} + \frac{6,3^2}{1304}} = 0,193 \text{ cm}$$

— wielokrotność różnicy w stosunku do jej błędu standardowego

$$i = \frac{R}{S_R} = 15,5 > 2$$

Wniosek: jest bardzo nieprawdopodobne, że próby były pobierane z tej samej populacji, innymi słowy, Szkoci są na ogół wyżsi od Anglików.

W wielu przypadkach analizy statystycznej wielkością charakteryzującą daną populację jest częstość względna występowania danej cechy wyrażona w procentach. Częstość względna zmienia się od próby do próby tworząc, podobnie jak średnie z próby, rozkład normalny. Miarą rozproszenia częstości względnych jest ich błąd standardowy

gdzie:  $p$  — odsetek osobników posiadających daną cechę;

$q$  — odsetek osobników nie posiadających danej cechy (oczywiście  $p + q = 100$ );

$n$  — liczebność próby.

Odpowiednio błąd standardowy różnicy między dwiema częstościami względnymi, otrzymanymi z dwu prób, wynosi

$$S_{RC} = \sqrt{\frac{p_1 q_1}{n_1} + \frac{p_2 q_2}{n_2}}$$

*Przykład.* Utworzono dwie grupy po 100 pacjentów: kontrolną, którą leczono w sposób powszechnie praktykowany, i badaną, w której zastosowano leczenie nową metodą. W wyniku leczenia uzyskano w pierwszym przypadku 70% uzdrowień, w drugim zaś 90%. Czy jest prawdopodobne, aby ta różnica zdarzyła się przypadkowo?

Znajdujemy kolejno:

— różnica między częstościami względnymi w grupie badanej i kontrolnej (w%)

$$R_c = 90 - 70 = 20$$

— błąd standartowy różnicy między częstościami względnymi w grupie badanej i kontrolnej (w %)

$$S_{Rc} = \sqrt{\frac{90 \cdot 10}{100} + \frac{70 \cdot 30}{100}} = 5,5$$

— wielokrotność różnicy w stosunku do błędu standartowego

$$i_c = \frac{R_c}{S_{Rc}} = \frac{20}{5,5} = 3,63$$

Podobnie jak poprzednio uznajemy, że różnica jest istotna, gdy  $i_c > 2$ .

Wniosek: jest mało prawdopodobne, że wzrost uzdrowień w grupie badanej był przypadkowy; inaczej mówiąc, nową metodę należy uznać za lepszą od dotychczasowej.

W praktyce statystycznej często powstaje następujący problem. Otrzymujemy drogą doświadczenia pewien rozkład częstości w postaci szeregu

$$c_1, c_2, c_3 \dots c_n$$

różniący się od rozkładu teoretycznego, obliczonego na podstawie pewnej hipotezy

$$c'_1, c'_2, c'_3 \dots c'_n$$

Kiedy wolno nam uznać, że ta rozbieżność jest przypadkowa?

Do rozstrzygnięcia powyższego zagadnienia służy test  $\chi^2$  wprowadzony po raz pierwszy przez Karola Pearsona. Polega on na przeprowadzeniu następujących operacji:

— tworzymy wielkość

$$\chi^2 = \frac{(c_1 - c'_1)^2}{c'_1} + \frac{(c_2 - c'_2)^2}{c'_2} + \dots + \frac{(c_n - c'_n)^2}{c'_n}$$

— obliczamy ilość stopni swobody

$$k = n - t$$

gdzie:  $n$  — liczebność szeregu częstości;

$t$  — liczba warunków spełniona przez częstości zaobserwowane doświadczalnie przy obliczaniu częstości teoretycznych;

— znajdujemy w tablicy (załącznik 6) dla obliczonych wartości  $\chi^2$  oraz  $k$  prawdopodobieństwo  $P$ , że każda przypadkowa próba dać może wartość  $\chi^2$  nie mniejszą od zaobserwowanej. Przyjmuje się na ogół, że gdy  $P$  jest liczbą większą od 0,05, to rozbieżności między rozkładami częstości: teoretycznym i doświadczalnym, można uznać za przypadkowe, a więc i teorię, na podstawie której wyznaczono rozkład teoretyczny, za zgodną z doświadczeniem.

*Przykład.* Doświadczalne pole pszenicy zostało podzielone na 840 kwadratowych pól. Po obliczeniu urodzaju półka zostały podzielone na 14 klas (tabl. 16.5) według zbiorów jednostkowych w G/m<sup>2</sup>. Środki tych klas ( $x$ ) przedstawiono w pierwszej kolumnie. W drugiej kolumnie podano częstości urodzajów na półkach ( $c_x$ ) odpowiadające danym klasom (a więc rozkład częstości otrzymany doświadczalnie). W trzeciej kolumnie ( $c'_x$ ) zamieszczony

Tablica 16.5

Dane do przykładu

$x$	$c_x$	$c'_x$	$c_x - c'_x$	$\frac{c_x - c'_x}{c'_x}$
70	1	0,1		
77	4	0,9	5,0	3,57
84	7	6,0		
91	19	25,2	-6,2	1,53
98	72	73,6	-1,6	0,03
105	141	147,1	-6,1	0,25
112	201	201,9	-0,9	0,00
119	203	189,4	13,7	0,98
126	125	121,2	3,8	0,12
133	54	53,7	0,3	0,02
140	9	16,4		
147	2	3,4	-7,4	2,68
154	1	0,5		
161	1	0,1		



jest rozkład teoretyczny, wynikający z rozkładu normalnego Gaussa, zgodnie z którym częstość  $c'_x$  odpowiadająca wartości  $x$ , jest wyznaczona równaniem

$$c'_x = \frac{c \Delta x}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$$

gdzie:  $\bar{x} = \frac{c_1 x_1 + \dots + c_n x_n}{c_1 + \dots + c_n}$  — średnia arytmetyczna;

$$\sigma = \sqrt{\frac{c_1 (x_1 - \bar{x})^2 + \dots + c_n (x_n - \bar{x})^2}{c_1 + \dots + c_n}} \text{ — odchylenie standardowe;}$$

$x_1 \dots x_n$  — zaobserwowane wartości,

$c_1 \dots c_n$  — częstości tych wartości;

$\Delta x$  — przedział;

$c$  — ilość wszystkich obserwacji.

Dla naszego przykładu

$$x = 7$$

$$c = c_1 + \dots + c_n = 840$$

$$x = 114,32$$

$$\sigma = 11,389$$

stąd prawo Gaussa przybierze postać

$$c'_x = \frac{516,29}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-114,32)^2}{259,42}}$$

Z tego równania zostały obliczone teoretyczne częstości umieszczone w trzeciej kolumnie tabeli 16.5 ( $c'_x$ ). Następnie obliczamy wartość  $\chi^2$ . W celu uproszczenia rachunku redukujemy ilość klas z 14 na 9 (przez połączenie trzech pierwszych i czterech ostatnich klas szeregu częstości doświadczalnych i teoretycznych). W kolumnie czwartej zebrane są różnice między częstościami doświadczalnymi i teoretycznymi, natomiast w kolumnie piątej wartości stosunku kwadratu tej różnicy i częstości teoretycznej. Ostateczny wynik otrzymujemy po dodaniu wartości w kolumnie piątej

$$\chi^2 = 9,18$$

Obliczając teoretyczny rozkład częstości posłużyliśmy się dwiema wielkościami ( $x$  i  $\sigma$ ), do których wyznaczenia użyliśmy wartości doświadczalnych ( $c_1 \dots c_n$ ). A więc w naszym przykładzie  $t = 2$ .

Stąd ilość stopni swobody

$$k = n - t = 9 - 2 = 7$$

Mając  $\chi^2 = 9,18$  i  $k = 7$  otrzymujemy z tabeli (stosując interpolację liniową między  $\chi^2 = 9$  i  $\chi^2 = 10$ )  $P = 0,2412$ . Ponieważ otrzymane prawdopodobieństwo jest większe od  $p = 0,05$ , można uznać, że rozbieżności między  $c_x$  i  $c'_x$  są przypadkowe, tzn. że prawo Gaussa wiernie odtwarza badany rozkład urodzajów pszenicy.

Należy jednak pamiętać przy ostatecznym formułowaniu wniosków, że każdy rezultat badań statystycznych jest tylko jednym z argumentów na korzyść przyjętej hipotezy, ale nie jest jej dowodem.

Odpowiednikiem zależności funkcjonalnej występującej w procesach izolowanych jest w badaniach statystycznych zależność korelacyjna. Zależność korelacyjna polega na tym, że przy założeniu jednej zmiennej otrzymuje się nie wartość dokładną drugiej, lecz tylko jej wartość najbardziej prawdopodobną. Jest ona stopniem pośrednim między jednoznaczną i ścisłą zależnością funkcjonalną a całkowitą niezależnością zmiennych.

Przykładem zależności korelacyjnej może być zależność między zawartością  $Al_2O_3$  i  $SiO_2$  w boksycie z danego pokładu lub liczbą zarejestrowanych zgonów i średnią temperaturą tygodnia. Tę ostatnią zależność przedstawia graficznie wykres na rys. 16.5 zwany wykresem rozrzutu. Jest to przykład najbardziej rozpowszechnionego przypadku korelacji liniowej. Wskaźnikiem określającym stopień liniowej zależności korelacyjnej między badanymi wielkościami jest współczynnik korelacji  $r$ .

Bezwzględna wartość tego współczynnika zawarta jest między 0 i 1. Przy  $r = 0$  zależności nie ma. Przy  $r = 1$  wielkości badane są związane zależnością funkcjonalną. Współczynnik korelacji wyznaczamy z równania

$$r = \frac{\sum x_i y_i}{n \sigma_x \sigma_y}$$

gdzie:  $x_i = X_i - \bar{X}$ ;

$y_i = Y_i - \bar{Y}$ ;

$X_i, Y_i$  — szereg wartości związanych ze sobą zależnością korelacyjną;

$\bar{X}, \bar{Y}$  — średnie arytmetyczne;

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}};$$

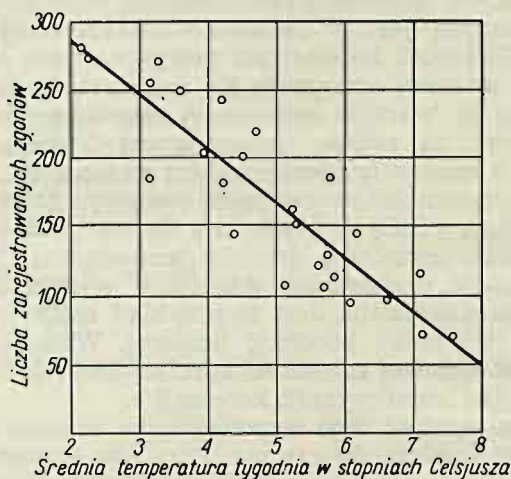
$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n}};$$

$n$  — ilość obserwacji.

Prostą przedstawioną na wykresie rozrzutu (rys. 16.5) nazywamy prostą regresji, a jej równanie równaniem regresji. Ma ono następującą postać

$$Y = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} X$$

gdzie współczynnik kątowy  $r \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$  nazywa się współczynnikiem regresji.



Rys. 16.5. Liczba zarejestrowanych zgonów na zapalenie płuc w Anglii w zależności od średniej temperatury tygodnia

Powyższe równanie jest równaniem prostej regresji  $Y$  względem  $X$ . Równanie to określa najbardziej prawdopodobną wartość  $Y$  dla danej wartości  $X$ . Przy odwrotnym postawieniu zagadnienia, to znaczy przy poszukiwaniu najbardziej prawdopodobnej wartości  $X$  dla danego  $Y$ , równaniem opisującym tę zależność jest równanie  $X$  względem  $Y$  o postaci

$$X = r \frac{\sigma_x}{\sigma_y} Y$$

Proste regresji  $Y$  względem  $X$  i  $X$  względem  $Y$  pokrywają się, gdy  $r = \pm 1$ .

**Przykład.** Surowiec dostarczany z kopalni zawiera dwa użyteczne składniki: minerały A i B. Analizy dziesięciu próbek surowca podane są w tablicy 16.6. Określić równanie regresji B względem A.

Tablica 16.6

**Wyniki analiz próbek surowca**

Nr próbki	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% A	67	54	72	64	39	22	58	43	46	34
% B	24	15	23	19	16	11	20	16	17	13

Oznaczamy procentową zawartość minerału A przez  $X$ , a minerału B przez  $Y$ .

Obliczamy kolejno:

— średnie arytmetyczne wielkości badanych

$$\bar{X} = 49,9 \quad \bar{Y} = 17,4$$

— odchylenia standardowe

$$\sigma_x = 15,09 \quad \sigma_y = 3,93$$

— współczynnik korelacji

$$r = 0,92$$

— współczynnik regresji  $Y$  względem  $X$

$$r = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} = 0,24$$

— równanie prostej regresji

$$Y = 5,42 + 0,24 X$$

Obliczony współczynnik korelacji  $r = 0,92$  jest bliski jedności, co wskazuje na istnienie ścisłej zależności między zawartością minerałów A i B w surowcu.

**Opracowanie sprawozdania z badań eksperymentalnych.** „Fizyka — to eksperymentowanie i ogłaszanie wyników”. Tak kiedyś określił fizykę Michał Faraday, ale tę jego definicję można by z powodzeniem uogólnić na wszystkie nauki stosowane. Jakkolwiek nie ma ścisłego powiązania między przebiegiem badań a tokiem myśli podczas ich pisemnego opracowania, to jednak niepodobna tych spraw traktować niezależnie. Pomijając oczywisty fakt niezbędnego w pracy doświadczalnej, szczegółowego i syste-



matycznego prowadzenia dziennika prób oraz protokołowania wyników badań, praca badawcza i praca związana z pisaniem przeplatają się. Często jeszcze przed ostatecznym zakończeniem eksperymentowania, w trosce o priorytet publikuje się komunikaty z przebiegu pracy. Z reguły, także w celu przyspieszenia terminu ukazania się publikacji, rozpoczyna się jej opracowanie przed zakończeniem badań. Dodatkową zaletą przyjęcia takiej właśnie metody postępowania jest to, że czynności pisania mają wtedy przeważnie charakter badawczy. Często bowiem dopiero podczas „potykania się z tekstem” ujawniają się właściwe interpretacje niektórych faktów, istotne konsekwencje okrycia czy powiązanie wyników badań z innymi zagadnieniami.

Pisanie prac naukowych ma trzy zasadnicze cele. Przede wszystkim cel społeczny, wynikający ze społecznego pochodzenia i społecznej roli nauki w ogóle. Z tego powodu jest rzeczą ważną, aby rezultaty badań naukowych wyrażone pisemnie były przekazane innym do zaopiniowania, a następnie opublikowane i ewentualnie przez innych wykorzystane.

Drugim celem pisarstwa naukowego jest upowszechnienie wiedzy. Wiąże się on często z potrzebą przystosowania publikacji do określonego kręgu czytelników. I wreszcie trzeci cel, w pewnych przypadkach dla autora najistotniejszy — aby publikowana praca stała się orężem w walce o realizację nowych idei, poglądów lub zamierzeń.

Sprawa ma bardzo istotne znaczenie ze względu na zawsze w takich przypadkach napotykaną opór umysłowy otoczenia. Wynika on stąd, że w umyśle ludzkim tkwi większa skłonność do oceniania wszystkiego na podstawie dotychczasowej wiedzy i utartych sądów niż na podstawie przedstawionych dowodów. Nowe koncepcje dlatego z takim trudem zdobywają sobie obywatelstwo, że zawsze oceniane są w świetle panujących teorii i wyobrażeń. Koncepcje nie harmonizujące z aktualnym stanem wiedzy z reguły bywają odrzucane. Einstein powiedział, że łatwiej jest rozbić atom niż mur przesądów. Wszyscy mamy jakąś skłonność do opierania się nowym ideom, które przychodzą z zewnątrz. Jest to naturalne i uzasadnione. Opór taki bowiem stanowi filtr, przez który powinny przedostać się tylko rzeczywiście twórcze koncepcje. Ktoś dowcipnie powiedział, że każdy oryginalny wkład do wiedzy musi pokonać trzy fazy oporu, zanim zostanie uznany:

— w fazie pierwszej jest on odrzucany lub wręcz ośmieszany jako nieprawdziwy;

— w fazie drugiej przyznaje się mu pewien sens, ale mówi się o nim jako o nie mającym praktycznego znaczenia;

— w fazie trzeciej, w której odkrycie zyskało już powszechne uznanie, pojawiają się głosy stwierdzające, że nie jest ono oryginalne, gdyż zostało dokonane wcześniej przez innych.

Z tych przyczyn odkrywca, zwłaszcza młody, musi, aby przekonać innych, wykazać nie tylko wiele śmiałości i uporu, ale także taktu i zręczności. Trzeba umieć ze spokojem i pobłażliwością wysłuchać nieraz ostrych wypowiedzi oponentów. „Odplącanie złem za złe w takich przypadkach jest — jak powiedział Harvey — niegodne filozofa i człowieka szukającego prawdy”. Trzeba mieć bowiem nadzieję, że „rzetelna prawda nigdy nie ginie bezpowrotnie”\*, a istnienia eksperymentalnie dowiedzionych faktów nie mogą zaprzeczyć nawet najwyższe autorytety.

Aby sprostać tym zadaniom, pisemne opracowanie badania powinno odpowiadać następującym ogólnym zasadom:

- zasadzie ścisłości naukowej;
- zasadzie wystarczającego uzasadnienia twierdzeń;
- zasadzie obiektywizmu naukowego.

Zasada ścisłości naukowej polega na tym, aby wyrażanie myśli było dostosowanie do wymagań logiki z uniknięciem wieloznaczności i niejasności pojęć oraz sprzeczności twierdzeń. Często jako przykład bełkotu pseudonaukowego podaje się następującą odpowiedź Hegla na pytanie, co to jest rozum. „Rozum jest zarówno substancją, jak i nieskończoną mocą, jest sam dla siebie zarówno nieskończonym tworzywem wszelkiego życia przyrodzonego i duchowego, jak i nieskończoną formą, wprowadzającą ową treść w czyn. Jest substancją, a więc tym, przez co i w czym wszelka rzeczywistość posiada swój byt i trwanie”. Urywki tekstu o podobnym brzmieniu spotyka się, niestety, w literaturze naukowej do dziś. Należy jednak przed tym się bronić. Trzeba tak formułować myśli, aby każde zdanie miało sens i aby w każdej chwili mogła być dowiedziona jego prawdziwość. Nie znaczy to, że trzeba unikać myślenia abstrakcyjnego. Wręcz przeciwnie. Ale jego tok należy tak prowadzić, aby myśl abstrakcyjna była doświadczalnie sprawdzalna, to znaczy wiązała się zawsze z tym, co można bezpośrednio lub pośrednio zobaczyć, usłyszeć lub dotknąć.

Zasada wystarczającego uzasadnienia twierdzeń naukowych wynika z jednego z podstawowych prawideł logicznego myślenia, a mianowicie zasady racji dostatecznej. Praca naukowa nie powinna zawierać żadnego twierdzenia bez dowodu. Jeśli przesłanki, na których opieramy nasze wywody, nie są zbyt mocno ugruntowane, należy zawsze wszystkie wypływające z nich wnioski podawać z zastrzeżeniami. Zdań intuicyjnych, to znaczy zdań subiektywnie pewnych, lecz nieuzasadnionych obiektywnie nie na-

---

\* Aforyzm Faradaya.

leży stosować. Aby uniknąć niejasności, należy na wstępie wyraźnie wymienić wszystkie założenia, na których opiera się praca, a następnie przeprowadzić tok rozumowania w ten sposób, aby mógł on być dokładnie prześledzony przez czytelnika.

Trzecią zasadą, której odpowiadać powinna każda praca naukowa, jest zasada obiektywizmu naukowego. Wynika ona wprost z naukowego stosunku do rzeczywistości, który wymaga obiektywnej postawy wobec otaczających nas faktów. Taka bowiem postawa daje po prostu największe prawdopodobieństwo poznania prawdy. Oczywiście całkowity obiektywizm zawsze będzie niedościgłym ideałem. Prace naukowe piszą ludzie, a umysł każdego człowieka, choćby największego uczonego, jest przesycony motywami subiektywnymi: nieuzasadnionymi przekonaniem, uprzedzeniami, sympatiami, pragnieniami, zależnością od okoliczności lub zaangażowaniem w spory.

Aby sprostać powyższemu zadaniu, eksperymentalna praca naukowa przedstawiona w formie pisemnej powinna odpowiadać czterem następującym wymaganiom:

- strukturalnym;
- stylistycznym;
- terminologicznym;
- formalnym.

Wymagania **strukturalne** dotyczą układu rzeczowego pracy. Z tego punktu widzenia praca powinna zawierać poniżej zestawione rozdziały merytoryczne.

**Wstęp.** Należy tu napisać przede wszystkim, co jest tematem pracy, z jakich potrzeb ona wynika i kto jest jej inicjatorem.

**Stan zagadnienia.** W tym rozdziale przedstawia się dotychczasowe poglądy na dany temat oraz ustala się stan wiedzy w dziedzinach bezpośrednio stykających się z tematem.

**Sformułowanie zagadnienia.** Trzeba ściśle i konkretnie, przy użyciu prostych słów powiedzieć, czego zamierza się dokonać, co wyjaśnić lub jaki spór rozstrzygnąć.

**Analiza zagadnienia.** Zacząć ją należy od sprecyzowania pojęć i podania definicji. Ułatwi to jasne przedstawienie hipotezy (jej strony fizycznej, a także matematycznej), co stanowi główną treść tego rozdziału.

**Metodyka badań.** Podaje się tu opis przyjętej metody eksperymentowania, opis stoisk badawczych oraz opis aparatury pomiarowej. W pewnych przypadkach uzasadnia się także przyjęty zakres badań, który z jednej strony powinien być wystarczający do potwierdzenia hipotezy, z drugiej zaś przez zbytnie rozbudowanie nie może zaciemniać zasadniczych idei wysuniętych i broniących w pracy.



*Wyniki pomiarów.* Przedstawia się je w postaci tablic. Należy wyraźnie oddzielić wyniki pomiarów od wyników obliczeń, a przede wszystkim od interpretacji wyników.

*Analiza wyników pomiarów.* Powinna ona zawierać analizę błędów, wyznaczenie stałych we wzorach empirycznych oraz graficzne przedstawienie badanych zależności.

*Wnioski szczegółowe i ogólne.* Wnioski szczegółowe dotyczą samego tematu. Wnioski ogólne natomiast nawiązują do innych zagadnień lub są wynikiem konfrontacji z jakimiś ogólnymi założeniami lub hipotezami.

*Zakończenie.* Umieszcza się tu krótki przegląd całości pracy i najważniejszych jej wyników oraz, wskazując, co jest jeszcze do zrobienia, zapowiada dalsze badania.

*Bibliografia.* Zawiera ona wykaz literatury, z której korzystał lub na którą powoływał się autor, przedstawiony w porządku chronologicznym (wg daty napisania) lub alfabetycznym.

Wymagania **stylistyczne** sprowadzają się przede wszystkim do oszczędnego i jasnego wysławiania. Cechą charakterystyczną stylu naukowego jest abstrakcyjność, która w sposób oczywisty wynika z zasadniczej funkcji nauki dążącej do uogólnień i odwołującej się do rozumu, nie zaś do wyobraźni i uczucia. Dlatego w poszczególnych sformułowaniach zwraca uwagę duża liczba rzeczowników, oznaczających pojęcia oderwane, przymiotników określających cechy abstrakcyjne oraz czasowników opisujących czynności pojęciowe. Więcej też jest w tym stylu przysłówków i spójników, ustalających pewne relacje. Brak jest natomiast elementów obrazowych lub są one nieliczne.

Autor pracy naukowej, przedstawiając tok własnego rozumowania, dąży do udowodnienia czegoś i jednocześnie do przekonania czytelnika, dlatego też pierwiastek emocjonalny występuje w jego stylu rzadziej i raczej tylko we fragmentach polemicznych. Dlatego większość wyrazów i wyrażeń oznaczających pojęcia i czynności abstrakcyjne pełni funkcję przede wszystkim narzędzia myśli.

Budowa zdania jest przeważnie złożona, wieloczęłkowa. Wynika to z samej istoty pracy naukowej, zawierającej wywody i dowodzenia. Tylko w partiach opisowych w naturalny sposób mogą przeważać zdania pojedyncze.

Wymagania **terminologiczne**, często lekceważone, szczególnie przez młodych autorów, odgrywają w piśmiennictwie naukowym coraz donioślejszą rolę. Wiąże się to z uświadomieniem sobie faktu, że słownictwo naukowe jest ważnym narzędziem pracy, wymagającym nie mniejszej precyzji niż narzędzia materialne. Rola słownictwa stała się szczególnie ważna w związku z rozwo-



jem techniki i towarzyszącym mu rozwojem literatury technicznej i naukowej. Obok języka potocznego, którego zasób słów nie przekracza 10 tysięcy, istnieje terminologia specjalistów. Liczba terminów np. w słowniku politechnicznym przekracza 100 tysięcy. Z tego powodu wszelkie mankamenty terminologiczne przyczyniają się do marnotrawstwa czasu, energii i stają się hamulcem postępu. Aby tego uniknąć, należy przestrzegać ustalonej dyscypliny, strzegącej ładu panującego w terminologii. Dyscyplina ta opiera się na szeregu zasad, z których najważniejsze są dwie:

— zasada jednoznaczności, która wymaga, aby dana nazwa oznaczała tylko jedno pojęcie. Zasada ta jest skierowana przeciw używaniu nazw wieloznacznych. Tak na przykład wieloznaczne jest określenie „stały”, używane w znaczeniach: 1) niezmienny w czasie, 2) równomierny, tj. niezmienny w przestrzeni, 3) nieruchomy, 4) nienastawny, 5) nieprzenośny. Prawidłowe jest używanie określenia „stały” tylko w pierwszym z tych znaczeń. W związku z zasadą jednoznaczności powstaje często konieczność tworzenia neologizmów;

— zasada jednomianowości, która ponadto wymaga, żeby tylko jedna nazwa oznaczała dane pojęcie. Zasada ta jest skierowana przeciw używaniu nazw równoznacznych. Przykładem takich nazw są następujące terminy bliskoznaczne: wtryskiwacz i rozpylacz, termometr i pirometr, tarcza turbiny i dysk turbiny itp. Istnienie nazw równoznacznych dezorientuje czytelników, którzy spotykając się z różnymi terminami przypuszczają, że chodzi o różne pojęcia.

I wreszcie ostatni rodzaj wymagań w stosunku do pracy naukowej przedstawionej na piśmie, a mianowicie wymagania **formalne**. Odnoszą się one głównie do dwu zagadnień:

— przejrzystego rozbicia tekstu na rozdziały i podrozdziały, odpowiednio oznaczone, najlepiej wg systemu dziesiętnego. W tym systemie powinno oznaczyć się także wszystkie wzory, na które autor powołuje się w tekście, rysunki i tabele;

— przestrzegania zasady jednoznaczności znakownictwa, z której wynika, że jeden symbol nie może oznaczać różnych wielkości. Wykaz oznaczeń wraz z odpowiednimi wymiarami należy zamieścić na początku pracy.

Oddając pracę do druku, należy ją kilkakrotnie uważnie przejrzeć, pamiętając, że przyszły recenzent będzie ją oceniał przede wszystkim według następujących kryteriów: oryginalność, wartość metodologiczną, wartość logiczną, wartość społeczną i ideologiczną, rozmiar wysiłku twórczego oraz poprawność językowego opracowania. Pod tym też kątem widzenia należy samemu spojrzeć na własną pracę.