

RURA UDERZENIOWA. POMIARY I WNIOSKI

Z. A. WALENTA, T. T. RUDOWSKA (WARSZAWA)

1. Wstęp

Rury uderzeniowe oraz budowane na ich zasadzie hipersoniczne tunele aerodynamiczne stanowią niezwykle wszechstronne narzędzie do badania przepływów o bardzo dużych prędkościach oraz zjawisk fizycznych i chemicznych w gazach w wysokich temperaturach. Ich podstawową zaletą jest to, że stosunkowo tanim kosztem i przy niewielkim zużyciu energii pozwalają wytworzyć strumień gazu, w którym temperatura może sięgać 7000°K. Ich największą wadą jest krótki czas pracy — rzędu zaledwie 100 μ sek. — z czym wiążą się duże trudności pomiarowe. Trudności te mogą być pokonane jedynie dzięki zastosowaniu aparatury elektro-nowej.

Obecnie istnieje na świecie kilkadziesiąt rur uderzeniowych, wykorzystywanych do różnorodnych badań. Liczba ich stale rośnie, zwiększa się zakres zastosowania; udoskonaleniu podlegają metody pomiarowe. Rura uderzeniowa stała się nieodzownym narzędziem w każdym laboratorium zajmującym się badaniami w zakresie aerodynamiki wysokich prędkości jak i badaniami zjawisk fizycznych zachodzących w gazach.

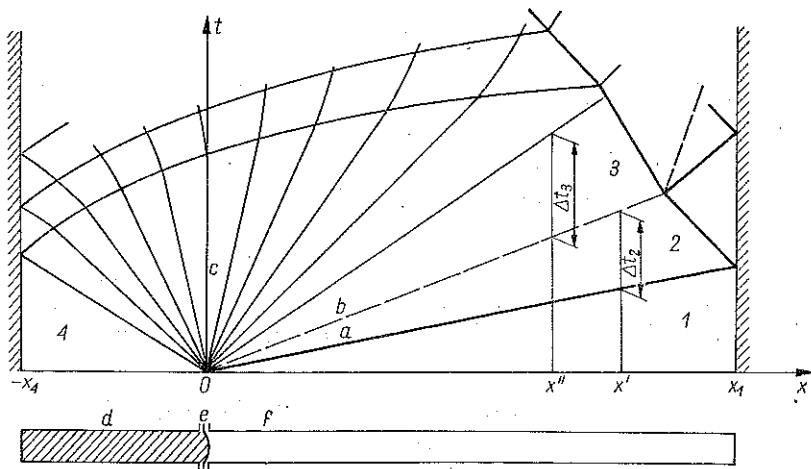
Rura uderzeniowa znajdująca się w Zakładzie Mechaniki Cieczy i Gazów IPPT była pierwszą rurą zbudowaną w Polsce. Budowa jej miała umożliwić zebranie doświadczeń w zakresie konstrukcji, wykonania i eksploatacji tego typu urządzeń jak również miała dostarczyć podstaw do opracowania odpowiednich metod pomiarowych. Przyjęte założenia konstrukcyjne, to prostota budowy oraz duża elastyczność eksploatacji. Budowa tej rury miała być etapem poprzedzającym budowę następnej, pełnowartościowej pod względem badawczym.

2. Rozważania teoretyczne

2.1. Schemat pracy rury uderzeniowej. Rura uderzeniowa jest to rura o przekroju najczęściej stałym, zamknięta na obu końcach i podzielona (w najprostszym przypadku) na dwie części membraną łatwą do usunięcia. Do jednej części rury (z reguły mniejszej) wpuszcza się sprężony «gaz napędzający», w drugiej części obniża się ciśnienie do wartości zazwyczaj paru milimetrów słupa rtęci. Praca rury rozpoczyna się w momencie rozerwania membrany. Następuje wtedy przejście fali uderzeniowej przez część próżniową rury oraz fali rozrzedzeniowej przez część ciśnieniową. Fale

te odbijają się od końców rury, spotykają ze sobą, interferują, odbijają ponownie itp., aż do całkowitego wytłumienia ruchu gazu wskutek lepkości.

Wykres w układzie x, t (x jest współrzędną wzdłuż osi rury, t oznacza czas, rys. 1) ilustruje schematycznie początkowy okres pracy rury uderzeniowej. Widać na rysunku, że między pierwotną falą uderzeniową a ostatnią charakterystyką fali rozrzedzeniowej znajduje się obszar przepływu ustalonego złożony z dwóch części: «gorącej» 2, w której gaz przeszedł przez falę uderzeniową i «zimnej» 3, w której gaz przeszedł przez falę rozrzedzeniową. Części te dzieli tzw. powierzchnia rozdziału. Powyższy obszar zazwyczaj najbardziej interesuje eksperymentatora.



Rys. 1. Obraz zjawisk zachodzących w rurze uderzeniowej
 a — pierwotna fala uderzeniowa, b — powierzchnia rozdziału, c — fala rozrzedzeniowa,
 d — część ciśnieniowa rury, e — membrana, f — część próżniowa rury

2.2. Rura uderzeniowa jako tunel aerodynamiczny o krótkotrwałym działaniu. Używając najprostszej rury uderzeniowej jako tunelu aerodynamicznego wykorzystuje się z reguły obszary przepływu ustalonego [2 i 3]. Czasy, w ciągu których można te przepływy traktować jako ustalone, są zazwyczaj tego samego rzędu. W obszarze 2 uzyskuje się wysokie temperatury gazu przy stosunkowo niskich liczbach Macha. W obszarze 3 gaz jest zimny, za to liczby Macha są tam znacznie wyższe. W praktyce obszar ten jest rzadziej wykorzystywany ze względu na silne zaburzenia przepływu, związane z przejściem gazu przez pękniętą membranę.

2.3. Parametry przepływu w rurze uderzeniowej. W najprostszej teorii rur uderzeniowych robi się zazwyczaj następujące założenia:

- 1) przepływ jest jednowymiarowy,
- 2) gaz jest nielepki, nie przewodzi ciepła, stosuje się do równania Clapeyrona i odznacza się stałą wartością ciepła właściwego,
- 3) cienka i płaska membrana pęka w sposób «doskonały», tzn. nieskończenie szybko, nie dając przy tym żadnych pozostałości zakłócających przepływ,
- 4) przekrój rury jest stały,
- 5) ścianki rury są sztywne.

Przy tych założeniach parametry przepływu w obszarze 2 dają się określić, jeżeli znana jest prędkość fali uderzeniowej oraz parametry przed falą (w obszarze 1). Mamy więc:

$$(2.1) \quad p_2 = p_1 \frac{2\kappa_1}{\kappa_1+1} \left(M_s^2 - \frac{\kappa_1 - 1}{2\kappa_1} \right),$$

$$(2.2) \quad T_2 = T_1 \frac{[2\kappa_1 M_s^2 - (\kappa_1 - 1)] [(\kappa_1 - 1) M_s^2 + 2]}{(\kappa_1+1)^2 + M_s^2},$$

$$(2.3) \quad M_2 = \frac{2(M_s^2 - 1)}{\{[2\kappa_1 M_s^2 - (\kappa_1 - 1)] [(\kappa_1 - 1) M_s^2 + 2]\}^{1/2}},$$

gdzie p_1 i p_2 są to ciśnienia odpowiednio przed i za falą uderzeniową (w obszarach 1 i 2), T_1 i T_2 — temperatury odpowiednio przed i za falą uderzeniową, M_2 liczba Macha przepływu w obszarze 2, M_s oznacza «liczbę Macha fali uderzeniowej» (stosunek prędkości fali do prędkości dźwięku przed falą) oraz κ_1 wykładnik adiabaty dla gazu w obszarze 1.

W obszarze 3 (za powierzchnią rozdziału) ciśnienie i prędkość przepływu są równe odpowiednim wartościom z obszaru 2. Dla określenia pozostałych parametrów przepływu konieczna jest jeszcze znajomość stanu gazu w obszarze 4.

Zachodzą bowiem następujące związki:

$$(2.4) \quad T_3 = T_1 \left[\frac{a_4}{a_1} - \frac{\kappa_4 - 1}{\kappa_1 + 1} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \right]^2,$$

$$(2.5) \quad M_3 = \frac{\frac{2}{\kappa_1 + 1} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right)}{\frac{a_4}{a_1} - \frac{\kappa_4 - 1}{\kappa_1 + 1} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right)},$$

gdzie T_3 oznacza temperaturę gazu w obszarze 3, M_3 liczbę Macha przepływu w obszarze 3, a_1 i a_4 prędkość dźwięku odpowiednio w obszarze 1 i 4 oraz κ_4 wykładnik adiabaty dla gazu w obszarze 4.

Najprostsza teoria rury uderzeniowej pozwala również określić stosunek ciśnień po obu stronach membrany, konieczny dla uzyskania żądanej prędkości fali uderzeniowej. Wyraża się on zależnością

$$(2.6) \quad \frac{p_4}{p_1} = \frac{2\kappa_1}{\kappa_1+1} \left(M_s^2 - \frac{\kappa_1 - 1}{2\kappa_1} \right) \left[1 - \frac{a_1}{a_4} \left(\frac{\kappa_4 - 1}{\kappa_1 + 1} \right) \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \right]^{-\frac{2\kappa_1}{\kappa_1 - 1}}.$$

Należy tu podkreślić, że omawiana teoria najlepiej zgadza się z doświadczeniem w odniesieniu do obszaru 2. Dla niezbyt wysokich wartości M_s (gdy nie ma jeszcze wpływu wibracji atomów w cząsteczkach, dysocjacji i jonizacji) uzyskane na jej podstawie zależności (2.1)-(2.3) można uważać za wystarczająco dokładne. Natomiast zależności (2.4)-(2.6) należy traktować raczej jako orientacyjne. Obarczone

są one błędem wynikającym głównie z wpływu warstwy przyściennej oraz faktu, że «powierzchnia rozdziału» jest niedość dokładnym modelem.

2.4. Czas pracy rury uderzeniowej. Omawiana wyżej najprostsza teoria rury uderzeniowej pozwala również określić użyteczny czas pracy rury, który zdefiniujemy tutaj jako czas trwania przepływu ustalonego w obszarach 2 i 3.

Czas trwania przepływu ustalonego w obszarze 2 w odległości od membrany równej x' wyraża się za pomocą wzoru:

$$(2.7) \quad \Delta t_2 = \frac{x' (\kappa_1 - 1) M_s^2 + 2}{a_1 2M_s (M_s^2 - 1)}.$$

Wzór ten można stosować tylko wtedy, gdy pomija się wpływ fal odbitych od końców rury. Dla rury zamkniętej na końcach sztywnymi ściankami, wzór (2.7), stosuje się również, pod warunkiem że

$$(2.8) \quad x' \leq x_1 \frac{2(M_s^2 - 1) [(3\kappa_1 - 1) M_s^2 + (3 - \kappa_1)]}{(\kappa_1 + 1) [2\kappa_1 M_s^2 - (\kappa_1 - 1) M_s^2]},$$

$$x_4 \geq x_1 \frac{\frac{a_4}{a_1} [(3\kappa_1 - 1) M_s^2 + (3 - \kappa_1)] \left[1 - \frac{a_1}{a_4} \left(\frac{\kappa_4 - 1}{\kappa_1 + 1} \right) \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \right]^{\frac{\kappa_4 + 1}{2(\kappa_4 - 1)}}}{2M_s [2\kappa_1 M_s^2 - (\kappa_1 - 1)]}$$

Symbol x_1 oznacza długość części próżniowej rury, a x_4 długość części ciśnieniowej (rys. 1).

Podobnie można zestawić wzory pozwalające obliczyć czas trwania przepływu ustalonego w obszarze 3. Czas ten w odległości x'' od membrany wynosi

$$(2.9) \quad \Delta t_3 = \frac{x''}{a_1} \frac{\left[\frac{a_4}{a_1} - \frac{\kappa_4 - 1}{\kappa_1 + 1} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \right]}{\frac{2}{\kappa_1 + 1} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \left[\frac{\kappa_4 + 1}{\kappa_1 + 1} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) - \frac{a_4}{a_1} \right]},$$

a wpływ fal odbitych od końców rury nie występuje, gdy spełnione są warunki następujące:

$$(2.10) \quad x'' \leq x_4 \left[\frac{a_1}{a_4} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) - 1 \right] \left[1 - \frac{a_1}{a_4} \left(\frac{\kappa_4 - 1}{\kappa_1 + 1} \right) \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \right]^{-\frac{\kappa_4 + 1}{2(\kappa_4 - 1)}},$$

$$x_4 \geq x_1 \frac{[(3\kappa_1 - 1) M_s^2 + (3 - \kappa_1)] \left[1 - \frac{a_1}{a_4} \left(\frac{\kappa_4 - 1}{\kappa_1 + 1} \right) \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \right]^{\frac{\kappa_4 + 1}{2(\kappa_4 - 1)}}}{M_s \left[\frac{a_1}{a_4} (2\kappa_1 + \kappa_4 - 1) M_s^2 - (\kappa_1 + 1) M_s + \frac{a_1}{a_4} (2 - \kappa_4 - \kappa_1) \right]}.$$

Należy zauważyć, że wzory (2.9) i (2.10) stosują się tylko w przypadku, gdy przepływ w obszarze 3 jest naddźwiękowy. Ma to miejsce wówczas, gdy zachodzi nierówność

$$(2.11) \quad M_s \geq \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\kappa_1 + 1}{\kappa_4 + 1} \right) \frac{a_4}{a_1} + \sqrt{4 + \left[\left(\frac{\kappa_1 + 1}{\kappa_4 + 1} \right) \frac{a_4}{a_1} \right]^2} \right\}.$$

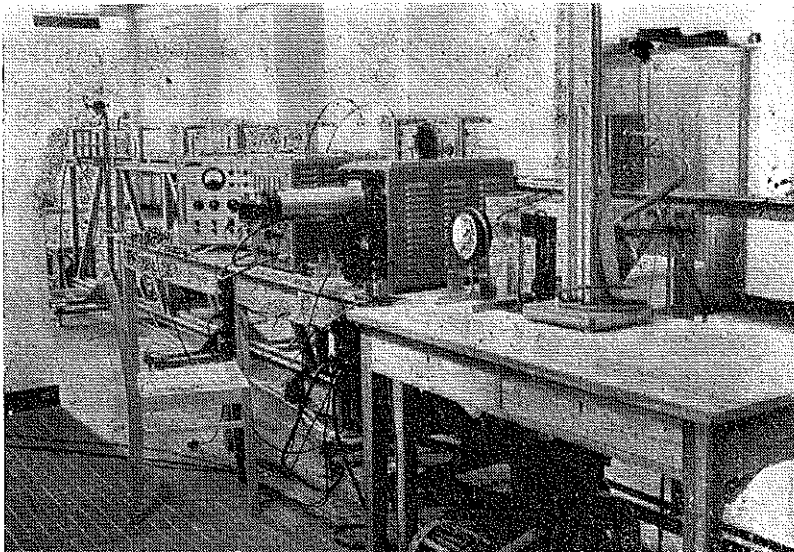
Gdy nierówność ta nie jest spełniona, pierwotna fala rozrzedzeniowa nie przechodzi do części próżniowej rury (rys. 1) i przepływ ustalony w obszarze 3 trwa najdłużej w przekroju odpowiadającym położeniu membrany.

Trzeba tu jeszcze podkreślić, że wzór (2.10) jest wzorem przybliżonym, wyrowadzonym przy założeniu, iż fala uderzeniowa odbita od końca rury nie zmienia swojej prędkości po przejściu przez powierzchnię rozdziału. Błąd spowodowany tym założeniem leży zazwyczaj po stronie «bezpiecznej», tzn. odbita fala uderzeniowa ma po przejściu przez powierzchnię rozdziału mniejszą prędkość (zależy to od parametrów w obszarach 2 i 3). Zresztą ze względu na odchylenia od przyjętych założeń, występujących w rzeczywistej rurze uderzeniowej, dokładność wzorów (2.9) i (2.10) jest niewielka. Mają one charakter wyłącznie orientacyjny, natomiast dla dokładnego określenia szukanego czasu przepływu ustalonego najlepiej posłużyć się pomiarami.

Wzory (2.1)–(2.11) bardzo upraszczają się w przypadku, gdy $a_1 = a_4$ oraz $\kappa_1 = \kappa_4$. W Dodatku podana jest ich szczególna postać dla przypadku $\kappa_1 = \kappa_4 = 1,4$ (jak to ma miejsce np. dla powietrza).

3. Opis rury uderzeniowej Zakładu Mechaniki Cieczy i Gazów

3.1. Konstrukcja rury. Rura uderzeniowa skonstruowana w Zakładzie Mechaniki Cieczy i Gazów (rys. 2) ma przekrój prostokątny o wymiarach 160×80 mm. Cał-



Rys. 2. Widok ogólny rury uderzeniowej Zakładu Mechaniki Cieczy i Gazów

kwota długość rury wynosi 5,67 m, z czego 0,75 m przypada na część ciśnieniową. Część próżniowa składa się z sześciu identycznych segmentów o długości 0,75 m każdy oraz jednego segmentu o długości 0,42 m zaopatrzonego w szklane okna i stanowiącego przestrzeń pomiarową. Segmenty rury uderzeniowej wykonane są z płyt stalowych grubości 6 mm zespawanych ze sobą.

Każdy segment zaopatrzone jest w kołnierze z otworami na śruby łączące. Wewnętrzne powierzchnie rury są nieobrobione. Nierówności powstające na złączach segmentów są rzędu 1 mm. Szczelność złącz uzyskuje się przez zastosowanie uszczelk gumowych.

Część ciśnieniowa oraz ostatni segment części próżniowej łączone są z resztą rury przy pomocy specjalnych urządzeń, pozwalających na szybkie ich odłączanie w celu wymiany membran oraz usuwania z rury zanieczyszczeń (kawałków membrany) dostających się tam przy każdym strzale. Membranę stanowi kilka lub kilkanaście warstw celofanu zaciskanych w złączu między częścią ciśnieniową i próżniową. Membrana jest przebijana iglicą napędzaną przy pomocy sprężyny wyzwolanej cięgiem Bowdena.

Do wyposażenia rury należy również sprężarka oraz pompa próżniowa. Sprężarka typu KP-1 (produkcji Wrocławskiej Fabryki Pomp) pozwala na uzyskanie w części ciśnieniowej ciśnienia około 10 atn. Pompa próżniowa PR-I-20 (produkcji Zakładu Budowy Maszyn Lampowych) pozwala uzyskać w części próżniowej ciśnienie absolutne 1 mm Hg w ciągu około 15 min.

3.2. Opis obsługi rury uderzeniowej. Po założeniu membrany włącza się pompę próżniową i sprężarkę, a po uzyskaniu żądanych wartości próżni i ciśnienia wyłącza się je. Następnie sprawdza się elektronową aparaturę pomiarową i przebija się membranę. Wszystkie urządzenia pomiarowe uruchamiane są automatycznie przy pomocy czujników reagujących na wzrost ciśnienia, spowodowany przejściem fali uderzeniowej.

Po strzale wyjmuje się resztki membrany, otwiera się koniec rury i przedmuchiwaniem usuwa z niej zanieczyszczenia (głównie kawałki pękniętej membrany), następnie zamyka się rurę i przygotowuje ją do następnego strzału.

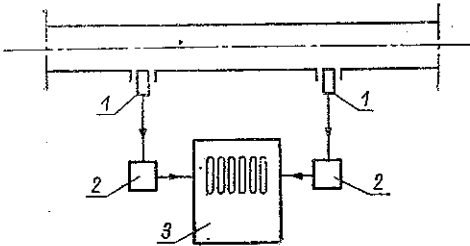
Częstość strzałów ograniczona jest przede wszystkim przez czas pracy pompy próżniowej. Wynosi ona średnio dwa do czterech strzałów na godzinę.

4. Urządzenia pomiarowe

4.1. Urządzenia do pomiaru parametrów przed falą uderzeniową. Ciśnienie przed falą uderzeniową mierzy się zależnie od jego wartości manometrem rtęciowym w postaci rurki w kształcie litery U, barometrem skróconym lub próżniomierzem kompresyjnym typu Edwardsa. Temperaturę przed falą przyjmuje się równą temperaturze otoczenia i nie wprowadza się do rury żadnego urządzenia do jej pomiaru.

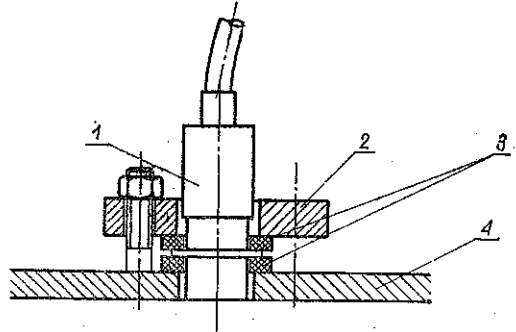
4.2. Urządzenie do pomiaru prędkości fali uderzeniowej. Prędkość fali uderzeniowej określa się na podstawie czasu jej przejścia między dwoma punktami, leżącymi w znanej odległości. Blokowy schemat układu pomiarowego podany jest na rys. 3.

Czas jest mierzony zegarem kwarcowym firmy DISA. Dokładność względna jego oscylatora kwarcowego wynosi 10^{-5} . Dokładność odczytu — $\pm 1 \mu\text{sek}$. Jako wskaźniki przejścia fali stosuje się piezoelektryczne czujniki z tytanianu baru [6]. Czułość ich wynosi około 2 V na 1 atmosferę. Czujniki te mocuje się w rurze w sposób pokazany schematycznie na rys. 4. Między czujnikami a zegarem umieszczone są



Rys. 3. Schemat blokowy układu do pomiaru prędkości fali uderzeniowej

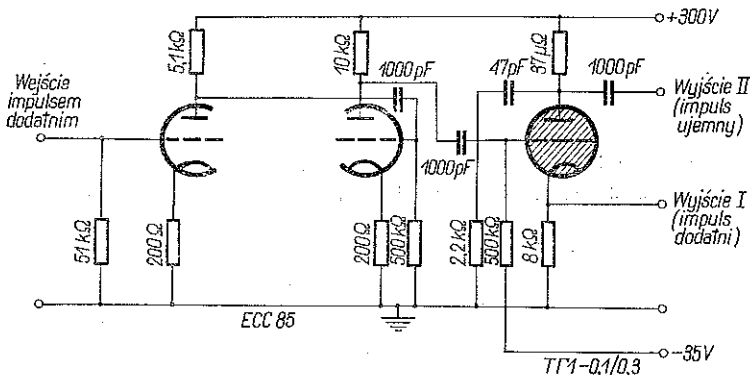
1 — czujniki piezoelektryczne, 2 — przełącznik tyratronowy, 3 — zegar kwarcowy



Rys. 4. Sposób mocowania czujników przeznaczonych do pomiaru prędkości fali uderzeniowej

1 — czujnik, 2 — stalowa płytka dociskająca, 3 — podkładki gumowe, 4 — ścianka rury uderzeniowej

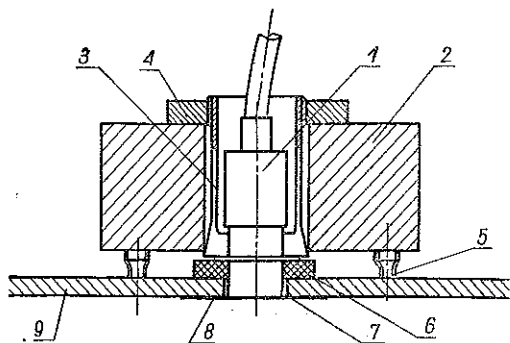
specjalne przełączniki tyratronowe własnej konstrukcji i budowy (rys. 5). Spełniają one podwójną rolę. Po pierwsze, wzmacniają impulsy z czujników i nadają im kształt pożądany ze względu na współpracę z zegarem. Po drugie, nie przepuszczają szkodliwych impulsów wywołanych drganiami rury przenoszącymi się na czujnik. Jest to możliwe dzięki temu, że drgania te mają częstotliwość niską w porównaniu z impulsem pochodzącym od fali uderzeniowej.



Rys. 5. Schemat przełącznika tyratronowego do pomiaru prędkości fali uderzeniowej

Stwierdzone zostało, że opisane urządzenie działa pewnie w całym zakresie pracy rury, tzn. mierzy prędkość fal uderzeniowych, na których przyrost ciśnienia wynosi od 7 mm Hg do 0,75 at. Dokładność pomiaru wynosi zależnie od przyjętego odcinka pomiarowego oraz od wartości mierzonej prędkości od 0,5% do 1,5%.

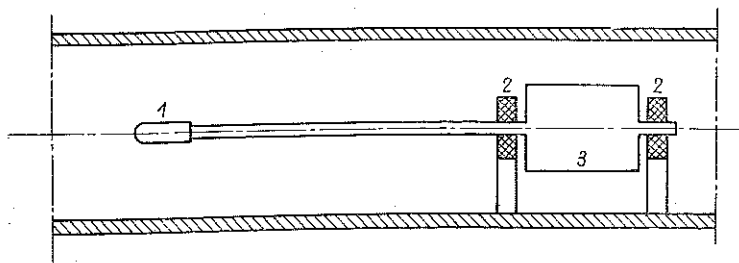
4.3. Urządzenie do pomiaru ciśnienia w czasie pracy rury. Pomiar ciśnień w czasie pracy rury wykonuje się zasadniczo przy pomocy czujników piezoelektrycznych tego samego typu, jakich użyto do pomiaru prędkości fali uderzeniowej [6].



Rys. 6. Sposób umocowania czujników do pomiaru ciśnienia na ścianie rury uderzeniowej

1 — czujnik, 2 — masa ok. 1,5 kg, 3 — tulejka zaciskowa, 4 — nakrętka, 5 — nożyki gumowe, 6 — uszczelka gumowa, 7 — gumowy pierścień centrujący, 8 — membrana, 9 — ścianki rury uderzeniowej

o podobnej konstrukcji tylko o mniejszych wymiarach w obudowie o kształcie rurki Prandtla i przymocowuje za pośrednictwem pręta do masy około 1,5 kg, ustawionej w rurze również na gumowych podporach (rys. 7).



Rys. 7. Sposób mocowania czujników do pomiaru ciśnienia całkowitego w rurze uderzeniowej

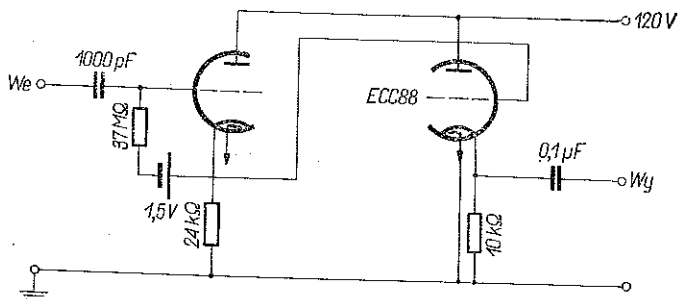
1 — czujnik piezoelektryczny w obudowie, 2 — pierścienie gumowe, 3 — masa 1,5 kg

Czujniki piezoelektryczne pracują na zasadzie gromadzenia się na elektrodach elementu czułego ładunków elektrycznych, proporcjonalnych do zmiany obciążenia mechanicznego, któremu poddany został czujnik. Jeżeli układ pomiarowy, połączony z czujnikiem, ma małą oporność wejściową, to ładunki uciekają przez tę oporność i pomiar jest w efekcie silnie zniekształcony. O wpływie ucieczki ładunków decyduje stosunek czasu trwania pomiaru do wielkości iloczynu RC (gdzie C jest sumą pojemności czujnika, pojemności wejściowej układu pomiarowego oraz pojemności kabla łączącego, a R jest wypadkową oporności wewnętrznej czujnika, oporności indukcyjności kabla oraz oporności wejściowej układu pomiarowego, połączonych równolegle). Stosunek ten powinien być dostatecznie mały. Ponieważ obniżanie jego wartości drogą zwiększenia pojemności C (np. przez równoległe

nieważ czujniki te bardzo silnie reagują na drgania, a że z powodu na możliwe zakłócenia pomiaru nie można stosować żadnych filtrów elektrycznych, przeto konieczne jest jak najlepsze odizolowanie czujnika od ścianek rury. Uzyskuje się to w przypadku pomiaru ciśnienia na ścianie rury przez sztywne połączenie go z dużą masą (około 1,5 kg, rys. 6) ustawioną na rurze na miękkich gumowych nożkach, tak że nie ma kontaktu metalicznego między czujnikami a ścianką rury.

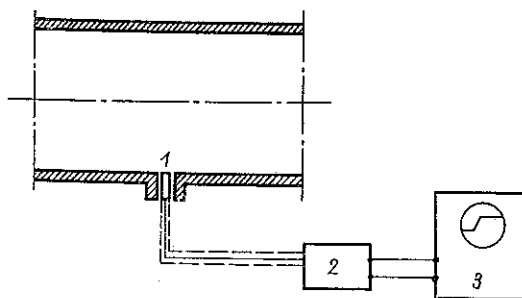
W przypadku pomiaru ciśnienia całkowitego umieszcza się czujnik

włączanie dodatkowych kondensatorów) jest niekorzystne, gdyż pogarsza czułość, przeto w omawianym urządzeniu zwiększono oporność R dzięki zastosowaniu specjalnego układu separującego [7] o oporności wejściowej około $2 \cdot 10^9 \Omega$. Schemat



Rys. 8. Schemat układu separującego o dużej oporności wejściowej

elektryczny układu separującego podany jest na rys. 8. Schemat blokowy całego urządzenia do pomiaru ciśnienia przedstawiony jest na rys. 9.



Rys. 9. Schemat blokowy urządzenia do pomiaru ciśnienia w rurze uderzeniowej

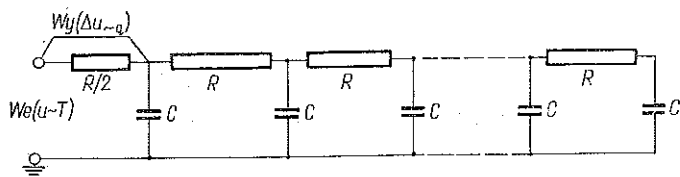
1 — czujnik, 2 — układ separujący, 3 — synchronoskop

Ponieważ oporność czujnika i izolacji kabla jest rzędu co najmniej $10^{12} \Omega$, można przyjąć $R \approx 2 \cdot 10^9 \Omega$. Pojemność C dla używanych czujników wynosi około 200 pF, [6], co daje w efekcie $RC \approx 0,4$ sek. Gdy czas pomiaru nie przekracza 4 milisekund, błąd wywołany ucieczką ładunków jest mniejszy od 1%.

4.4. Urządzenie do pomiaru temperatury powierzchni opływanej oraz strumienia ciepła. Do pomiaru temperatury powierzchni opływanej używa się czujników w postaci wąskiego paska cienkiej folii platynowej nałożonej na szkło [8]. Folię tę uzyskuje się malując płytkę szklaną farbą zawierającą platynę (Hanovia Liquid Bright Platinum 05-x), a następnie wypalając ją w temperaturze bliskiej temperatury mięknienia szkła. Uzyskuje się w ten sposób warstwę platyny o grubości rzędu $0,1 \mu$ bardzo silnie związaną w podłożem.

Czujniki wykonane tą metodą pracują na zasadzie termometru oporowego. Ich czas reakcji jest mniejszy od 1 μ sek. Pozwalają one mierzyć temperatury do kilkuset stopni C.

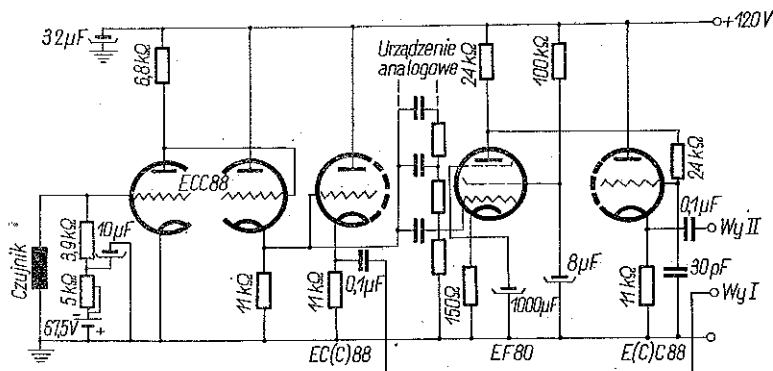
Dla określenia prędkości wymiany ciepła (strumienia ciepła) przez powierzchnię ciała opływanego gazem należy rozwiązać równanie przewodnictwa ciepła wewnątrz ciała przy danym (zmierzonym) przebiegu temperatury na powierzchni. Z reguły przyjmuje się, że zagadnienie jest jednowymiarowe, niemniej jednak obliczenia są kłopotliwe [8]. Z tego też względu zastosowano proste urządzenie analogowe wykonując powyższe zadanie równocześnie z pomiarem temperatury [9]. Urządzenie to działa na zasadzie analogii między przepływem ciepła wewnątrz jednorodnego sztywnego pręta, a przepływem prądu elektrycznego wewnątrz linii długiej o oporności i pojemności rozłożonej w sposób ciągły. Schemat pokazano na rys. 10.



Rys. 10. Urządzenie analogowe do pomiaru strumienia ciepła

Przy podanych na schemacie wartościach oporności i pojemności oporów i kondensatorów okres prawidłowej pracy urządzenia zaczyna się około $10 \mu\text{sek.}$, a kończy około $1160 \mu\text{sek.}$ od chwili rozpoczęcia zmiany temperatury. W tym czasie urządzenie rozwiązuje równanie przewodnictwa z błędem mniejszym niż 1%.

Równocześnie z powyższym urządzeniem analogowym zbudowany został wzmacniacz o niskim poziomie szumów (rys. 11). Okazał się on konieczny przy pomiarach niewielkich strumieni ciepła ze względu na bardzo małą wartość uzyskiwanego impulsu. Przy użyciu tego wzmacniacza możliwy jest pomiar strumienia ciepła o wartości nie mniejszej niż 3 W/cm^2 .



Rys. 11. Schemat elektryczny urządzenia do pomiaru temperatury powierzchni ciała opływanego, oraz prędkości wymiany ciepła

4.5. Urządzenie do wizualizacji przepływu. Do wyposażenia rury uderzeniowej Zakładu Mechaniki Cieczy i Gazów należy jeszcze aparatura do zdjęć smugowych IAB-451 pozwalająca na fotografowanie obrazu przepływu w rurze. W związku

z krótkotrwałością przepływu w rurze okazało się rzeczą konieczną budowa specjalnego urządzenia błyskowego do współpracy z aparaturą ИАБ-451. Urządzenie to daje błysk trwający około $1,5 \mu\text{sek.}$, o energii regulowanej w zakresie od 0,5 do 5 dżuli. Błysk wyzwalany jest impulsem z jednego z czujników mierzących prędkość fali uderzeniowej. Odstęp między impulsem wyzwalającym a błyskiem może być regulowany w zakresie od 100 do $5000 \mu\text{sek.}$ z dokładnością do $5 \mu\text{sek.}$

5. Wstępne badania w rurze uderzeniowej

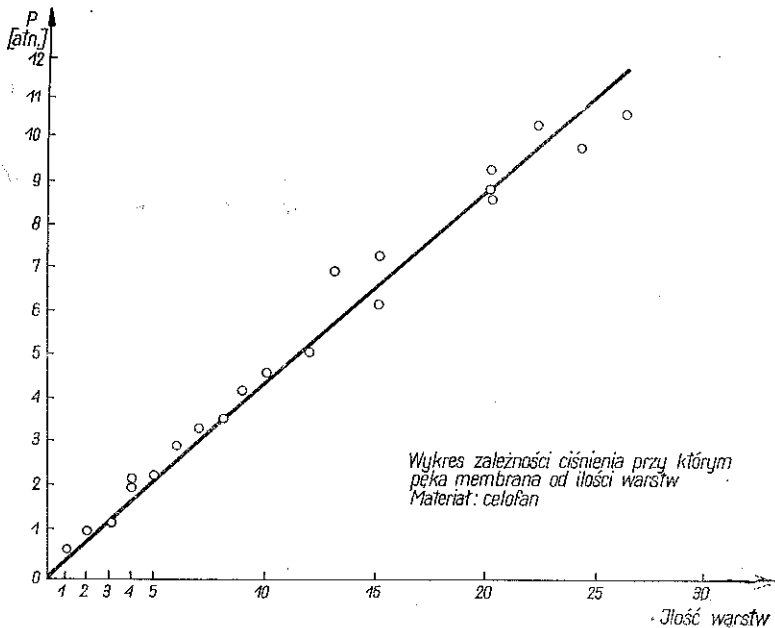
5.1. Badanie membran [10]. Badanie membran było etapem, od którego praca przy rurze uderzeniowej musiała się rozpocząć. Celem jego było wybranie materiału na membrany, spełniającego szereg wymagań, mianowicie:

1) pękającego w sposób możliwie najbardziej zbliżony od «idealnego» (odpowiadającego natychmiastowemu i całkowitemu usunięciu membrany z przekroju rury);

2) mającego możliwie niski rozrzut wytrzymałości i równocześnie wytrzymałość dostatecznie wysoką;

3) dającego w wyniku pęknięcia jak najmniejszą ilość odpadków, które nie byłyby przy tym groźne dla znajdującego się w rurze modelu;

4) taniego i łatwo dostępnego w handlu.



Rys. 12

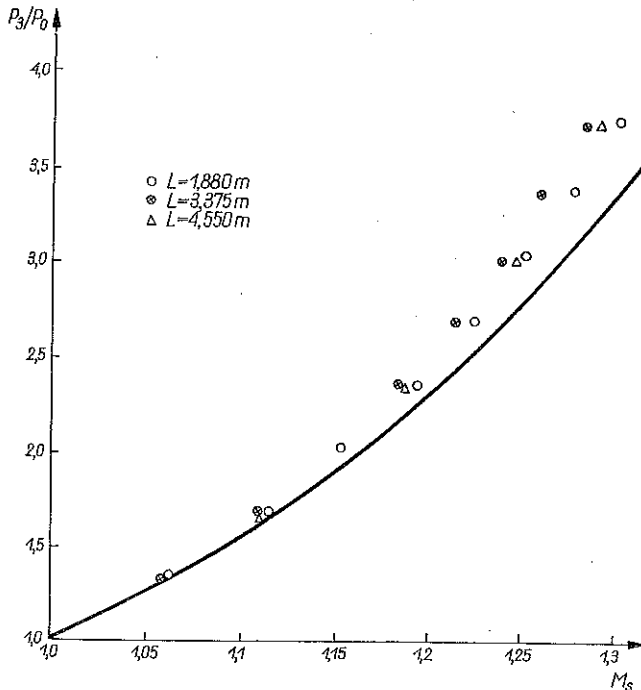
Metoda badania była następująca. Membranę zamocowaną między komorą ciśnieniową a specjalnie do tego celu wykonanym kołnierzem obciążano aż do rozerwania, wpuszczając do komory ciśnieniowej sprężone powietrze. Przy każdej

próbie mierzono ciśnienie, przy którym membrana pękła, oraz obserwowano wizualnie sposób jej zachowania się.

Spośród zbadanych materiałów (blacha mosiężna 0,1 mm grubości, blacha aluminiowa 0,15 mm grubości, octan celulozy, polietylen i celofan) dla ciśnień stosowanych w rurze uderzeniowej Zakładu Mechaniki Cieczy i Gazów za najlepszy uznano celofan. Spełniał on najlepiej pierwsze dwa oraz ostatni z żądanych warunków. Ilość odpadków, jaką dawał, była niestety stosunkowo duża, nie były one jednak na ogół groźne dla przedmiotów znajdujących się w rurze.

Rysunek 12 podaje zależność różnicy ciśnień, przy której membrana z celofanu samoczynnie pęka, od ilości warstw. Widać z niego, że zależność ta jest liniowa, jednak rozrzut punktów jest na tyle duży, że ze względu na powtarzalność zjawisk nie można się obejść bez urządzenia przebijającego membranę.

5.2. Pomiar prędkości fali uderzeniowej [5]. Pomiar prędkości fali uderzeniowej był drugim z kolei etapem prac przy rurze uderzeniowej Zakładu Mechaniki Cieczy i Gazów. Miał on zasadniczo dwa cele: określenie rzeczywistej zależności prędkości fali od stosunku ciśnień po obu stronach membrany oraz określenie rozrzutu uzyskiwanych wyników. Ma to duże znaczenie praktyczne.

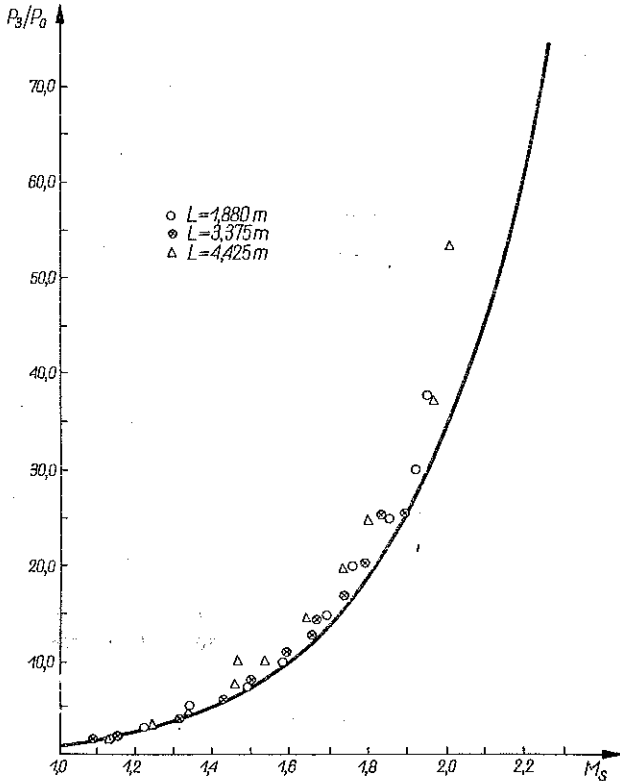


Rys. 13

Znajomość ich jest z jednej strony konieczna dla określenia warunków początkowych (ciśnień w części ciśnieniowej i próżniowej rury) niezbędnych dla otrzymania żądanych parametrów przepływu w rurze, z drugiej — pozwala znaleźć

prawdopodobieństwo ich uzyskania. Dodatkowo znajomość tych rzeczy umożliwia porównanie rury uderzeniowej Zakładu Mechaniki Cieczy i Gazów z innymi rurami pod względem jakości.

Wykonane zostały dwie serie pomiarów. W pierwszej z nich — ciśnienie w części próżniowej, w drugiej natomiast — w części ciśnieniowej było stałe i równe atmosferycznemu. Prędkość fali mierzono w trzech odległościach od membrany: 1,880 m, 3,375 m i 4,550 m.



Rys. 14

Wyniki pomiarów podane są na rys. 13 i 14. Widać z nich, że rzeczywista prędkość fali uderzeniowej przy danym stosunku ciśnień jest mniejsza od teoretycznej [obliczonej na podstawie zależności (2.6)] z tym, że maleje ona wraz ze wzrostem odległości od membrany. Krzywa teoretyczna na wykresie jest zaznaczona linią ciągłą. Z rysunków tych widać również, że rozrzut wartości prędkości fali uderzeniowej (a raczej liczby Macha) dla fali M_s jest dość duży, sięga bowiem 5%.

Ze względu na to, że parametry przepływu w rurze zależą od kwadratu liczby Macha fali [wzory (2.1)–(2.5)] można się spodziewać ich powtarzalności w granicach 10%, co należy brać pod uwagę przy planowaniu doświadczeń. Jest przy tym rzeczą oczywistą, że przy każdym doświadczeniu należy mierzyć prędkość fali uderzeniowej.

Porównanie pomiarów prędkości fali uderzeniowej wykonanych w rurze ZMCiG z analogicznymi pomiarami wykonanymi w innych rurach [1, 3 i 11] wskazuje, że z tego punktu widzenia jakość rury ZMCiG nie odbiega zasadniczo od jakości przeciętnych urządzeń tego typu.

5.3. Badanie jednorodności przepływu w rurze. Pełne badanie jednorodności przepływu w rurze uderzeniowej powinno zasadniczo obejmować pomiary ciśnienia statycznego, ciśnienia całkowitego, temperatury i strumienia ciepła na ściance rury, temperatury i strumienia ciepła w punkcie spiętrzenia oraz badania wizualne przy pomocy aparatury do zdjęć smugowych.

Dotychczas wykonano pomiary ciśnienia statycznego (czujnikiem umieszczonym w ściance rury), temperatury powierzchni ścianki rury oraz temperatury i strumienia ciepła w punkcie spiętrzenia, (wszystko w obszarze między falą uderzeniową a powierzchnią rozdziału). Typowe przebiegi tych wielkości podane są na rys. 15-17. Wykresy ciśnienia statycznego oraz temperatury powierzchni i strumienia ciepła w punkcie spiętrzenia zdają się wskazywać na dość dobrą jednorodność przepływu za falą uderzeniową. Z drugiej strony wykresy temperatury powierzchni ścianki zdają się temu przeczyć. Sprawa ta wymaga jeszcze bliższego wyjaśnienia.

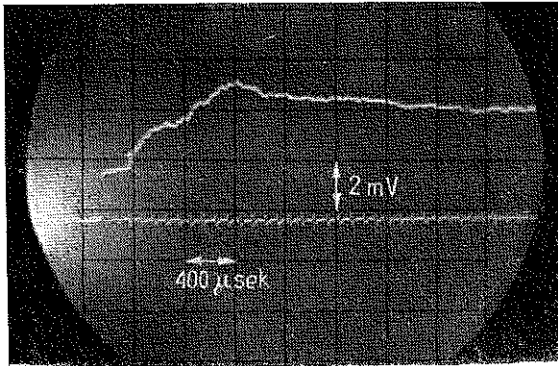
6. Możliwości zastosowania rury uderzeniowej Zakładu Mechaniki Cieczy i Gazów

Ze względu na niezbyt wysokie parametry przepływu, jakie można osiągnąć w rurze uderzeniowej Zakładu Mechaniki Cieczy i Gazów rura ta nadaje się wyłącznie do studiowania zagadnień o charakterze klasycznym, jak struktura i współdziałanie niezbyt silnych fal uderzeniowych, opływ brył o rozmaitych kształtach przy niewysokich liczbach Macha itp. Poza tym rura ta może być i była już z powodzeniem stosowana jako urządzenie do bezwzględnego skalowania czujników do pomiaru szybkozmiennych ciśnień, mikrofonów itp. [5 i 12]. Ze względu jednak na rosnące zainteresowanie przepływami przy wysokich temperaturach z uwzględnieniem reakcji chemicznych oraz jonizacji przewiduje się budowę nowej rury uderzeniowej, mogącej sprostać wymaganiom stawianym jej przy badaniu tych zjawisk.

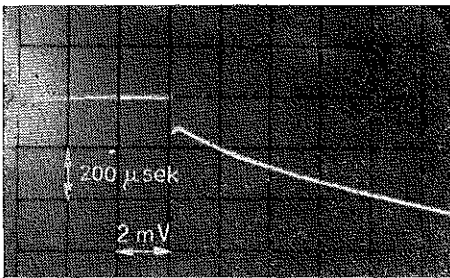
7. Wnioski

1. Rura uderzeniowa jest bardzo wygodnym i tanim urządzeniem do wytwarzania krótkotrwałego przepływu o dużej prędkości i wysokiej temperaturze. Z uwagi jednak na czas trwania przepływu zazwyczaj poniżej jednej milisekundy konieczne jest wyposażenie jej w nowoczesną elektroniczną aparaturę pomiarową.

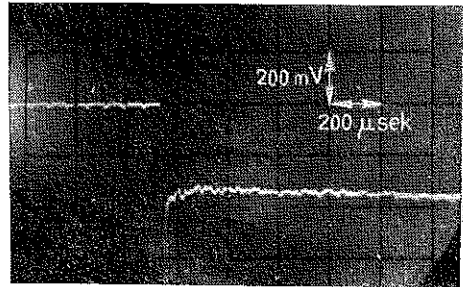
2. Rura uderzeniowa Zakładu Mechaniki Cieczy i Gazów jest dość typową rurą dla niewysokich parametrów przepływu, nie odbiegającą pod względem jakości od innych rur podobnego typu. Wyposażenie jej jest również dość typowe i pozwala na wykonanie podstawowych badań w zakresie struktury i współdziałania fal uderzeniowych oraz opływu brył o różnych kształtach.



Rys. 15



Rys. 16



Rys. 17

3. Ze względu na rosnące zainteresowanie przepływami przy bardzo wysokich temperaturach z uwzględnieniem reakcji chemicznych i jonizacji (zjawisk tych w obecnej rurze nie da się wywołać) konieczna jest budowa nowej rury uderzeniowej mogącej sprostać tym wymaganiom.

Dodatek

Uproszczona postać wzorów (2.1)-(2.11) w przypadku gdy zachodzą następujące zależności: $a_1 = a_4$ i $\kappa_1 = \kappa_4 = 1,4$

$$(D1) \quad p_2 = p_1 \frac{1}{6} (7M_s^2 - 1),$$

$$(D2) \quad T_2 = T_1 \frac{(7M_s^2 - 1)(M_s^2 + 5)}{36 M_s^2},$$

$$(D3) \quad M_2 = \frac{5(M_s^2 - 1)}{[(7M_s^2 - 1)(M_s^2 + 5)]^{1/2}},$$

$$(D4) \quad T_3 = T_1 \left[1 - \frac{1}{6} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \right]^2,$$

$$(D5) \quad M_s = \frac{5 \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right)}{6 - \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right)},$$

$$(D6) \quad \frac{p_4}{p_1} = \frac{1}{6} (7M_s^2 - 1) \left[1 - \frac{1}{6} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \right]^{-7},$$

$$(D7) \quad \Delta t_2 = \frac{x'}{a_1} \frac{M_s^2 + 5}{5M_s(M_s^2 - 1)},$$

$$(D8) \quad x' \leq x_1 \frac{10(M_s^2 - 1)(2M_s^2 + 1)}{3M_s^2(7M_s^2 - 1)},$$

$$x_4 \geq x_1 \frac{2(2M_s^2 + 1) \left[1 - \frac{1}{6} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \right]^3}{M_s(7M_s^2 - 1)},$$

$$(D9) \quad \Delta t_3 = \frac{x''}{a_1} \frac{\left[6 - \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \right]}{5 \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \left[\left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) - 1 \right]}$$

$$(D10) \quad x'' \leq x_4 \frac{\left[\left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) - 1 \right]}{\left[1 - \frac{1}{6} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \right]^3},$$

$$(D11) \quad x_4 \geq x_1 \frac{2(2M_s^2 + 1) \left[1 - \frac{1}{6} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \right]^3}{M_s(M_s - 1)(4M_s + 1)},$$

$$(D11) \quad M_s \geq \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \approx 1,6181.$$

Literatura cytowana w tekście

- [1] B. D. HENSHALL, *On some aspects of the use of shock tubes in aerodynamic research*, Aero. Res. Coun. R. & M., 3044 (1957).
- [2] I. I. GLASS, J. G. HALL, *Shock tubes UTIA review*, 12, May 1958.
- [3] I. I. GLASS, G. N. PATTERSON, *A theoretical and experimental study of shock tube flows*, J. Aero. Sci., 2, 22 (1953), 73-100.
- [4] Z. A. WALENTA, *Opis techniczny rury uderzeniowej i niektóre wnioski natury eksploatacyjnej*, Sprawozd. nr 1/62 Zakł. Mech. Cieczy i Gazów, W-wa 1961.
- [5] Z. A. WALENTA, *Pomiar prędkości fali uderzeniowej w rurze uderzeniowej Zakładu Mechaniki Cieczy i Gazów*, Sprawozd. nr 19/62 Zakładu Mech. Cieczy i Gazów, Warszawa 1962.

[6] Z. A. PIETRZYK, Z. A. WALENTA, *Zastosowanie czujników piezoelektrycznych do pomiaru szybkozmiennych ciśnień w rurze uderzeniowej*, Rozpr. Inżyn., 1, 12 (1964).

[7] E. PROCOPOVICI, L. DUMITRESCU, *Masurarea presiunilor aerodinamice in tubul de soc. Studii si Cercetari de Mecanica Aplicata 1*, Anl. XII, 1961. Editura Acad. Rep. Populare Romine.

[8] J. G. HALL, A. HERTZBERG, *Recent advances in transient surface temperature thermometry*, Jet Propulsion, 11, 28 (November 1958).

[9] R. F. MEYER, *A Heat-Flux-Meter for use with thin film surface thermometers*, National Research Council of Canada, Aeronautical Report LR, 279, April 1960.

[10] Z. A. WALENTA, *Badanie membran do rury uderzeniowej Zakładu Mechaniki Cieczy i Gazów*, Sprawozdanie nr 5/62 Zakładu Mechaniki Cieczy i Gazów, Warszawa 1962.

[11] R. L. TRIMPI, N. B. COHEN, *A non-linear theory for predicting the effects of unsteady laminar, turbulent or transitional boundary layers on the attenuation of shock waves in shock tube with experimental comparison*, NACA TN 4347.

[12] Z. A. WALENTA, *Cechowanie mikrofonów piezoelektrycznych przy pomocy rury uderzeniowej*, PAN IPPT Zakład Badania Drgan, pracownia 9, Sprawozdanie wewnętrzne, 1963.

Резюме

УДАРНАЯ ТРУБА. ИЗМЕРЕНИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

В настоящей работе проводятся теоретические рассуждения по возможности и целесообразности применения ударной трубы к аэродинамическим исследованиям (в качестве аэродинамического туннеля с коротким временем работы), описание этой трубы и, наконец, результаты предварительных исследований проведенных с помощью этой трубы.

Констатируется, что рассматриваемая труба не разнится с качественной точки зрения от других труб такого-же типа. Как самая труба, так и ее оснащение измерительной аппаратурой, дает возможность исследовать некоторые явления основного характера. Ввиду увеличивающейся заинтересованности течениями газов при высоких температурах (с учетом химических реакций и ионизации) необходимо изготовить новую трубу, в которой эти явления можно было вызвать.

Summary

THE SHOCK TUBE. MEASUREMENTS AND CONCLUSIONS

The present paper contains theoretical investigations concerning the possibility and sense of applying a shock tube to aerodynamic investigations (as a wind tunnel of very short working period), a description of the shock-tube constructed for the Department of Mechanics, IBTP P.A.S. and, finally, the results of preliminary tests carried out by means of this tube.

It is found that the quality of the tube is the same as that of other tubes of the same type. The tube and its measuring equipment enables the investigation of certain fundamental phenomena. In view of the growing interest in gas flow at elevated temperatures (chemical reactions and ionization phenomena being accounted for) it is necessary to build a new tube, enabling these phenomena to be produced.

ZAKŁAD MECHNIKI CIECZY I GAZÓW
INSTYTUTU PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN

Praca została złożona w Redakcji dnia 20 lutego 1964 r.