

## BADANIA MODELOWE

Badania modelowe służą następującym celom:

— dostarczają danych do projektowania urządzeń użytkowych. Dane te, najczęściej w postaci współczynników, otrzymuje się jako wynik modelowego badania określonych procesów elementarnych, np. procesów wymiany ciepła, mieszania się strumieni gazów lub cieczy, przepływu przez przewody o pewnej geometrii itp;

— pozwalają wstępnie w małej skali sprawdzić działanie projektowanego urządzenia. Stosując metodę prób i poprawek można doświadczalne urządzenie modelowe doprowadzić do stanu spełniającego założenia, a następnie w oparciu o teorię podobieństwa, powiększając model, wykonać projekt urządzenia w skali użytkowej;

— umożliwiają za pomocą stosunkowo skromnych środków technicznych i finansowych szczegółowe zbadanie zachowania się już istniejącego urządzenia w celu udoskonalenia go lub lepszego zrozumienia zachodzących w nim zjawisk.

Istota modelowania urządzeń polega na modelowaniu zachodzących w nich zjawisk fizycznych i chemicznych. Aby zjawiska mogły być zmodelowane, muszą być przede wszystkim określone analitycznie. Rozróżniamy przy tym dwa przypadki:

— jeżeli zjawiska są opisane jednakowymi równaniami, zarówno w formie jak i w treści, to nazywamy je podobnymi,

— jeśli natomiast określenia analityczne jakichś zjawisk są jednakowe co do formy, lecz różnią się treścią fizyczną, to nazywamy je analogicznymi.

Na podstawie tego podziału rozróżniamy modele podobne i modele analogowe. W modelach podobnych niezależnie od tego, czy ma się do czynienia z układami homologicznymi\* czy heterolo-

---

\* Układy homologiczne — układy, w których odpowiadające sobie elementy są rozmieszczone w sposób podobny, a fizyczne i chemiczne własności ich składników są jednakowe.

gicznymi\* porównuje się w małej i dużej skali wielkości tego samego rodzaju. Komorę spalania można np. przedstawić za pomocą modelu wodnego (będą to układy heterologiczne), lecz wielkości obserwowane w modelu i przewidywane dla wzorca są zawsze takie same: prędkości przepływu płynu, kierunki linii prądu, spadki ciśnienia itd.

W modelach analogowych te same równania różniczkowe są spełniane przez całkowicie różne zmienne fizyczne lub chemiczne. Na przykład równania różniczkowe opisujące przewodzenie ciepła mają tę samą postać co równania dyfuzji. Podobnie identyczne są równania opisujące przepływ bezwirowy cieczy nieściśliwej oraz obraz pola elektrycznego lub magnetycznego. Wynika stąd możliwość przewidywania charakteru przepływu we wzorcu\*\* przez wykreślenie linii sił w elektrycznym lub magnetycznym układzie o podobnym kształcie. Takie postępowanie może być znacznie prostsze i szybsze niż przeprowadzanie doświadczeń z modelem hydromechanicznym. Stosując odpowiedni współczynnik zmiany skali między odpowiadającymi sobie zmiennymi i zachowując jednakowe warunki brzegowe, można przekształcić zaobserwowane w układzie elektrycznym wartości potencjału elektrycznego lub magnetycznego w ilościowe dane, pozwalające przewidzieć ciśnienia lub prędkości w układzie hydromechanicznym. Układ elektryczny stanowi wówczas model analogowy układu hydromechanicznego.

**Modele podobne.** Przedmioty materialne i układy fizyczne charakteryzują się trzema cechami: rozmiarem, strukturą i składem chemicznym, przy czym struktura rozumiana jest tu jak najogólniej, a mianowicie jako pewien rozkład w przestrzeni i czasie wielkości geometrycznych i fizycznych, występujących w tym układzie. Te trzy cechy stanowią trzy zmienne niezależne. Na przykład jakieś dwa przedmioty mogą mieć tę samą strukturę i rozmiar, a różnić się składem chemicznym, lub też mogą mieć tę samą strukturę i skład chemiczny, a różnić się rozmiarem.

Układy fizyczne dzielimy w zależności od występujących w nich wielkości na mechaniczne, cieplne, chemiczne, elektryczne itp., a przykładowo układy mechaniczne — na statyczne, kinematyczne i dynamiczne. Poszczególne układy rzadko występują jako niezależne. W związku z tym każdy niemal układ rzeczywisty

---

\* Układy heterologiczne — układy, w których spełniony jest pierwszy warunek układów homologicznych, lecz nie spełniony drugi.

\*\* Wzorzec — użytkowy aparat w dużej skali, do którego jest geometrycznie podobny model. Terminu „wzorzec” używa się bez względu na to, czy fizyczna egzystencja aparatu w dużej skali następuje przed, czy też po wprowadzeniu modelu.

można zaszerzować do więcej niż jednej spośród wymienionych grup układów, zależnie od tego, które z rozważanych własności bierze się szczególnie pod uwagę.

Na przykład komora spalania silnika rakietowego z punktu widzenia sił działających na jej ścianki stanowi układ statyczny (w ustalonych warunkach pracy), z punktu widzenia zachodzącego w niej procesu spalania — układ chemiczny, z punktu widzenia charakteru przepływu — układ dynamiczny, natomiast z punktu widzenia wymiany ciepła między spalinami i ścianką — układ cieplny.

Bezwymiarowe kryteria podobieństwa, ustalające warunki modelowania zjawisk, będą oczywiście różne, w zależności od tego, którego z tych układów będą dotyczyć. Jeśli poszczególne układy w obrębie badanego procesu oddziaływają bezpośrednio na siebie, to należy wtedy modelując proces uwzględnić wszystkie te kryteria. Modelując na przykład układ cieplny, należy równocześnie zmodelować także układ mechaniczny. Prowadzi to często do sprzeczności, przy czym sprzeczności te ujawniają się nawet w obrębie tej samej grupy układów.

Jak już była o tym mowa w rozdziale 9, bezwymiarowe kryteria podobieństwa są stosunkami wielkości fizycznych, będących funkcjami różnego rodzaju sił i oporów, które decydują o szybkości przebiegu zjawisk. W związku z tym wszędzie tam, gdzie występuje kilka różnych decydujących czynników, wystąpi odpowiednia ilość kryteriów. Na przykład w ogólnym przypadku opór przepływu zależy od sił lepkości, sił ciężkości oraz sił napięcia powierzchniowego. Bezwymiarowe równanie przepływu ma postać następującą

$$\frac{\Delta p}{\rho w^2} = \Phi \left( \frac{\rho w L}{\mu}, \frac{w^2}{Lg}, \frac{\rho p^2 L}{\sigma} \right)$$

gdzie:

$$\frac{\Delta p}{\rho w^2} = Eu \text{ — liczba Eulera;}$$

$$\frac{\rho w L}{\mu} = Re \text{ — liczba Reynoldsa;}$$

$$\frac{w^2}{Lg} = Fr \text{ — liczba Frouda;}$$

$$\frac{\rho w^2 L}{\sigma} = We \text{ — liczba Webera;}$$

$\Delta p$  — spadek ciśnienia w przepływającym strumieniu płynu;

$\rho$  — gęstość płynu;

$w$  — prędkość;

$\mu$  — lepkość;

$\sigma$  — napięcie powierzchniowe;

$L$  — rozmiar charakterystyczny;

$g$  — przyspieszenie ziemskie.



W przypadku układów homologicznych, zawierających ten sam płyn przepływający przez geometrycznie podobne urządzenia o różnych rozmiarach, trzy liczby podobieństwa stanowiące trzy zmienne niezależne powyższego równania są wyraźnie niezgodne. Z liczb tych wynikają bowiem następujące związki między odpowiadającymi sobie prędkościami oraz odpowiadającymi rozmiarami:

$$\text{z liczby Re wynika — } w \sim \frac{1}{L}$$

$$\text{z liczby Fr wynika — } w \sim \sqrt{L}$$

$$\text{z liczby We wynika — } w \sim \frac{1}{\sqrt{L}}$$

Przy zastosowaniu w dwu układach płynów o różnych właściwościach fizycznych oraz przy odpowiednim doborze liniowego i prędkościowego współczynnika skali teoretycznie możliwe jest równocześnie spełnienie jakichkolwiek dwóch spośród trzech powyższych kryteriów. Robi się to czasami w doświadczeniach modelowych mających na celu wyjaśnienie dynamiki przepływu w określonym urządzeniu pojętej jako zjawisko elementarne. Nie jest to natomiast oczywiście możliwe w przypadku modelowego badania instalacji doświadczalnej, przez którą musi przepływać lub w której musi przerabiać się ten sam czynnik co we wzorcu.

Jeżeli wyniki badań w instalacji doświadczalnej mają być przenoszone na większą skalę w sposób zasługujący na zaufanie, to wskazane jest, aby wszelkie procesy chemiczne i fizyczne były prowadzone w takich warunkach, w których szybkość tych procesów znajdowałaby się pod przeważającym wpływem jednego tylko wyrażenia bezwymiarowego. Znaczy to, w konkretnym przypadku przepływu cieczy lepkiej, że opory przepływu powinny w zdecydowany sposób zależeć albo od stosunku sił bezwładności i lepkości (liczby Re), albo stosunku sił bezwładności i ciężkości (Fr) względnie sił bezwładności i napięcia powierzchniowego (We).

Rodzaj zakresu warunków, które decydują o ogólnej szybkości przemian w danym układzie nazywamy obszarem. Na przykład, gdy o oporach przepływu decyduje stosunek sił bezwładności do lepkości, to taki zakres warunków nazywamy obszarem dynamicznym zależnym od lepkości, a badany układ opisujemy równaniem

$$Eu = \Phi(Re)$$

Analogicznie możemy wydzielić obszary dynamiczne zależne od sił ciężkości oraz od sił napięcia powierzchniowego. Pojęcie obszaru wprowadzono w teorii modelowania dla wyróżnienia procesu określającego szybkość badanego procesu w układzie, w którym może przebiegać kilka innych procesów równoległe, innymi słowy, dla wyróżnienia jakiejś szczególnej siły lub źródła oporu, decydujących o ogólnej szybkości przemiany. Należy przy tym odróżnić proces, określający szybkość w układzie, od procesu głównego lub tego procesu, który jest celem przeprowadzonego badania.

Chcemy na przykład zbadać zjawisko wymiany ciepła na drodze konwekcji. Równanie uogólnione opisujące to zjawisko w warunkach ustalonych przyjmuje postać

$$Nu = f(Re, Gr, Pr)$$

gdzie:  $Nu$  — liczba Nusselta, kryterium ustalające warunki wymiany ciepła w zjawisku konwekcji;

$Re$  — liczba Reynoldsa, kryterium ustalające warunki przepływu wymuszonego (konwekcję wymuszoną);

$Gr$  — liczba Grasshofa, kryterium ustalające warunki przepływu swobodnego (konwekcję swobodną);

$Pr$  — liczba Prandtla, kryterium ustalające własności fizyczne czynnika termodynamicznego.

Głównym zjawiskiem w badanym procesie jest zjawisko konwekcji. Zjawisko to jednak ściśle zależy od warunków przepływu, czyli konkretnie od tego, czy przepływ będzie wymuszony (np. za pomocą wentylatora), czy też swobodny (tj. wywołany różnicą gęstości w poszczególnych strefach czynnika termodynamicznego). W przepływie swobodnym interweniować będzie liczba  $Gr$ , w przepływie wymuszonym — liczba  $Re$ . Odpowiednie równania przybiorą następujący kształt

$$Nu = f(Gr, Pr)$$

$$Nu = f(Re, Pr)$$

W pierwszym przypadku wystąpi obszar konwekcji swobodnej, w drugim natomiast konwekcji wymuszonej.

Dla niezawodnego zwiększenia lub zmniejszenia skali procesów złożonych niezbędne jest spełnienie dwu warunków:

— obszar powinien być jednoznacznie określony, to znaczy, że szybkość procesu powinna głównie zależeć od jednej liczby podobieństwa,

— obszar, zarówno w małej jak i w dużej skali, powinien być tego samego typu.

Określenia obszaru dokonuje się najczęściej na podstawie analizy teoretycznej, która polega na obliczeniu rzędu wielkości poszczególnych czynników (sił, oporów itp.), które mogą wpłynąć na przebieg zjawiska i wyciągnięciu stąd wniosków co do rodzaju obszaru. Gdy brak jest danych obliczeniowych, typ obszaru należy określić doświadczalnie, badając wpływ różnych zmienionych na ogólną szybkość procesu. Wnioskiem wyciągniętym z tych badań będzie ustalenie liczby podobieństwa, mającej największy wpływ na badane zjawisko.

Drugi warunek poprawnego powiększania skali stawia wymagania, aby przy projektowaniu urządzenia modelowego zwrócić uwagę na właściwe parametry pracy wzorca. Z teorii podobieństwa wynika, że warunek ten spełnia się automatycznie, gdy odpowiednio liczby podobieństwa we wzorcu i modelu zostają niezmienione. Pozostając bowiem nawet przy zmianie skali w danym obszarze, np. w obszarze konwekcji wymuszonej, warunki przepływu zmieniają się w zależności od wartości liczby Reynoldsa. Najbardziej uwidacznia się to przy przekraczaniu pewnej granicznej liczby Reynoldsa, która rozdziela dwa obszary: obszar przepływu laminarnego i obszar przepływu turbulentnego.

Zachowanie stałości liczb podobieństwa w modelu i wzorcu nie zawsze jest możliwe. W tym celu została opracowana przybliżona metoda doświadczeń na modelach i to zarówno do obserwacji ruchu gazów i cieczy, jak i zjawisk wymiany ciepła i masy, a także przebiegu procesów chemicznych.

Ta przybliżona metoda dała dobre wyniki dzięki specjalnym właściwościom płynu lepkiego, a mianowicie stabilności i podobieństwu bezwzględnemu (automodelowości).

Zjawisko stabilności jest to właściwość płynów rzeczywistych, polegające na tym, że rozkład prędkości, który przyjmuje ona w ruchu, jest ściśle określony. Rozkład ten wyraża się wartością liczby Reynoldsa, kształtem przewodu i względną długością przebytego odcinka drogi. Ze wzrostem liczby Reynoldsa rozkład prędkości początkowo zmienia się szybko, następnie coraz wolniej i w końcu ustala się. Niezależność charakteru ruchu od liczby Re nazywa się zjawiskiem podobieństwa bezwzględnego. Przy istnieniu podobieństwa bezwzględnego ruchu cieczy można nie przestrzegać warunku podobieństwa  $Re = \text{const}$ , co bardzo ułatwia przeprowadzenie doświadczeń. W kanałach o układzie bardziej złożonym podobieństwo bezwzględne występuje szybko, przy tym wartość współczynnika oporu hydraulicznego jest stała, co jest wskaźnikiem ustalenia się podobieństwa bezwzględnego.



Projektując więc badanie modelowe, należy zachować następujące warunki:

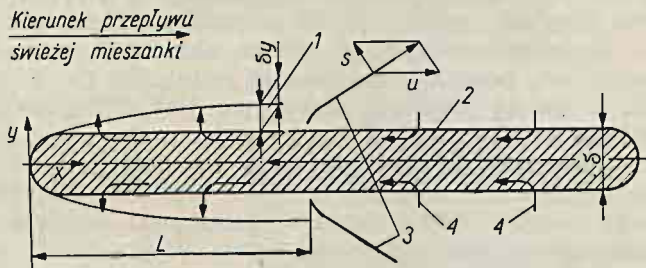
- podobieństwo geometryczne. Można je łatwo osiągnąć przez zbudowanie modelu, który jest dokładną kopią wzorca;

- podobieństwo efektów brzegowych. Warunek ten odnosi się na przykład do zachowania podobieństwa wymiany ciepła między ściankami i czynnikiem, a przede wszystkim do zachowania podobieństwa ruchu płynu na wejściu do rozpatrywanych urządzeń;

- podobieństwo parametrów fizycznych w odpowiadających sobie punktach modelu i wzorca, a więc stałość stosunków gęstości, ciśnienia, temperatur, współczynników lepkości, dyfuzji itp.;

- identyczność liczb podobieństwa ustalających obszar przyjęty za istotny w danym badaniu. Od warunku tego można odstąpić tylko wtedy, gdy został osiągnięty zakres podobieństwa bezwzględnego.

W celu zobrazowania sposobu przeprowadzania badań modelowych zostaną podane dwa przykłady. Przykład pierwszy dotyczy badania procesu podstawowego z zakresu aerotermochemii, a mianowicie ustateczniania płomienia w warstwie powierzchniowej. W rozważaniach przyjęto następujący fizyczny model zjawiska. Opływający płytkę strumień palnej mieszanki (rys. 13.1)

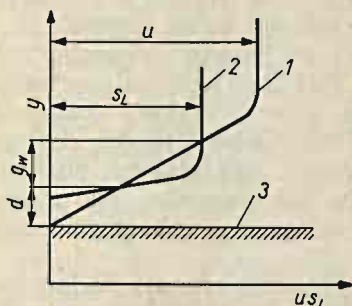


Rys. 13.1. Model ustateczniania płomienia w warstwie powierzchniowej:

$s$  — prędkość rozchodzenia się płomienia,  $u$  — prędkość przepływu,  $\delta y$  — grubość warstwy powierzchniowej,  $L$  — odległość czoła płomienia od krawędzi natarcia płytki,  $\delta$  — grubość płytki; 1 — laminarna warstwa powierzchniowa, 2 — płytka ustateczniająca, 3 — czoło płomienia, 4 — strzałki na płytce wskazują kierunek wymiany ciepła

tworzy na jej powierzchniach laminarną warstwę powierzchniową. Rozkład prędkości w warstwie powierzchniowej zmienia się od zera przy samej płytce aż do prędkości panującej w wolnym strumieniu. Podobny charakter zmienności ma w pobliżu powierzchni ścianki prędkość spalania laminarnego (rys. 13.2). Zmia-

na prędkości spalania w okolicy płytki wynika stąd, że jej powierzchnia na skutek doprowadzania ciepła i pochłaniania aktywnych cząstek z czoła płomienia działa jako czynnik gaszący płomień. To oddziaływanie jest tak intensywne, że płomień może się utrzymać tylko w pewnej odległości od powierzchni płytki.



Rys. 13.2. Rozkład prędkości spalania laminarnego  $S_L$  oraz prędkości przepływu  $u$  w czołe płomienia w pobliżu powierzchni płytki:

1 — rozkład prędkości przepływu,  
2 — rozkład prędkości spalania laminarnego, 3 — powierzchnia płytki

W miarę oddalania się od tej powierzchni prędkość spalania laminarnego rośnie, po czym ustala się. Profil prędkości przepływu w danym przekroju zależy od grubości warstwy powierzchniowej, a tym samym od odległości danego przekroju od krawędzi natarcia płytki. Przy odpowiednim ukształtowaniu profilu prędkości przepływu obydwa profile: profil prędkości przepływu i profil prędkości spalania laminarnego tak się układają, że w warstwie powierzchniowej powstaje warstewka mieszanki (wymiar  $g_w$  na rys. 13.2), w której prędkość przepływu jest mniejsza od prędkości spalania laminarnego. Ta warstewka może się stać czynnikiem inicjującym spalanie w dalszych warstwach, o ile grubość jej będzie dostatecznie duża, by w chwili zapłonu nastąpiła w niej równowaga między ilością ciepła wydzielonego podczas spalania i rozproszonego na skutek przewodnictwa. W ten sposób powstaje czoło płomienia, którego profil określa wypadkowa prędkość spalania i prędkość przepływu (rys. 13.2). Nie spalona przysścienna warstwa palnej mieszanki (wymiar  $d$  na rys. 13.2) zostaje dopalana poza czołem płomienia po uprzednim zmieszaniu się drogą dyfuzji ze spalinami. Ciepło ze spalin stykających się z płytką zostaje przejmowane przez płytkę, następnie przewodzone przez nią do przodu i oddawane przepływającej świeżej mieszance przez przednie powierzchnie płytki (rys. 13.1). Ułatwia to przygotowanie mieszanki do zapłonu i skraca odległość ( $L$  na rys. 13.1) między czołem płomienia a krawędzią natarcia płytki.

W opisanym powyżej procesie można wydzielić następujące zjawiska:

— tworzenie się warstwy powierzchniowej wokół płytki;



— rozchodzenie się płomienia uwarunkowane równowagą między ciepłem wydzielanym podczas spalania i rozpraszaniem na skutek przewodnictwa;

— przewodzenie ciepła w płytce;

— przejmowanie ciepła ze spalin do płytki oraz z płytki do świeżej mieszanki.

Wymienione zjawiska opisują następujące równania:

— równanie wymiany ciepła między płytką i strumieniem mieszanki

$$\alpha = - \frac{\lambda_p \delta}{2L \Delta t} \frac{dT}{dx}$$

— równanie ciągłości strugi

$$\frac{\partial \varrho u}{\partial x} + \frac{\partial \varrho v}{\partial y} = 0$$

— równanie ilości ruchu

$$\begin{aligned} \varrho u \frac{\partial u}{\partial x} + \varrho v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \\ + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

— równanie energii

$$\varrho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} + \varrho v c_p \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \varrho H u \left( u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right)$$

gdzie:  $\delta$  — grubość płytki;

$\lambda_p$  — współczynnik przewodzenia w płytce;

$T$  — temperatura;

$x$  — współrzędna równoległa do powierzchni płytki;

$\alpha$  — współczynnik przejmowania ciepła między płytką i mieszanką;

$L$  — odległość czoła płomienia od krawędzi natarcia płytki;

$t$  — różnica temperatur między temperaturą powierzchni płytki i mieszanki;

$\varrho$  — gęstość mieszanki;

$u$  — składowa prędkości przepływu równoległa do powierzchni płytki;

$v$  — składowa prędkości prostopadła do powierzchni płytki;

$y$  — współrzędna prostopadła do powierzchni płytki;  
 $p$  — ciśnienie;  
 $\mu$  — lepkość dynamiczna;  
 $c_p$  — ciepło właściwe mieszanki;  
 $\lambda$  — współczynnik przewodzenia ciepła w mieszance;  
 $Hu$  — wartość opałowa mieszanki;  
 $\varepsilon$  — stopień zaawansowania reakcji chemicznej.

Korzystając z powyższych równań, można metodą analizy wymiarowej wyznaczyć następujące liczby podobieństwa:

$$Eu = \frac{p}{\rho u^2} \text{ — liczbę Eulera;}$$

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \text{ — liczbę Reynoldsa;}$$

$$Pr = \frac{v c_p g \rho}{\lambda} \text{ — liczbę Prandtla;}$$

$$D = \frac{Hu}{c_p T} \text{ — liczbę Damkoehlera;}$$

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} \text{ — liczbę Nusselta;}$$

$$N = \frac{\lambda L}{\lambda_p \delta} \text{ — liczba charakteryzująca wymianę ciepła między płytką i świeżą mieszanką.}$$

Równanie uogólnione opisujące proces ustaleczniania płomienia w warstwie powierzchniowej przyjmuje więc następującą postać

$$Re = f(Eu, Pr, D, N, Nu)$$

Ponieważ liczby Eulera i Nusselta są jednoznaczными funkcjami liczby Reynoldsa, natomiast liczba Prandtla może być traktowana jako stała, równanie upraszcza się do postaci

$$Re = f(D, N)$$

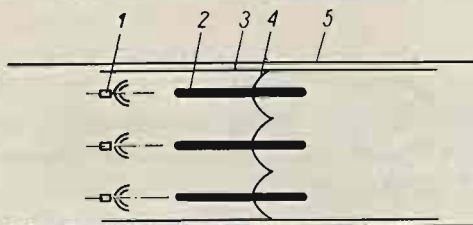
Ostatecznie równanie uogólnione przedstawia więc zależność liczby Reynoldsa od liczby Damkoehlera oraz liczby  $N$ . W celu określenia funkcji w tym równaniu można założyć, że należy ona do klasy iloczynów potęgowych. Znajduje to uzasadnienie w dotychczasowej praktyce dopasowywania typu funkcji do przebiegu procesów, w których decydującą rolę odgrywają zjawiska wymiany ciepła.

W związku z tym równanie uogólnione przyjmie postać

$$Re = k D^n N^m$$

gdzie  $k$ ,  $n$  i  $m$  oznaczają stałe, które należy określić doświadczalnie.

Po doświadczalnym wyznaczeniu stałych można będzie powyższym równaniem posługiwać się w praktycznych obliczeniach komór spalania, w których do ustateczniania płomienia wykorzystana jest warstwa przysięwna, powstała na powierzchniach płytek ustawionych współprądowo (rys. 13.3).



Rys. 13.3. Komora spalania ze statecznikami w postaci płytek ustawionych współprądowo:

1 — wtryskiwacze paliwa, 2 — płytki ustateczniające, 3 — ekran, 4 — czoło płomienia, 5 — ścianka komory

Powyższy przykład dotyczył modelowego badania elementu zespołu, który w różnych wariantach i różnych warunkach objętych kryteriami podobieństwa, występującymi w równaniu uogólnionym, może stanowić pewną część jakiegoś większego urządzenia.

✓ Przykład drugi zaczerpnijmy z dziedziny modelowania urządzeń o złożonej zasadzie działania objawiającej się nakładaniem na siebie procesów występujących podczas pracy tych urządzeń. Problem teoretyczny sprowadza się w tym przypadku do określania prawa, według którego będzie można zmieniać skalę oraz warunki pracy urządzenia, zachowując podobieństwo zjawisk w takim stopniu, aby efektywność jego działania nie została naruszona. Określmy to prawo dla komory spalania turbin spaliniowych ze wstępnym odparowaniem mieszanki palnej (rys. 13.4).

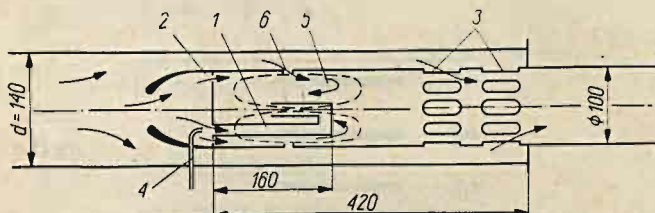
Zasada działania takiej komory jest następująca. Napływające do komory powietrze rozdziela się na dwa strumienie: pierwotny i wtórny. Część strumienia pierwotnego zasila odparowувacz, do którego poza tym wtryskiwane jest paliwo. Wypływająca z odparowувacza mieszanka przegrzanej pary paliwa i powietrza



zostaje zubożona do składu stechiometrycznego przez resztę powietrza pierwotnego i spalając się w wirze recyrkulacyjnym, tworzy spaliny rozcieńczone następnie przez powietrze wtórne.

Istotny wpływ na przebieg pracy komory mają następujące procesy:

- przepływ;
- proces tworzenia się mieszanki palnej;
- proces wywiązywania się energii cieplnej;
- kinetyka reakcji chemicznej;
- ustaleczanie płomienia.



Rys. 13.4. Schemat komory spalania z odparowaniem mieszanki:

1 — odparowywacz, 2 — otwory czołowe, 3 — otwory powietrza wtórnego, 4 — wtryskiwacz strumieniowy, 5 — wir recyrkulacyjny, 6 — otwory boczne

Wydaje się, że zachowanie podobieństwa tych procesów pozwoli zachować podobieństwo pracy całego modelu i całego wzorca.

✓ Podobieństwo obrazów przepływu zapewnia przepływ spełniający następujące warunki:

- podobieństwo geometryczne komór;
- $Re > Re_{gr}$  gdzie:  $Re$  — liczba Reynoldsa w strumieniu przepływającym przez komorę;

$Re_{gr}$  — graniczna liczby Reynoldsa, po przekroczeniu której przepływ spełnia warunek podobieństwa bezwzględnego (staje się automodelowy):  $Re_{gr} = 10^4$ .

✓ Podobieństwo tworzenia się mieszanki zapewnia spełnienie następujących warunków:

- mieszanka wypływa z odparowywacza całkowicie odparowana;
- współczynnik nadmiaru powietrza w komorach: modelowej i wzorcowej jest taki sam

$$\alpha = \text{idem} \quad [13.1]$$

— proces dyfuzji w obu komorach jest podobny. Ostatni warunek prowadzi do zachowania kryterium wyprowadzonego wprost z równania dyfuzji

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = -DF \frac{\partial c}{\partial y}$$

w postaci

$$\frac{wd}{D} = \text{idem} \quad [13.2]$$

gdzie:  $D$  — stała dyfuzji;

$M$  — masa dyfundująca;

$\tau$  — czas;

$F$  — powierzchnia, na której zachodzi dyfuzja;

$d$  — wymiar charakterystyczny komory (rys. 13.4);

$w$  — prędkość przepływu na wejściu do komory;

$c$  — stężenie paliwa;

$y$  — współrzędna.

Kryterium to spełnia się automatycznie, gdyż  $D$  jest zawsze proporcjonalne przy dużych liczbach Reynoldsa ( $Re > 10^4$ ) do iloczynu  $wd$ .

✓ Podobieństwo procesu wywiązywania się energii zapewnia warunek

$$D = \frac{\Delta T}{T} = \text{idem} \quad [13.3]$$

gdzie:  $D$  — liczba Damkoehlera;

$\Delta T$  — przyrost temperatury na skutek spalania;

$T$  — temperatura powietrza na wejściu do komory spalania.

Warunek [13.3] w połączeniu w warunkiem [13.1] prowadzi do warunku

$$T = \text{idem} \quad [13.4]$$

✓ Podobieństwo kinetyki reakcji chemicznej zapewnia spełnienie warunku

$$\frac{\tau_p}{\tau_r} = \text{idem} \quad [13.5]$$

gdzie:  $\tau_p$  — czas przebywania reagujących cząstek w komorze;

$\tau_r$  — czas reakcji chemicznej.

Ponieważ  $\tau_p \sim \frac{d}{w}$  to  $\tau_r \sim p^{1-n} e \frac{E}{BT}$  |

gdzie:  $n$  — rząd reakcji chemicznej;  
 $E$  — ciepło aktywacji;  
 $B$  — uniwersalna stała gazowa;  
 $p$  — ciśnienie panujące w komorze.

Przyjmując, że reakcja spalania węglowodorów jest reakcją drugiego rzędu, warunek [13.5] po uwzględnieniu warunku [13.4] przyjmuje postać

$$\frac{w}{pd} = \text{idem} \quad [13.6]$$

✓ Podobieństwo procesu ustaleczniania płomienia zapewnia warunek

$$\frac{\tau_{zw}}{\tau_{pr}} = \text{idem} \quad [13.7]$$

gdzie:  $\tau_{zw}$  — opóźnienie zapłonu;  
 $\tau_{pr}$  — czas „ślizgania się” cząstki świeżej mieszanki po strefie recyrkulacji.

Ponieważ

$$\tau_{zw} \sim \frac{1}{p} \quad \tau_{pr} \sim \frac{d}{w}$$

otrzymuje się kryterium podobieństwa identyczne z [13.6]

$$\frac{w}{pd} = \text{idem}$$

**Wniosek:** w celu zapewnienia podobieństwa w modelowaniu komór spalania turbin spalinowych ze wstępnym odparowaniem mieszanki należy wypełnić następujące warunki:

- podobieństwo geometryczne;
- $Re > 10^4$
- całkowite odparowanie paliwa w odparowywaczu;
- $\alpha = \text{idem}$ ;
- $T = \text{idem}$ ;
- $\frac{w}{pd} = \text{idem}$  lub też, co jest równoznaczne  $\frac{G}{p^2 d^3} = \text{idem}$ .

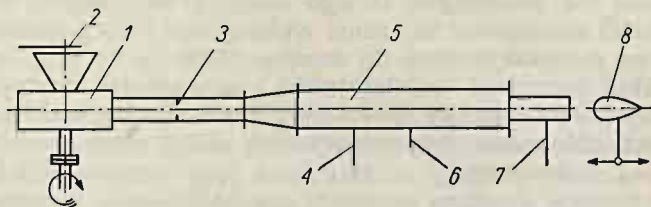
W celu potwierdzenia powyższej analizy przeprowadzono badanie 3 komór o następujących wymiarach charakterystycznych: 100, 140, 200 mm (wymiar  $d$  na rys. 13.4).



Na stoisku badawczym przedstawionym na rys. 13.5 badano zależność:

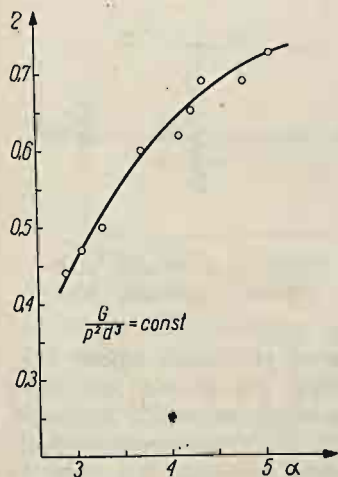
$$\eta = f(\alpha), \text{ przy różnych } \frac{G}{p^2 d^3} = \text{const}$$

gdzie:  $\eta$  — sprawność komory spalania.

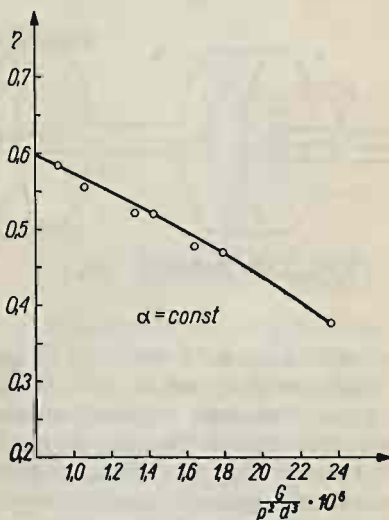


Rys. 13.5. Schemat stoiska do badania komory spalania: 1 — sprężarka, 2 — regulacja wlotu sprężarki, 3 — pomiar natężenia przepływu, 4 — pomiar parametrów powietrza na wejściu do komory, 5 — komora spalania, 6 — doprowadzenie paliwa, 7 — sonda do pobierania próbek spalin do analizy, 8 — regulacja wylotu komory

Wyniki badania ilustrują wykresy na rys. 13.6 i 13.7.



Rys. 13.6. Zależność sprawności cieplnej komory spalania od współczynnika nadmiaru powietrza

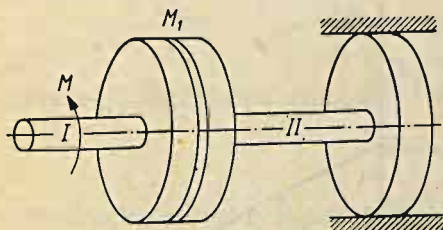


Rys. 13.7. Zależność sprawności cieplnej komory spalania od wartości kryterium modelowania

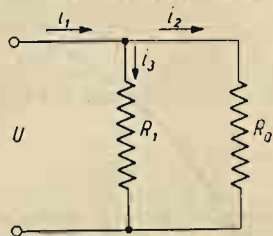
Rozrzuty punktów pomiarowych na wykresie rys. 13.6 mieszczą się w granicach  $\pm 2\%$ . Potwierdza to w zupełności słuszność przyjętego prawa modelowania komór spalania turbin spaliniowych analizowanego typu.

**Modele analogowe.** Model analogowy jest to aparat doświadczalny, w którym obserwuje się pewne zmienne wielkości fizyczne, a wyniki tych obserwacji wykorzystuje do przewidywania zachowania się zmiennych innego rodzaju w układzie wzorcowym. Model analogowy nie musi wykazywać jakiegokolwiek podobieństwa geometrycznego do wzorca. Może on na przykład stanowić układ oporności, indukcyjności i pojemności elektrycznych tak zaprojektowanych, by spełniały równania różnicowe zbliżone do równań różniczkowych, opisujących układ wzorcowy. Zalety miernictwa elektrycznego występujące przy porównaniu z miernictwem innych dziedzin sprawiły, że najbardziej rozwinęło się właśnie analogowe modelowanie elektryczne.

Przykładem tego sposobu modelowania może być model elektryczny sprzęgła ciernego, które przenosi energię mechaniczną z jednego wału na drugi za pomocą tarcia. Sprzęgło to jest pokazane na rys. 13.8. Wał II obciążony pewnym oporem użytecznym  $R_{M0}$  jest napędzany przez wał I za pośrednictwem oporu sprzęgła  $R_{M1}$ . Układ pracuje poprawnie, gdy opór użyteczny  $R_{M0}$  jest dużo mniejszy od oporu sprzęgła  $R_{M1}$ , wówczas energia przeniesiona



Rys. 13.8. Sprzęgło cierne



Rys. 13.9. Model elektryczny sprzęgła ciernego

zostanie z wału I na wał II prawie bez strat. Jeżeli opory  $R_{M1}$  i  $R_{M0}$  są współmierne, wał II będzie obracać się wolniej od wału I, a część energii zostanie zamieniona na ciepło tarcia w sprzęgle  $R_{M1}$ . Mówimy wówczas, że sprzęgło ślizga się. Gdy wreszcie opór użyteczny  $R_{M0}$  jest dużo większy od oporu sprzęgła  $R_{M1}$ , wał II pozostanie prawie nieruchomy, a cała prawie energia zostanie stracona na ciepło powstałe na skutek poślizgu sprzęgła. Odpowiednikiem poślizgu na oporze sprzęgła jest opornik elektryczny

$R_1$ , załączony równolegle do opornika użytecznego  $R_0$ . Zgodnie z prawami rozprężu prądu prawie cała energia zostanie przeniesiona na opór użyteczny tylko wtedy, gdy opornik równoległy  $R_1$  będzie dużo większy od opornika użytecznego  $R_0$ .

Innym przykładem modelowania analogowego jest zastąpienie dźwigni mechanicznej transformatorem elektrycznym. Zadaniem dźwigni jest pokonanie większej siły, siłą mniejszą, kosztem przebytej drogi (rys. 13.10).

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{h_2}{h_1}$$

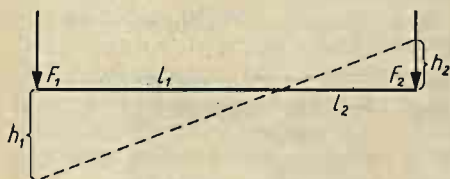
Podobnie w transformatorze uzyskać można na stronie wtórnej większe napięcie przy równoczesnym zmniejszeniu prądu (rys. 13.11).

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{i_2}{i_1}$$

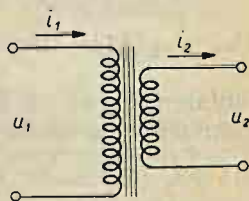
W obu przypadkach spełniona jest zasada zachowania energii.

Model analogowy w swej najnowszej postaci rozwojowej przekształcił się w analogową maszynę obliczeniową liczącą, przez co różnica między obliczeniem i doświadczeniem zanikła.

Największe zastosowanie w technice znajdują maszyny służące do rozwiązywania równań różniczkowych zwyczajnych. Maszyny



Rys. 13.10. Dźwignia



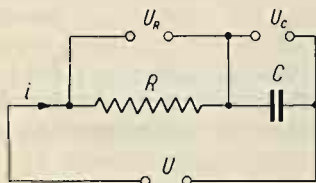
Rys. 13.11. Model elektryczny dźwigni

te, zwane analizatorami równań różniczkowych, są urządzeniami, za pomocą których można rozwiązywać równania różniczkowe liniowe i nieliniowe. Ich zasada działania oparta jest na fakcie, że poszczególnym działaniom matematycznym możemy podporządkować odpowiednie zależności między wielkościami elektrycznymi. Na przykład dodawanie dwu funkcji jest realizowane na podstawie prawa sumowania się prądów lub napięć. Odejmowanie różni się od dodawania tylko znakiem, który zmieniamy za pomocą układów lampowych. Przy mnożeniu mogą być wykorzystane właściwości lamp o dwu siatkach sterujących, które dają



na wyjściu napięcie proporcjonalne do iloczynu napięć przyłożonych do siatek. Zamiast dzielenia dwóch wielkości  $\frac{a}{b}$  posługujemy się układem mnożącym, mnożąc wyrażenia  $a$  przez  $\frac{1}{b}$ .

Zasadę elektrycznego całkowania i różniczkowania ilustruje uproszczony schemat na rys. 13.12, gdzie  $U$ ,  $U_R$ ,  $U_C$  oraz  $i$  ozna-



Rys. 13.12. Zasada elektrycznego całkowania i różniczkowania

czają odpowiednio napięcie wejściowe, różnicę potencjałów na oporze, różnicę potencjałów na kondensatorze i prąd. Wszystkie te wielkości są funkcjami czasu. Wskutek tego zachodzi równość

$$u(t) = U_R(t) + U_C(t) = R i(t) + \frac{1}{C} \int_{\tau=t_0}^t i(\tau) d(\tau)$$

gdzie:  $\tau$  — czas;

$t_0$  — chwila początkowa;

$t$  — chwila, dla której ważna jest powyższa równość.

Pod względem fizycznym  $\int_{\tau=t_0}^t i(\tau) d(\tau)$  oznacza ładunek zebrany w kondensatorze od chwili  $t_0$  do  $t$ . Jeśli przez stosowany dobór parametrów obwodu zapewnimy, że dla wszelkiego  $t$  jest  $U_R(t) \gg U_C(t)$ , to w każdej chwili  $i(t) \approx \frac{U(t)}{R}$ , a więc również

$$i(\tau) \approx \frac{U(\tau)}{R}. \text{ Stąd}$$

$$U_C(t) \approx \frac{1}{CR} \int_{\tau=t_0}^t U(\tau) d(\tau)$$

Jeśli przeciwnie, dla wszelkiego  $t$  jest  $U_R(t) \ll U_C(t)$ , to w każdej chwili  $U(t) \approx \frac{1}{C} \int_{\tau=t_0}^t i(\tau) d(\tau)$ .

Różniczkując względem  $t$  obie strony tej równości mamy

$$i(t) \approx C \frac{dU(t)}{dt}, \text{ czyli } U_R(t) \approx CR \frac{dU(t)}{dt}$$

Tak więc przez właściwy dobór oporu i pojemności i przez zmierzenie odpowiedniego spadku napięcia można napięcie wejściowe  $U(t)$  scałkować lub różniczkować na drodze elektrycznej.

Występujące w równaniach nieliniowości wytwarzamy za pomocą tak zwanych generatorów funkcji. Są to układy składające się z oscylografu, fotokomórki i odpowiedniego układu lampowego. Do płytek poziomych oscylografu doprowadzone jest pewne napięcie zwane podstawą czasu, powodujące periodyczny ruch plamki świetlnej w kierunku poziomym. Jeżeli nieliniowość zawarta w równaniu różniczkowym wyrażona jest za pomocą pewnej funkcji, to przebieg tej funkcji wycinamy z papieru i przykładamy do ekranu lampy oscylograficznej.

Założmy, że zasłoniliśmy dolną część ekranu. Naprzeciwko ekranu oscylografu umieszczona jest fotokomórka, która poprzez odpowiedni układ lampowy połączona jest z pionowymi płytkami oscylografu, odchylającymi plamkę w górę lub w dół. Gdy w pewnej chwili poruszająca się plamka zostanie zasłonięta przez wycięty z papieru przebieg funkcji, fotokomórka otrzyma mało światła i poprzez układ lampowy spowoduje podniesienie się plamki w górę. Jeżeli plamka świetlna znajduje się nad krawędzią papieru, fotokomórka dostanie dużą ilość światła i poprzez układ lampowy spowoduje obniżenie się plamki. W ten sposób plamka przesuwa się wzdłuż krawędzi wyciętego przebiegu funkcji, a napięcie na pionowych płytkach oscylografu ma przebieg tej funkcji, który po wzmocnieniu może być wprowadzony do odpowiedniego układu.

Analizator równań różniczkowych składa się z pewnej ilości układów sumujących, mnożących całkujących oraz generatorów funkcji. Układy te bywają na ogół uzupełniane przez lampy oscylograficzne, pozwalające na kontrolę przebiegów wykonywanych operacji matematycznych.

Przez połączenie odpowiednich elementów analizatora możemy dane równanie różniczkowe „przetłumaczyć” na przebiegi elektryczne, dobierając żądane wartości poszczególnych członów równania za pomocą odpowiedniego ustawienia oporów. Obserwując wykres rozwiązania na oscylografie, możemy z łatwością nie tylko rozwiązać układ równań różniczkowych, lecz także zbadać wpływ poszczególnych członów równania na wynik, co przy obliczeniach na papierze zajmuje wiele czasu. Dokładność obliczeń maszyn matematycznych liczących przez analogię jest rzędu 1%.

Ta mała stosunkowo dokładność wynika zarówno z zasady ich działania, jak i z niedokładności elementów, a także z trudności dokładnego odczytu przebiegu wykresu przedstawiającego wynik.

Dla wielu zagadnień technicznych dokładność ta jest zazwyczaj wystarczająca.

Oprócz opisanego analizatora równań różniczkowych stosuje się także i inne rodzaje tych maszyn, a przede wszystkim maszyny służące do rozwiązywania równań różniczkowych cząstkowych: Laplace'a, Poissona i Fouriera.

Na przykład równanie Fouriera dotyczące nieustalonego jednowymiarowego przepływu ciepła w ciałach stałych ma postać

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

gdzie  $a = \frac{\lambda}{C\gamma}$  — współczynnik wyrównania temperatury,  
 $\lambda$  — współczynnik przewodzenia cieplnego,  
 $C$  — ciepło właściwe (na jednostkę ciężaru),  
 $\gamma$  — ciężar właściwy.

Analogiczne równanie określające siłę elektromotoryczną w pojedynczym przewodzie z rozłożonymi na całej jego długości opornością  $R_e$  i pojemnością  $C_e$  przewodu względem ziemi jest

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{1}{R_e C_e} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}$$

Analogia występuje więc między następującymi wielkościami elektrycznymi i termicznymi:

wielkości elektryczne	wielkości termiczne:
— napięcie $V$	— temperatura $T$
— natężenie prądu $i$	— przepływ ciepła $q$
— pojemność elektryczna $C_e$	— ciepło właściwe $C\gamma$ (na jednostkę objętości)
— ładunek	— ilość ciepła
— prawo Ohma	— prawo przewodnictwa cieplnego
$i = \frac{V}{R_e}$	$q = \frac{\Delta T}{1/\lambda}$

Zastosowanie modelowania analogowego w technice i nauce jest w tej chwili niezwykle szerokie. Przede wszystkim nadaje się ono do przeprowadzania wszelkiego rodzaju analiz dynamicznych pracy maszyn i urządzeń, takich jak: silniki odrzutowe, samoloty, śmigłowce, pociski kierowane itp.



## LABORATORIA I STOISKA BADAWCZE

Rozwój metod eksperymentowania wiąże się ściśle z rozwojem stoisk badawczych oraz pomieszczeń przeznaczonych na te stoiska, czyli laboratoriów. Pewien pogląd na postęp w tej dziedzinie dają rys. 14.1, 14.2, i 14.3. Pierwszy z nich przedstawia pracownię Torricellego (1608—1647) w czasie dokonywania eksperymentu z barometrem. Eksperymentem tym Torricelli udowodnił

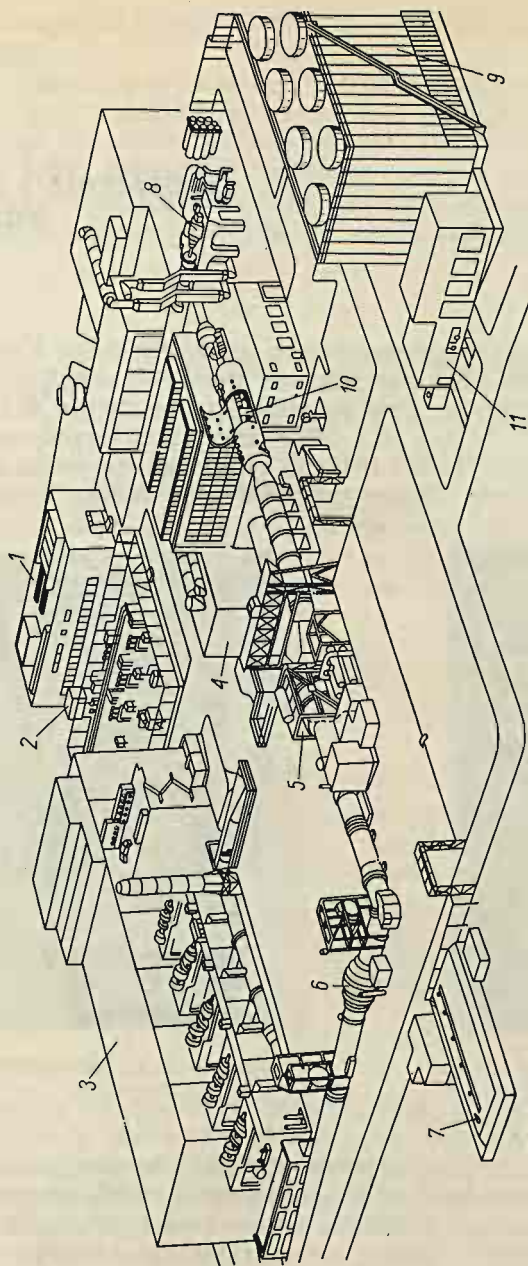


Rys. 14.1. Laboratorium Torricellego



Rys. 14.2. Laboratorium Cavendisha

istnienie próżni. Jest to typowy przykład bardzo prostego doświadczenia ilościowego mającego jednak doniosłe znaczenie naukowe. Stoisko badawcze składa się ze stołka, naczynia z rtęcią oraz z rurki szklanej z jednej strony zamkniętej o długości około



Rys. 14.3. Laboratorium do badań silników odrzutowych w warunkach wysokościowych:

1 — budynek administracyjny, 2 — podstacja, 3 — pompy próżniowe, 4 — oddział badania sprężarek, 5, 6 — chłodziarki, 7 — zbiornik paliwa, 8 — kompresoria, 9 — chłodnia kominowa, 10 — komora niskich ciśnień, 11 — pompownia

metra. Po wypełnieniu rurki rtęcią i zanurzeniu jej w naczyniu, rtęć opada do wysokości około 76 centymetrów. Pochylając rurkę w ten sposób, że zamknięty jej koniec znajdzie się niżej niż 76 centymetrów ponad powierzchnią rtęci w naczyniu, wywołuje się napełnienie rtęcią całej rurki. W rurce nie było nic poza rtęcią i nic też nie mogło się przedostać poprzez szkło, tak więc nie ma wątpliwości, że przestrzeń w górnej części rurki jest prawdziwą próżnią\*. Proste to doświadczenie udowodniło, że próżnia rzeczywiście istnieje i pozwoliło zmierzyć olbrzymią siłę ciśnienia atmosfery, z której dotychczas nie zdawano sobie zupełnie sprawy.

Rys. 14.2 przedstawia pracownię Cavendisha (1731—1810), w której między innymi odkrył on wodór, rozłożył wodę na składniki oraz dokonał analizy powietrza. Pomieszczenie laboratorium jest już wyłącznie przystosowane do badań. Znajduje się w nim szereg urządzeń pomocniczych, przyrządów pomiarowych oraz przyborów o charakterze uniwersalnym. Rys. 14.3 przedstawia wielkie laboratorium współczesne (1955 r.), przeznaczone do wysokościowego badania lotniczych silników turbinowych i turbino-odrzutowych. W pomieszczeniu silnikowym tego laboratorium można uzyskać warunki odpowiadające znacznym prędkościom i wysokościami lotu (prędkość odpowiadająca liczbie Macha 2,5 i wysokość 21 km). Ciśnienie i temperatura powietrza na wejściu do silnika może się zmieniać od  $0,07 \div 3,8 \text{ kg/cm}^2$  oraz od  $-90 \text{ — } +190^\circ\text{C}$ , a ciśnienie otoczenia od  $1 \div 0,035 \text{ kg/cm}^2$ . Zapotrzebowanie mocy na napęd sprężarek wynosi 30 000 kW. Koszt budowy i eksploatacji takiego laboratorium jest olbrzymi, tak że pozwolić sobie na jego realizację mogą tylko nieliczne kraje. Ten fakt staje się coraz bardziej symptomatyczny dla obecnego stadium rozwoju nauki. Niektóre bowiem jej gałęzie są ze względów ekonomicznych dla mniejszych i działających w odosobnieniu krajów, które by chciały je samodzielnie rozwijać, zupełnie niedostępne. Do takich dziedzin wiedzy należą między innymi: atomistyka, astronautyka i technika raketowa.

Obecnie laboratoria organizuje się głównie w instytutach naukowych, uczelniach i zakładach przemysłowych. Coraz ściślejsza więź między konstrukcją i badaniem oraz coraz silniej ujawniające się sprzeczności między produkcją i powstawaniem nowych konstrukcji doprowadziły do tworzenia mniej lub bardziej samodzielnych zakładów doświadczalnych, składających się z biura konstrukcyjnego, prototypowni oraz laboratorium badawczego.

---

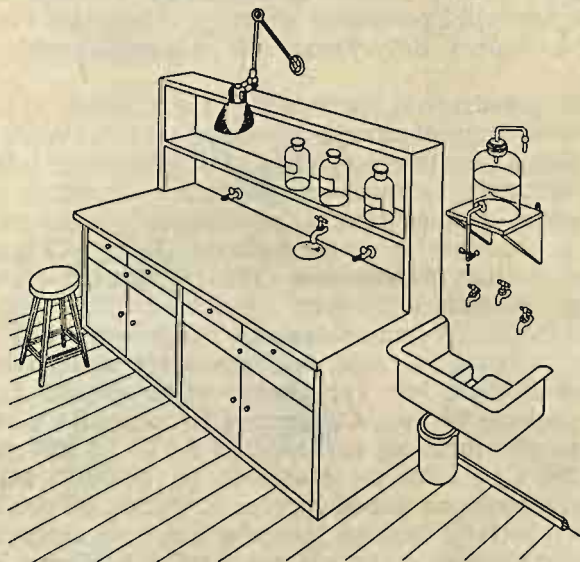
\* Ściśle mówiąc, w rurce nad rtęcią znajduje się nie próżnia, lecz przestrzeń wypełniona parami rtęci.



Jak się okazało, placówki takie są w stanie najszybciej i najekonomiczniej realizować postęp w technice.

Ze względu na przeznaczenie laboratoria można podzielić na trzy zasadnicze grupy.

Laboratorium typu klasycznej pracowni chemicznej, wyposażone właściwie tylko w odpowiednio zaprojektowany stół (rys. 14.4).

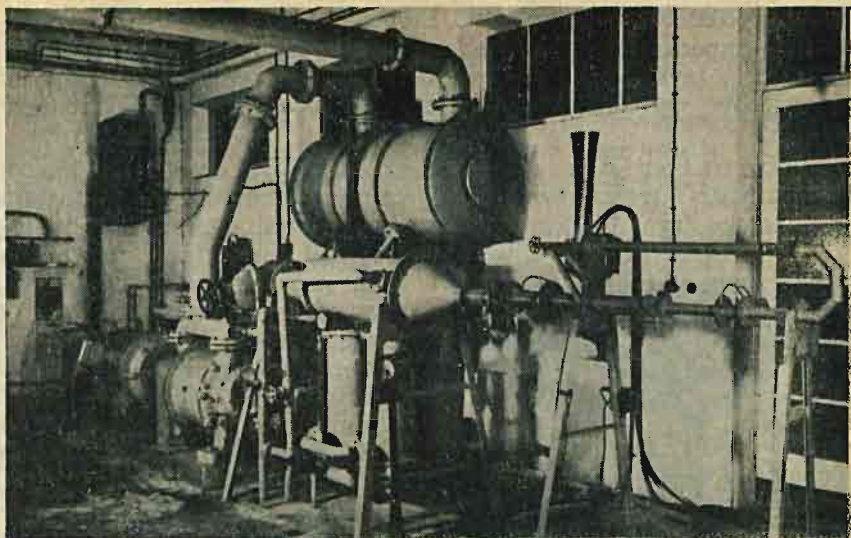


Rys. 14.4. Stół laboratoryjny z przeznaczeniem do badań chemicznych

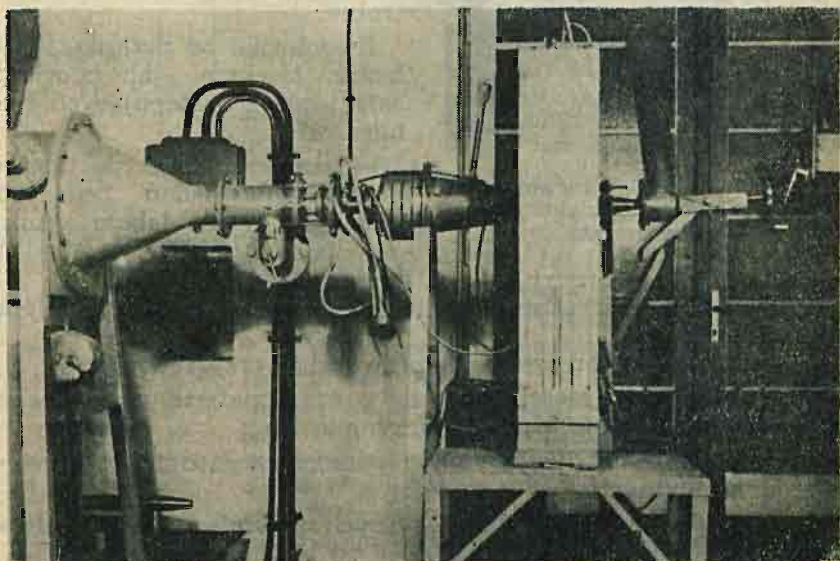
Do stołu doprowadzona jest elektryczność, gaz i woda; obok znajduje się zlew. Można tu prowadzić pewne typowe prace badawcze, nie wymagające specjalnych urządzeń i wielkich mocy. Na stole zestawia się potrzebną aparaturę ze znormalizowanych elementów (naczyń, probówek, stojaków, zaworów, przewodów itp.). Analogicznie wygląda klasyczne laboratorium fizyczne, w którym w podobny sposób na odpowiednich stołach ustawia się stoisko badawcze, składające się z typowych przyrządów pomiarowych oraz przeważnie ze znormalizowanych części i zespołów.

Laboratorium do badań elementarnych o charakterze specyficznym, wymagające określonego stoiska. Rys. 14.5 podaje przykład takiego stoiska, na którym można badać procesy spalania przy różnym ciśnieniu i róż-





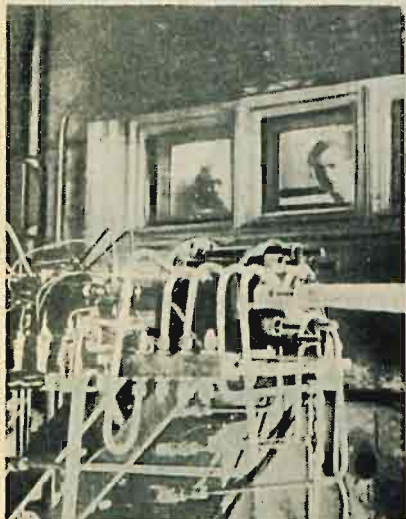
Rys. 14.5. Stoisko do badań procesów spalania przy różnych ciśnieniach i prędkościach przepływu



Rys. 14.6. Fragment stoiska do badań procesu spalania w niskich ciśnieniach, przedstawiający komorę, w której zachodzi badany proces

nych prędkościach przepływu. Stoisko składa się z pompy próżniowej napędzanej silnikiem elektrycznym, zespołu przewodów, badawczej (rys. 14.6) ze statecznikiem płomienia i rozpylaczem zbiorników wyrównawczych, chłodnic oraz właściwej komory paliwa.

Laboratorium do badań zespołów lub kompletnych urządzeń. Głównym elementem laboratorium jest stoisko (rys. 14.7) wyposażone we wszelkiego rodzaju instalacje o charakterze uniwersalnym (np. instalacje zasilające, przyrządy pomiarowe itp.) i przystosowane do badania wymiennych urządzeń (w przypadku rys. 14.7 prototypowych silników rakietowych). Stoiska takie bywają z reguły zdalnie sterowane z kabiny (rys. 14.8), w której przy odpowiednio zaprojektowanym stole znajdują się wszystkie niezbędne dźwignie, wyłączniki, światła sygnalizacyjne i przyrządy kontrolne.



Rys. 14.7. Stoisko (hamowania) do badania silników rakietowych na paliwo ciekłe

Niezależnie od przeznaczenia każde większe laboratorium składa się z następujących pomieszczeń:

— pomieszczenie do przeprowadzania badań będących głównym celem laboratorium;

— pomieszczenie do badań pomocniczych;

— warsztat podręczny, ewentualnie wraz z pomieszczeniem montażowym;

— pracownia wzorcowania i sprawdzania przyrządów;

— magazyn na części, przyrządy oraz materiały zużywane w czasie badań (oleje, paliwo, odczynniki itp.);

— pomieszczenie dla personelu pomocniczego oraz pracowników koncepcyjnych.

Projekt pomieszczeń laboratoryjnych powinien spełniać dwa zasadnicze postulaty:

— powinien w optymalny sposób spełniać założenia funkcjonalne;

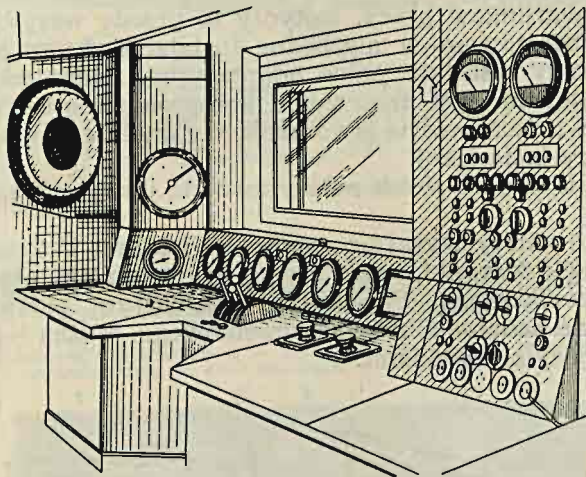
— powinien odpowiadać wszystkim wymagom higieny i bezpieczeństwa pracy.

Obydwa te postulaty wiążą się ściśle z właściwą konstrukcją stoiska badawczego.

Na ogół stoisko wraz z pomieszczeniem stanowią pewien integralny układ i nie mogą być projektowane niezależnie.

Postulat funkcjonalności narzuca spełnienie następujących warunków:

— postawione przed laboratorium zadanie powinno być zrealizowane w sposób najbardziej racjonalny i ekonomiczny;



Rys. 14.8. Kabina pomiarowa

— układ pomiarowy powinien zabezpieczać odpowiednią dokładność i szybkość rejestracji;

— laboratorium powinno być wyposażone w racjonalne instalację ogólną umożliwiającą sprawną pracę wszystkich działów. Do instalacji tych należą przede wszystkim: ogrzewanie, sieć elektryczna, sieć wodna, sieć gazowa, sieć pneumatyczna (nadciśnieniowa i próżniowa), wentylacja i klimatyzacja.

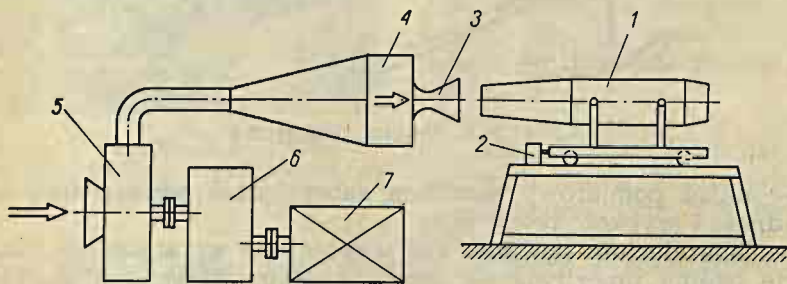
Postulat bezpieczeństwa i higieny pracy wymaga przede wszystkim zabezpieczenia załogi przed wypadkiem wszędzie tam, gdzie występuje choćby najmniejsze prawdopodobieństwo zaistnienia niebezpiecznej dla zdrowia lub życia awarii. Między innymi i z tego też powodu stoiska badawcze powinny być okresowo przeglądane, a znajdujące się na nich przyrządy pomiarowe oddawane do sprawdzenia.



Projekt laboratorium, a szczególnie takiego, w którym przewiduje się prowadzenie badań z dziedzin szybko rozwijanych (jak np. fizyka czy biologia), nie może opierać się na szczegółowo opracowanym projekcie technologicznym. Brak bowiem będzie zawsze w nim danych odnośnie do stosowanej w przyszłości aparatury pomiarowej i metod badania. Jako podstawę projektowania przyjmuje się więc jedynie przeznaczenie poszczególnych pomieszczeń laboratoryjnych, przewidując dużą elastyczność w wykorzystywaniu ich w przyszłości, a nawet możliwość przebudowy. Spełnienie wymogu elastyczności bywa utrudnione wskutek konieczności stworzenia dla personelu badawczego odpowiednich warunków pracy. Dotyczy to przede wszystkim wyposażenia laboratorium w niezbędne instalacje, które następnie będą utrudniały wszelkie prace adaptacyjne. Zadaniem projektanta laboratorium jest znalezienie kompromisu między zasadą elastyczności a możliwością stworzenia racjonalnie pojętego komfortu w pracy badawczej.

Przy projektowaniu stoisk należy zwrócić uwagę na szereg zagadnień.

Na wstępie należy wyraźnie ustalić cel i zakres badania, a następnie określić warunki, które muszą być spełnione, aby cel ten mógł być zrealizowany. Przypuśćmy, że naszym zadaniem jest przeprowadzić badanie silnika strumieniowego. Można tego dokonać następującymi metodami:



Rys. 14.9. Schemat stoiska do naziemnego badania silników strumieniowych:

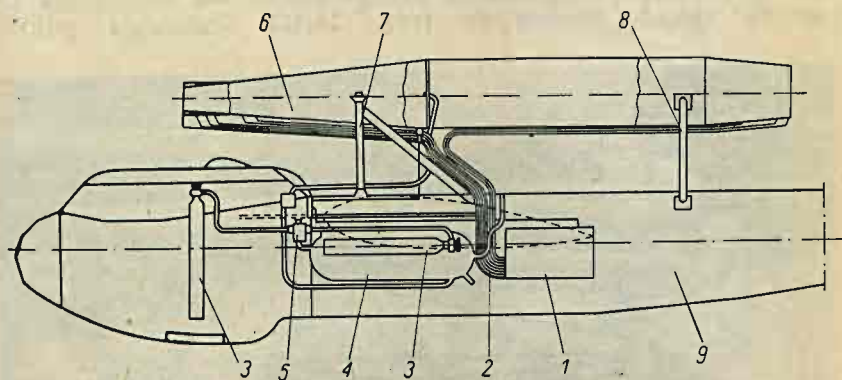
1 — silnik strumieniowy, 2 — urządzenie do mierzenia ciągu, 3 — dysza nadźwiękowa, 4 — zbiornik wyrównawczy, 5 — sprężarka, 6 — przekładnia zębata, 7 — silnik elektryczny

— na stoisku statycznym (rys. 14.9). Zasadniczym zespołem stoiska jest sprężarka napędzana poprzez przekładnię za pomocą silnika elektrycznego. Sprężone powietrze ze sprężarki jest doprowadzane do zbiornika wyrównawczego, skąd wypływa przez dyszę naddźwiękową. W osi dyszy na ruchomym wózku ustawio-



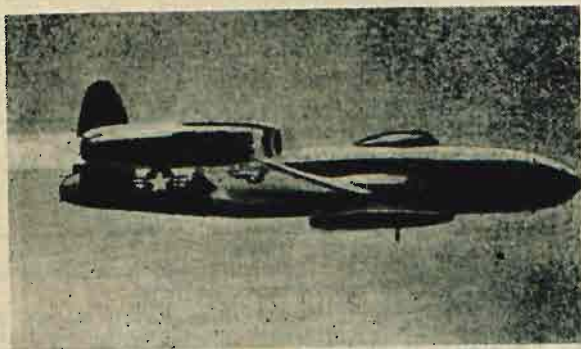
ny jest badany silnik strumieniowy. Takie stoisko pozwala na przeprowadzenie wielogodzinnych prób, co jest jego poważną zaletą, wymaga jednak zainstalowania silników elektrycznych o dużej mocy potrzebnych do napędu sprężarki;

— na stoisku zabudowanym na samolocie (rys. 14.10). Badany silnik jest w tym przypadku umieszczony nad kadłubem (może



Rys. 14.10. Schemat stoiska do badania silników strumieniowych w locie, zainstalowanego na samolocie bombowym:

1 — tablica przyrządów pomiarowych, 2 — przewody przekazujące ciśnienie, 3 — butle sprężonego powietrza, 4 — zbiornik paliwa, 5 — reduktor, 6 — silnik strumieniowy, 7, 8 — wspornik, 9 — kadłub samolotu

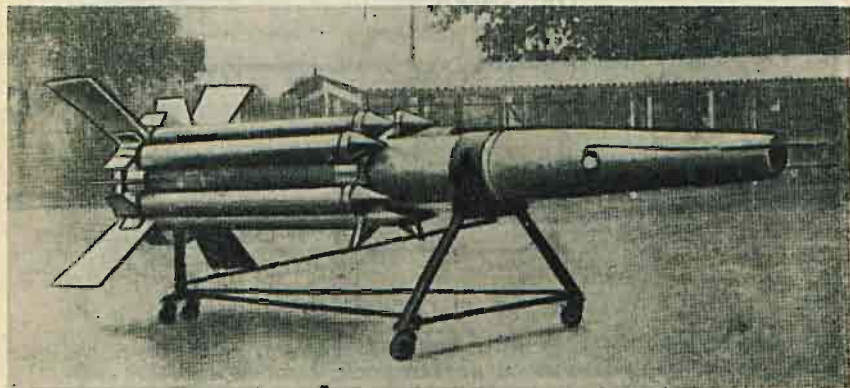


Rys. 14.11. Samolot myśliwski zastosowany jako latające laboratorium do badania silników strumieniowych, zainstalowanych na końcu skrzydeł

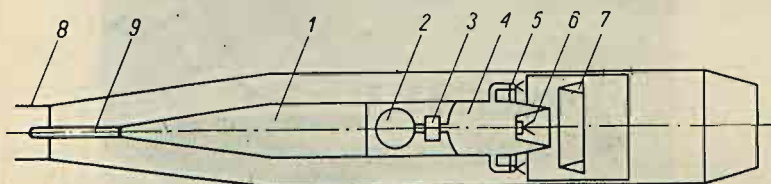
być pod skrzydłem lub na końcu skrzydła — rys. 14.11), instalacja zasilająca natomiast i tablica przyrządów — w kadłubie. Jako latającej hamowni można użyć typowych znajdujących się

w eksploatacji samolotów myśliwskich lub bombowych. Badania prowadzone w ten sposób są dość kosztowne, ale nie wymagają dużych nakładów inwestycyjnych. Poza tym czas przygotowania instalacji jest kilkakrotnie krótszy od czasu potrzebnego na realizację stoiska statycznego. Wadą urządzenia jest ograniczenie prędkości lotu, wynikające z maksymalnej prędkości samolotu;

— wyrzucając odpowiednio przygotowany do lotu silnik za pomocą rakiet startowych (rys. 14.12). Instalacja paliwa



Rys. 14.12. Silnik strumieniowy przeznaczony do indywidualnego badania w locie. Start silnika następuje za pomocą rakiet startowych



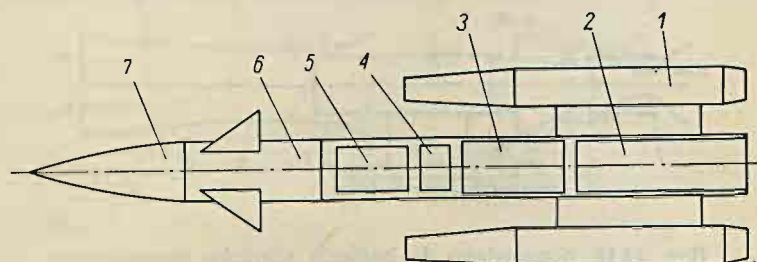
Rys. 14.13. Schemat silnika strumieniowego przeznaczanego do indywidualnego badania w locie:

1 — układ telemetryczny, 2 — zbiornik sprężonego powietrza, 3 — reduktor, 4 — zbiornik paliwa, 5 — wtryskiwacze paliwa, 6 — komora zapłonowa, 7 — statecznik płomienia, 8 — rurka Prandtla, 9 — antena

(rys. 14.13) znajduje się wewnątrz silnika. Tamże umieszczony jest nadajnik telemetryczny, który przekazuje na ziemię wielkości mierzone. Niezależnie od tego tor lotu silnika może być rejestrowany na ziemi za pomocą na przykład kamer balistycznych lub fototeodolitów. Wadą tej metody badania jest konieczność

wykonania wielu egzemplarzy silników, gdyż ulegają one po upadku na ziemię całkowitemu zniszczeniu (wraz z kosztowną instalacją, układem pomiarowym i pokładową częścią układu telemetrycznego);

— wyrzucając za pomocą rakiet odpowiednio zaprojektowany samolot niepilotowany (rys. 14.14) z samolotu pilotowanego lub



Rys. 14.14. Samolot niepilotowany przeznaczony do badania silników strumieniowych:

1 — silniki strumieniowe, 2 — spadochron, 3 — zbiornik paliwa, 4 — turbopompa, 5 — układ kierowania zdalnego, 6 — układ stabilizacji, 7 — układ telemetryczny

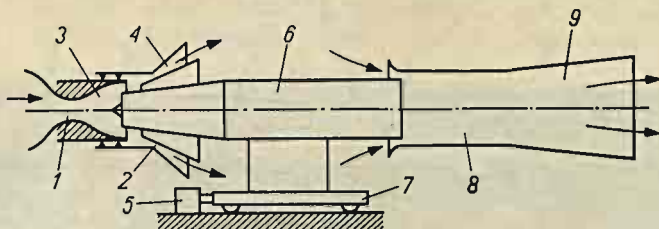
z wyrzutni na ziemi. Samolot jest zdalnie kierowany i po wykonaniu zadania może być odzyskany za pomocą spadochronu. Urządzenie jest kosztowne, ale nadaje się do wielokrotnego użycia. Jego realizacja może być jednak podjęta tylko w przypadku dysponowania dużym sztabem fachowców z różnych dziedzin.

Wybór metody badania będzie zależał od konkretnych warunków, potrzeb oraz posiadanego doświadczenia. Przypuśćmy, że w wyniku analizy wszystkich za i przeciw wybraliśmy pierwszą metodę badania, to jest badanie na stoisku statycznym. Zajmujemy się teraz wyborem optymalnej konfiguracji stoiska. Przede wszystkim staramy się zmniejszyć moc potrzebną do napędu sprężarki. Znaczne efekty pod tym względem można uzyskać, zastępując wolny wypływ strumienia powietrza w atmosferę (rys. 14.9) rozprężaniem poniżej ciśnienia atmosferycznego (rys. 14.15). Zwiększa to odpowiednio liczbę Macha w strumieniu na wyjściu, ponieważ liczba ta zależy od stosunku ciśnienia na początku dyszy do przeciwcisnienia. Zachowując liczbę Macha, taką jak w układzie przedstawionym na rys. 14.9, możemy po obniżeniu przeciwcisnienia zmniejszyć spręż w sprężarce, a tym samym i moc potrzebną do jej napędu.

Bardzo istotną sprawą jest także przyjęcie sposobu napędzania sprężarki. Najwygodniej jest do tego celu użyć silnika elektry-



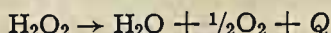
cznego. Zainstalowanie jednak takiego silnika o mocy kilku tysięcy kilowatów nie zawsze jest z wielu względów możliwe. Czasami więc może być dogodniej zastosować w tym przypadku np. tłokowy silnik lotniczy, który został już wycofany z eksploatacji, a nadaje się jeszcze do pracy na ziemi. W jednym z labo-



Rys. 14.15. Stanowisko do badania silników strumieniowych w niskim ciśnieniu:

1 — pierwszy przekrój krytyczny (przejście przepływu poddźwiękowego w naddźwiękowy), 2 — drugi przekrój krytyczny (przejście przepływu naddźwiękowego w poddźwiękowy), 3 — dysza naddźwiękowa, 4 — dyfuzor naddźwiękowy, 5 — urządzenie do pomiaru ciągu, 6 — silnik strumieniowy, 7 — ruchome łóże silnika, 8 — komora mieszania spalin i zasysania z otoczenia powietrza, 9 — dyfuzor

ratoriów adaptowano do tego celu turbinę parową, którą zasilano mieszaniną pary wodnej i tlenu, otrzymaną z katalitycznego rozkładu perhydrołu:



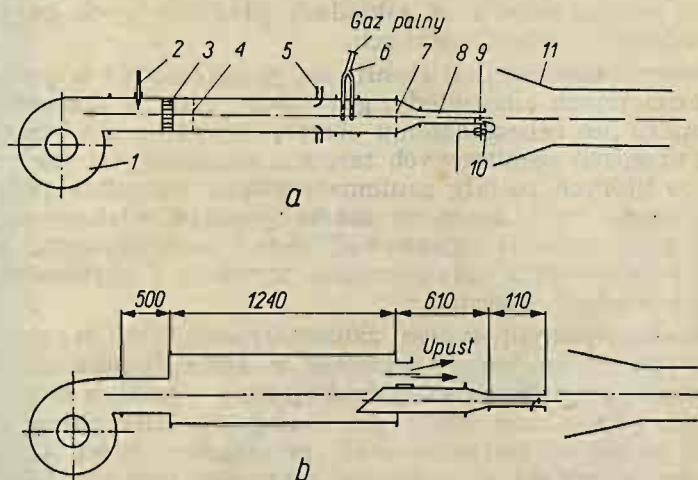
gdzie  $Q$  oznacza, że reakcja jest egzotermiczna. Należy w ogóle przyjąć jako zasadę, że w konstruowaniu stoisk będzie się szeroko stosować metodę adaptowania istniejących elementów, a nawet całych zespołów. Trzeba pamiętać, że stoisko badawcze powinno być środkiem do zrealizowania jakiegoś celu, a nie celem samym w sobie. Dlatego nie tyle powinno być efektywne, co proste w obsłudze i pewne w działaniu.

Powinno także umożliwiać łatwy dostęp do badanych urządzeń przed próbą, zaraz po próbie, a jeśli jest to możliwe i w czasie próby. Także montaż i demontaż urządzenia badanego na stoisku, a nawet całego stoiska nie powinien napotykać na zbyt wielkie trudności.

Szczególną jednak uwagę należy zwrócić na to, aby samo stoisko nie stało się źródłem zakłóceń zniekształcających przebieg badanego na nim zjawiska. Przykładowo dostarczają tu dwa sche-



maty na rys. 14.16. Schematy te dotyczą dwu wersji stoiska do badania ustateczniania płomienia za płaską płytką ustawioną prostopadle do kierunku przepływu. W wersji pierwszej (schemat a) na zakres stateczności znaczny wpływ miały pulsacje, których głównym źródłem była sprężarka. W wersji drugiej (schemat b) pulsacje te zostały wytłumione przez zastosowanie odpowiednio ukształtowanej komory wyrównawczej, zaopatrzonej w upust.



Rys. 14.16. Stoisko do badania stateczności płomienia:

a — wersja początkowa, b — wersja końcowa; 1 — sprężarka, 2 — termometr, 3 — prostownica, 4 — siatka, 5 — rurki do pomiaru ciśnienia, 6 — mieszalnik (doprowadzenie paliwa gazowego), 7 — siatka, 8 — komora spalania, 9 — statecznik płomienia, 10 — świeca zapłonowa, 11 — rura odprowadzająca spaliny na zewnątrz budynku

Bardzo istotną sprawą w projekcie stoiska jest opracowanie instalacji pomiarowej. Na ogół zwiększenie dokładności pomiarów pociąga za sobą zwiększenie ceny przyrządów oraz przedłużenie czasu potrzebnego do określenia wyników. Wywołuje to niekiedy znaczny wzrost kosztów badania i wymaga powiększenia personelu obsługującego stoisko.

W przypadku badania procesów szybkozmiennych posługujemy się zwykle oscylogramami wielokanałowymi z przystawką fotograficzną, rejestrującą na odpowiednio wyskalowanej taśmie z papieru światłoczułego od razu wynik pomiaru.

Przy badaniu procesów ustalonych o dużej liczbie punktów pomiarowych najkorzystniej jest wszystkie przyrządy zgrupować

na jednej tablicy, a wyniki pomiaru rejestrować za pomocą zdjęć fotograficznych (rys. 14.17). Można je później po przepisaniu na specjalnych formularzach przekazać na odpowiednio zaprogramowaną cyfrową maszynę matematyczną, która dokona właściwych przeliczeń.

W pewnych przypadkach jest rzeczą korzystną, a nawet niezbędną, aby pomiar był realizowany za pomocą przyrządów całkowicie lub częściowo zautomatyzowanych. Przyrządy takie są głównie eksploatowane w zakładach produkcyjnych przy kontroli procesów technologicznych.

W pracy laboratoryjnej stosuje się je przeważnie w pomiarach szybkozmiennych albo wtedy, gdy zależy nam na skróceniu czasu pomiaru lub zabezpieczeniu obserwatora. Obecnie istnieje już szereg urządzeń pomiarowych zarówno analogowych, jak i cyfrowych, w których zostały zautomatyzowane wszystkie podstawowe czynności, wchodzące w zakres pomiaru właściwego, a są i takie, które potrafią wykonywać także i część czynności wstępnych i końcowych z opracowaniem wyników i napisaniem protokołu z pomiaru włącznie.

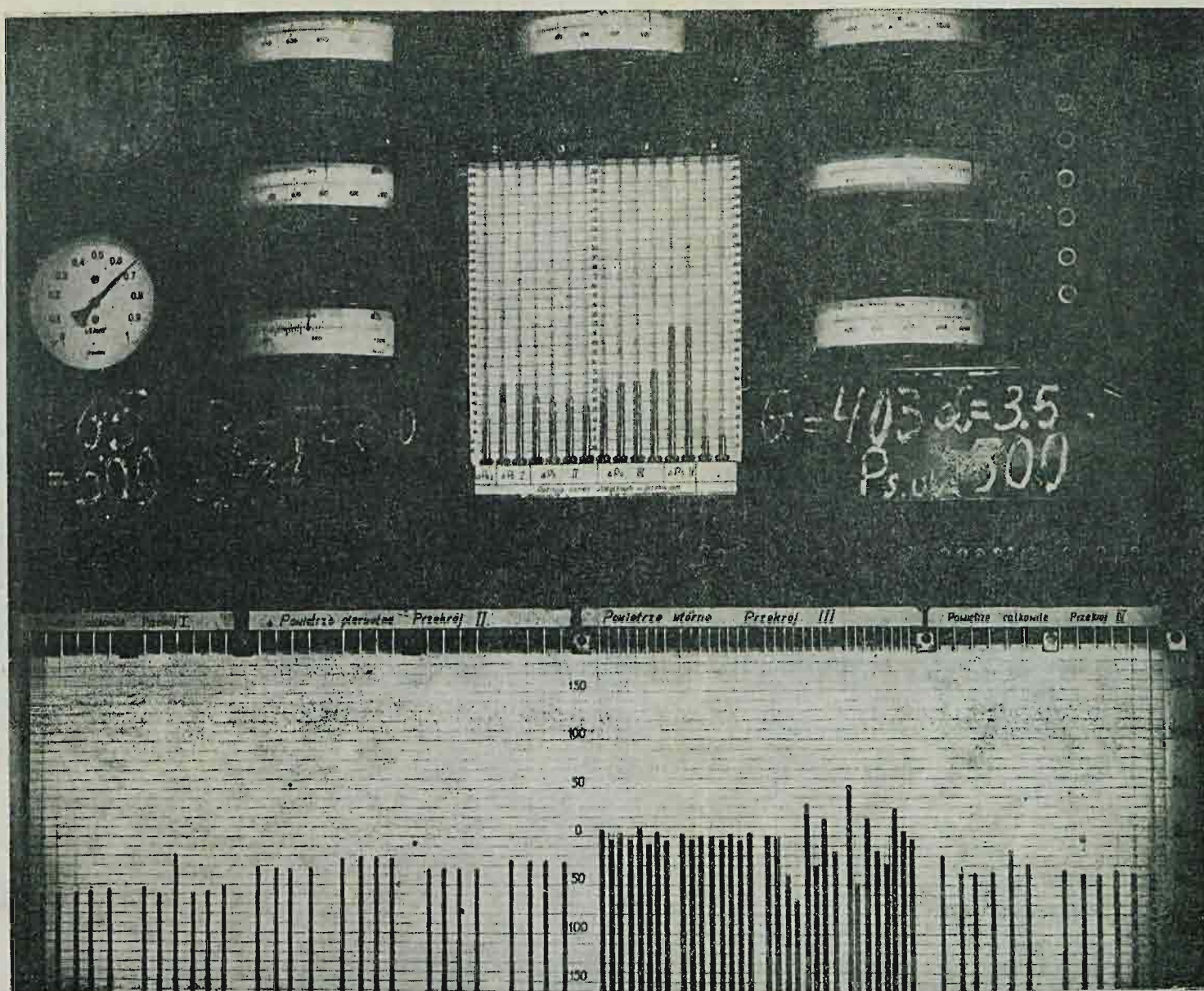
Perspektywicznym typem zautomatyzowanych urządzeń pomiarowych są przyrządy cyfrowe z bezpośrednim odczytem, współpracujące z drukarkami drukującymi wyniki, a nie, obecnie najczęściej spotykane, przyrządy analogowe. Kierunkiem rozwoju tych urządzeń jest stworzenie przyrządów, które automatyzowałyby wszystkie elementarne czynności pomiaru (nie tylko czynności pomiaru właściwego). W przyszłości stoiska badawcze będą mogły być z reguły wyposażone w przyrządy całkowicie zautomatyzowane, kierowane przez „mózg elektronowy”, który będzie realizował ustalony poprzednio pełny program badania (będzie np. sporządzał charakterystykę badanego obiektu).

Każde znajdujące się w laboratorium stoisko badawcze powinno mieć osobną instrukcję obsługi zawierającą następujące rozdziały:

- schemat i opis stoiska;
- przygotowanie stoiska do próby;
- postępowanie w czasie próby;
- analizę możliwości zaistnienia awarii lub wypadku podczas próby;
- przepisy dotyczące konserwacji i przeglądów;
- wykaz osób uprawnionych do obsługi stoiska.

Przed każdą ważniejszą próbą, kierownik próby powinien sprawdzić aktualność świadectw dotyczących wszystkich elementów zespołów i przyrządów zainstalowanych na stoisku.





Rys. 14.17. Tablica pomiarowa przystosowana do rejestrowania wyników pomiarów metodą fotografowania

Duże laboratoria wyposażone w stoiska badawcze, zautomatyzowaną sieć instalacji zasilających i różnorodną aparaturę pomiarową wymagają do eksploatacji i konserwacji tych urządzeń pokaźnej liczby pracowników technicznych o różnym stopniu wykształcenia. W odpowiednio utecniczonych, nowoczesnych ośrodkach naukowo-badawczych ilość tych pracowników wynosi ponad 10% ogółu zatrudnionych w ośrodku. Wymaga się od nich dużej odpowiedzialności oraz wysokich kwalifikacji. Inżynierowie kierujący zespołem tych pracowników powinni, poza znajomością swojej specjalności (mogą to być energetycy, elektronicy, elektrycy itp.), orientować się w ogólnych problemach prac naukowo-badawczych prowadzonych przez ośrodek, w którym pracują oraz znać zasady budowy laboratoriów i projektowania stoisk, aby móc służyć radą i pomocą pracownikom naukowym. Łączy się to z opanowaniem przez nich nowo powstałej dziedziny wiedzy, stanowiącej właśnie syntezę problemów związanych z utecniczaniem laboratoriów badawczych. Nosi ona nazwę inżynierii nauki.