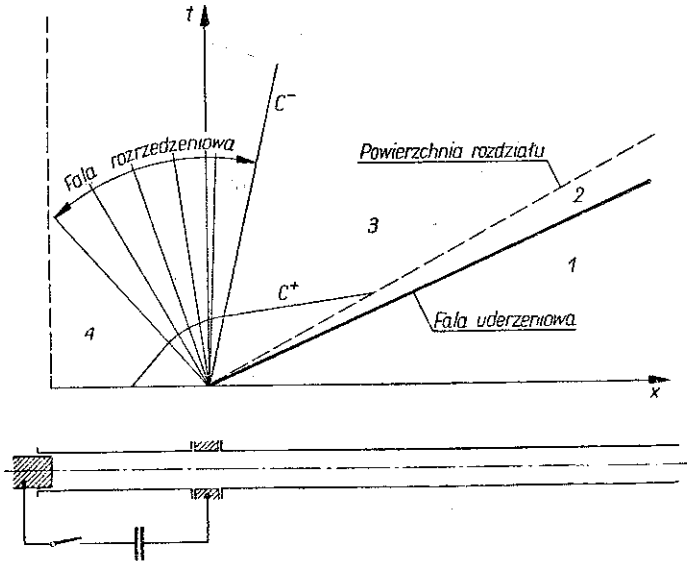


OBLICZANIE PARAMETRÓW PRZEPŁYWU W RURZE UDERZENIOWEJ
Z UWZGLĘDNIENIEM JONIZACJI

EUGENIUSZ NOWAK (WARSZAWA)

1. Wstęp. Zajmiemy się przybliżonym obliczeniem wartości parametrów przepływu w elektrycznych rurkach uderzeniowych z osiowymi elektrodami przy użyciu uproszczonych modeli przepływu i ośrodka. Doświadczalnie zaobserwowano, że w rurkach tych prędkość fali uderzeniowej jest prawie stała [1, 2 i 3]. Obserwacja ta stała się podstawą opisanego przepływu przy użyciu modelu klasycznej rury uderzeniowej. Wzrost ciśnienia w komorze (pomiędzy elektrodami rurki) spowodowany jest natychmiastowym podgrzaniem gazu. Uproszczeniem dotyczącym ośrodka jest zastąpienie dyskretnej jonizacji przez model jonizacji ciągłej. Dzięki temu otrzymane wyniki można stosować do wielu gazów i rurek.

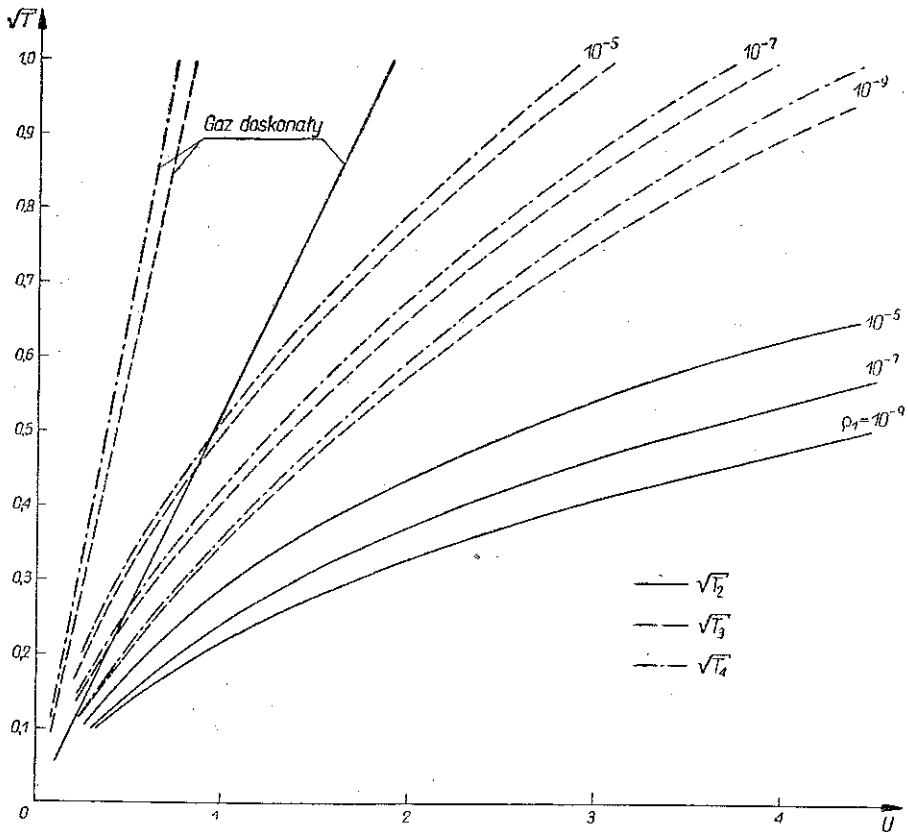


Rys. 1. Schemat przepływu z podziałem na obszary oraz schemat elektrycznej rurki uderzeniowej

2. Model ośrodka. Obliczenia odnoszą się do opisu zjawisk, w których występuje jonizacja gazu i z tego powodu nie można stosować równania stanu gazu doskonałego. Równania fizyki statystycznej są niewygodne ze względu na złożoną ich postać i dużą liczbę parametrów opisujących stan gazu (przewyższającą liczbę elektronów

w atomie), co w znacznym stopniu komplikuje obliczenia. Poza tym należałoby je wykonać dla każdego gazu osobno. Dlatego do obliczeń wygodnie jest stosować uproszczone modele wielokrotnej jonizacji gazu [4 i 5]. W pracy korzystano z modelu wprowadzonego w pracy [5].

Poniżej będziemy używali bezwymiarowych parametrów gazu, określonych jako ilorazy przez stałe charakterystyczne, zdefiniowane w pracy [5] [wzór (2.32) i (5.8) oraz podane w tablicach].



Rys. 2. Wykres temperatury w zależności od prędkości fali uderzeniowej i gęstości początkowej

Będziemy je oznaczać w sposób następujący: T oznacza temperaturę, p ciśnienie, ρ gęstość, U prędkość fali uderzeniowej, u prędkość gazu, a prędkość dźwięku, $i = mI/RT^*$ entalpię właściwą oraz $s = mS/R$ entropię właściwą (wzór (2.31) w pracy [5]).

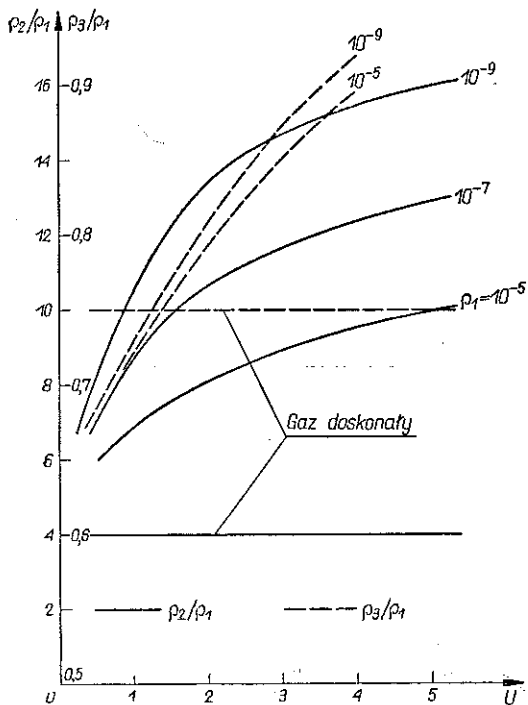
3. Model przepływu. Do opisu przepływu w elektrycznej rurce uderzeniowej (rys. 1) przyjęto model klasycznej rury uderzeniowej. Przyjęcie tego modelu pozwala podzielić przepływ na następujące obszary (rys. 1): 1) niezaburzony gaz przed falą uderzeniową, 2) gaz w ruchu jednostajnym za falą uderzeniową, 3) gaz w ruchu jednostajnym za powierzchnią rozdziału, 3-4) prosta fala rozrzedzeniowa, 4) gorący gaz w spoczynku.

Stosowanie modelu klasycznej rury uderzeniowej do rury elektrycznej wymaga m.in. spełnienia następujących warunków: czas dostarczania energii do obszaru 4 jest nieskończenie krótki, w każdym z obszarów istnieje równowaga termodynamiczna oraz przepływ jest jednowymiarowy. Warunki te nie są ściśle spełnione, wobec tego należy się spodziewać, że otrzymane wyniki będą przybliżone.

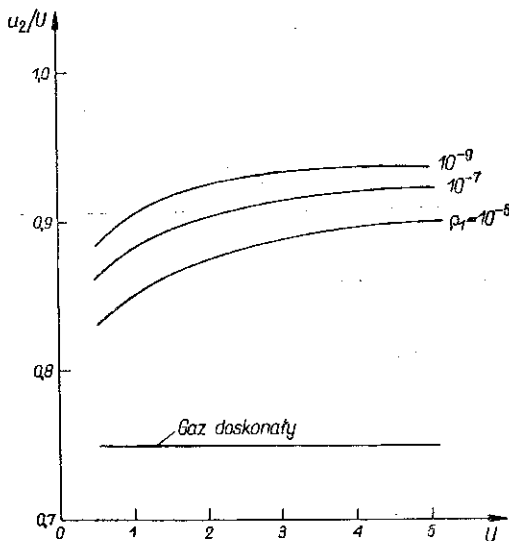
Dla uproszczenia obliczeń przyjmujemy następujące założenia dodatkowe:

$$(3.1) \quad p_1 \ll \rho_1 U^2, \quad \varrho_1 = \varrho_4;$$

indeksy 1, 2, 3 i 4 określają obszary przepływu (rys. 1).



Rys. 3. Wykres gęstości za falą uderzeniową i powierzchnią rozdziału w zależności od prędkości fali uderzeniowej i gęstości początkowej



Rys. 4. Wykres prędkości gazu od prędkości fali uderzeniowej i gęstości początkowej

Przy powyższych założeniach równania Hugoniota-Rankina napiszemy następująco:

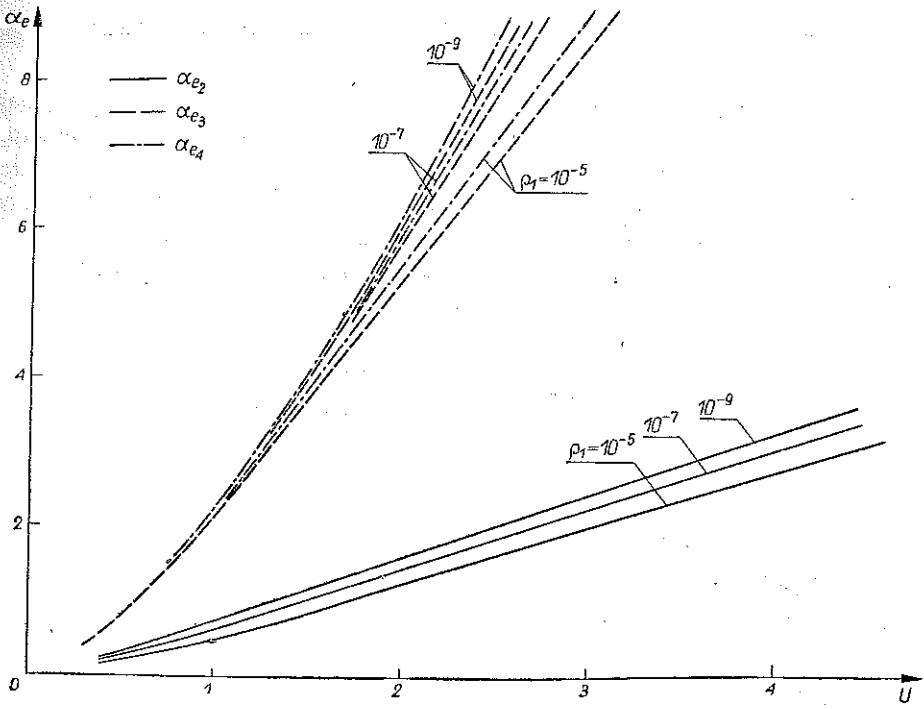
$$(3.2) \quad \rho_1 U = \rho_2 (U - u_2), \quad \rho_1 U^2 = p_2 + \rho_2 (U - u_2)^2, \quad \frac{U^2}{2} = i_2 + \frac{(U - u_2)^2}{2}.$$

Na powierzchni rozdziału muszą być spełnione następujące warunki:

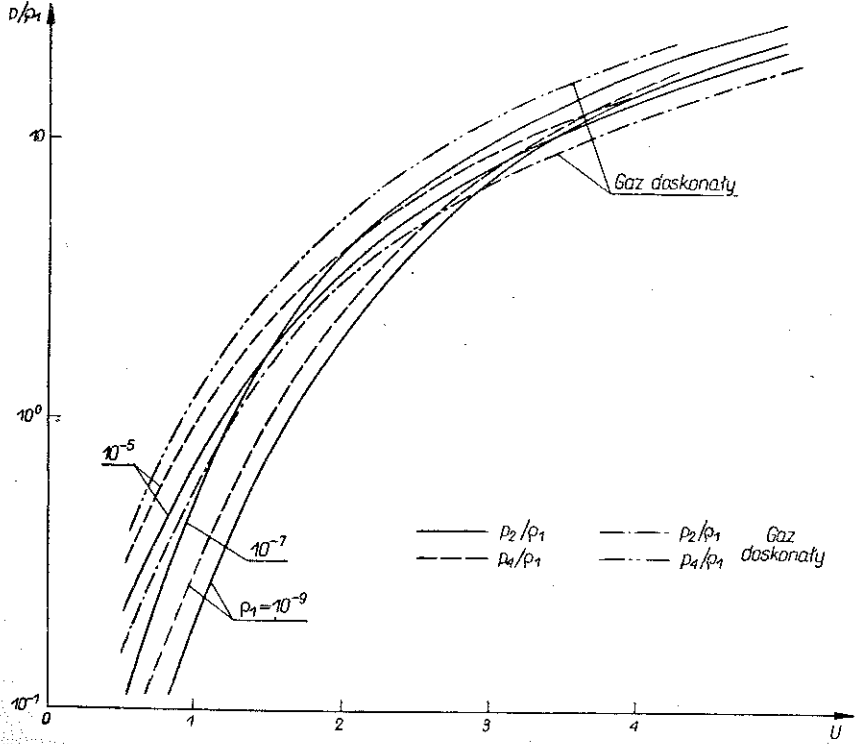
$$(3.3) \quad u_2 = u_3, \quad p_2 = p_3.$$

W obszarze 3-4 przepływ jest izentropowy. Wobec tego parametry gazu po obu stronach fali rozrzedzeniowej spełniają następujące równania:

$$(3.4) \quad dS = 0, \quad u_3 = \int_{\varrho_3}^{\varrho_4} \frac{a(\varrho, s)}{\varrho} d\varrho,$$



Rys. 5. Wykres stopnia jonizacji gazu w zależności od prędkości fali uderzeniowej i gęstości początkowej



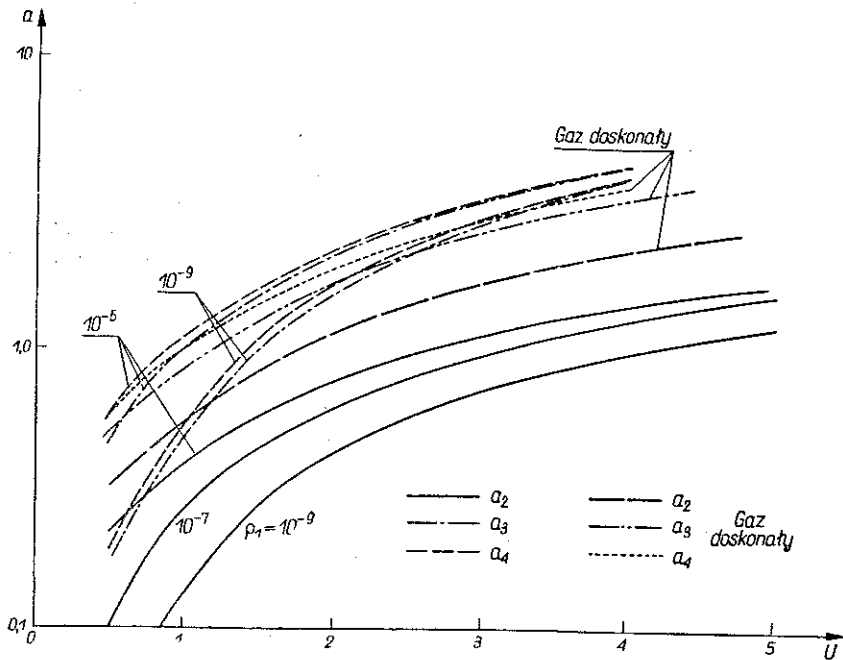
Rys. 6. Wykres ciśnienia w zależności od prędkości fali uderzeniowej gęstości początkowej

gdzie

$$a^2(\varrho, s) = \left(\frac{\partial p}{\partial \varrho} \right)_{s = \text{const}}$$

Równania (3.1)–(3.4) w połączeniu ze związkami termodynamicznymi tworzą zamknięty układ równań.

4. Wyniki. Wymieniony wyżej układ równań algebraicznych nieliniowych rozwiązano numerycznie, odrzucając rozwiązania nie mające sensu fizycznego (zmniejszanie się entropii, urojone lub ujemne wartości parametrów). Wyniki obliczeń w postaci wykresów jako funkcje prędkości fali uderzeniowej U i gęstości początkowej ϱ_1 przedstawiono na rys. 2–7. Na tych rysunkach dla porównania naniesiono również wykresy dla jednoatomowego gazu doskonałego.



Rys. 7. Wykres prędkości dźwięku w zależności od prędkości fali uderzeniowej i gęstości początkowej

Z podanych wykresów dla parametrów przepływu widać, że wykresy dla gazu, w którym następuje zjawisko jonizacji, i dla gazu doskonałego wyraźnie się różnią [z wyjątkiem funkcji $p(U, \varrho)/\varrho_1$ (rys. 6)].

Natomiast parametry gazu po obu stronach fali rozrzedzeniowej (obszar 3–4) różnią się nieznacznie (rys. 2 i 3).

W punktach odpowiadających powierzchni rozdziału na wykresach temperatury gęstości i stopnia jonizacji występują duże skoki.

Literatura cytowana w tekście

1. V. JOSEPHSON, *Production of high velocity shock*, J. Appl. Phys. 1, 29 (1958).
2. Z. A. PIETSZYK, *Investigation of flow through an electromagnetic shock tube. Selection of optimum parametry and preliminary results*, Arch. Mech. Stos., 5, 15 (1963), 587-597.
3. Z. MUCHA, Z. A. PIETSZYK, *Wyznaczenie energii dostarczonej do elektrycznej rurki uderzeniowej* Rozpr. Inżyn., 2, 14 (1966).
4. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер, *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*, Москва 1963, 166.
5. A. SZANIAWSKI, *La vitesse dû et l'adiabate d'Hugoniot pour des gaz inertes lourds, partiellement ionisés*, Arch. Mech. Stos., 3/4, 14 (1962), 565.

Резюме

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ В УДАРНОЙ ТРУБЕ С УЧЕТОМ ИОНИЗАЦИИ

Темой работы является определение зависимости термодинамических параметров для электрической ударной трубы. Течение описывается с помощью классической модели ударной трубы. Для среды принимается модель многократного ионизованного газа введенной А. Шанявским. Во всех областях течения предполагается термодинамическое равновесие, пренебрегая диссипацией. С помощью численных методов определяются зависимости параметров течения (температуры, плотности, скорости течения, степени ионизации, давления и скорости звука) в зависимости от скорости ударной волны и начальной плотности в трубке.

Summary

COMPUTATION OF FLOW PARAMETERS IN A SHOCK TUBE, IONIZATION BEING TAKEN INTO CONSIDERATION

The aim of the present paper is to determine the thermodynamic parameters of an electric shock tube. The flow is described by means of the classical shock tube. The body is described using the scheme of a multiply ionized gas introduced by A. SZANIAWSKI. Thermodynamic equilibrium is assumed in every region dissipation being disregarded. The relations between the flow parameters (temperature, density, velocity of flow, degree of ionization, pressure and velocity of sound) and the shock-wave velocity and initial density in the tube are obtained by numerical methods

ZAKŁAD MECHANIKI CIECZY I GAZÓW
INSTYTUTU PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN

Praca została złożona w Redakcji dnia 22 kwietnia 1965 r.