

WYZNACZANIE ENERGII DOSTARCZONEJ DO ELEKTRYCZNEJ RURKI UDERZENIOWEJ

Z. MUCHA i Z. A. PIETRZYK (WARSZAWA)

1. Wstęp

Elektryczne rurki uderzeniowe służą do wytwarzania silnych fal uderzeniowych. Spośród tych urządzeń elektryczne rurki uderzeniowe o osiowej elektrodzie [1] wyróżniają się tym, że w stosunkowo dużej części rury prędkość fali uderzeniowej jest stała [1 i 2]. Fakt ten ułatwia badanie zjawisk zachodzących w gazie za silną falą uderzeniową, ponieważ przepływ można w przybliżeniu uważać za ustalony.

Prostota i wszechstronność zastosowań elektrycznych rurek uderzeniowych skłania do badań prowadzących do lepszego ich poznania i wykorzystania. Jedną z wielkości charakteryzujących rurkę uderzeniową jest energia, jaka jest dostarczona do gazu w czasie jednego wyładowania. Prędkość wytworzonej fali uderzeniowej jest m.in. funkcją tej wielkości.

Celem pracy jest przedstawienie pewnej prostej metody wyznaczania energii dostarczonej do rurki uderzeniowej na podstawie zależności natężenia prądu elektrycznego od czasu w obwodzie wyładowania. Metodę tę zastosowano do wyznaczania energii dostarczonej do napełnionej azotem elektrycznej rurki uderzeniowej o elektrodzie osiowej.

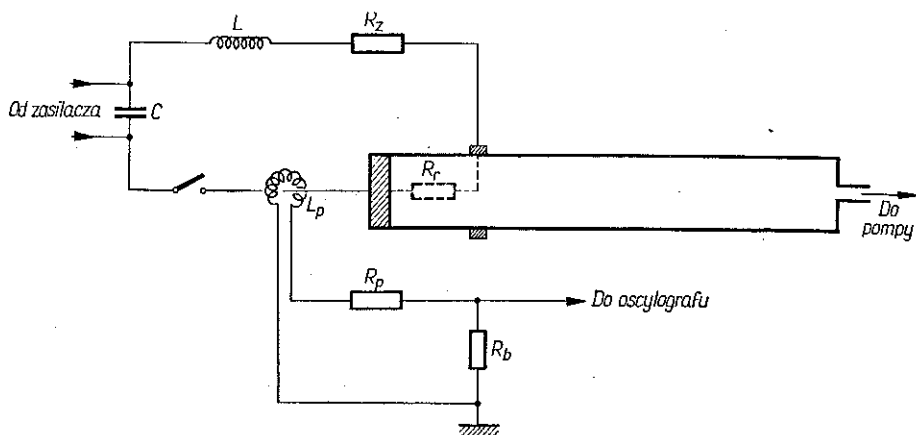
W pracach [1 i 2] stwierdzono, że w elektrycznych rurkach uderzeniowych dla pewnego poziomu energii baterii kondensatorów prędkość wytwarzanej fali uderzeniowej osiąga maksimum, a następnie wartość jej spada. Jest to pewne ograniczenie dla zastosowania tego typu urządzeń. Celem tej pracy jest również próba wyjaśnienia tego zjawiska.

2. Układ doświadczalny i pomiary wstępne

Schemat rurki uderzeniowej oraz obwodu elektrycznego z nią sprzężonego przedstawiono na rys. 1. Zastosowana rurka uderzeniowa o osiowej elektrodzie posiada średnicę 8 mm i długość 21 cm, a odległość między elektrodami wynosi 10 mm. Kondensatory o łącznej pojemności 0,97 μF rozmieszczono na obwodzie dwóch tarcz kołowych, które połączono z elektrodami rurki. Taki układ zapewnia niską indukcyjność obwodu elektrycznego. Do zapłonu używano iskiernika gazowego pracującego pod normalnym ciśnieniem. Napięcie początkowe baterii kondensatorów w czasie pomiarów zmieniono w przedziale od 8 do 17 kV. Doświadczenia

przeprowadzono w azocie przy dwóch wartościach ciśnień początkowych w rurce: 0,5 i 5,0 mmHg.

W obwodzie wyładowania natężenie prądu mierzono za pomocą pasa Rogowskiego, okalającego przewodnik (rys. 1). Cewka pasa została zwarta małym oporem bezindukcyjnym $R_b = 0,10 \Omega$. Wykonano ją z miedzianego drutu o średnicy 2 mm; ilość zwojów wynosiła 195, a ich średnica 20 mm. Średnica toroidu wynosi 200 mm. Indukcyjność pasa $L_p = 19,2 \mu\text{H}$, a opór omowy $R_p = 0,06 \Omega$.



Rys. 1. Schemat układu elektrycznego

Parametry pasa Rogowskiego dobrano w ten sposób, aby był spełniony następujący warunek:

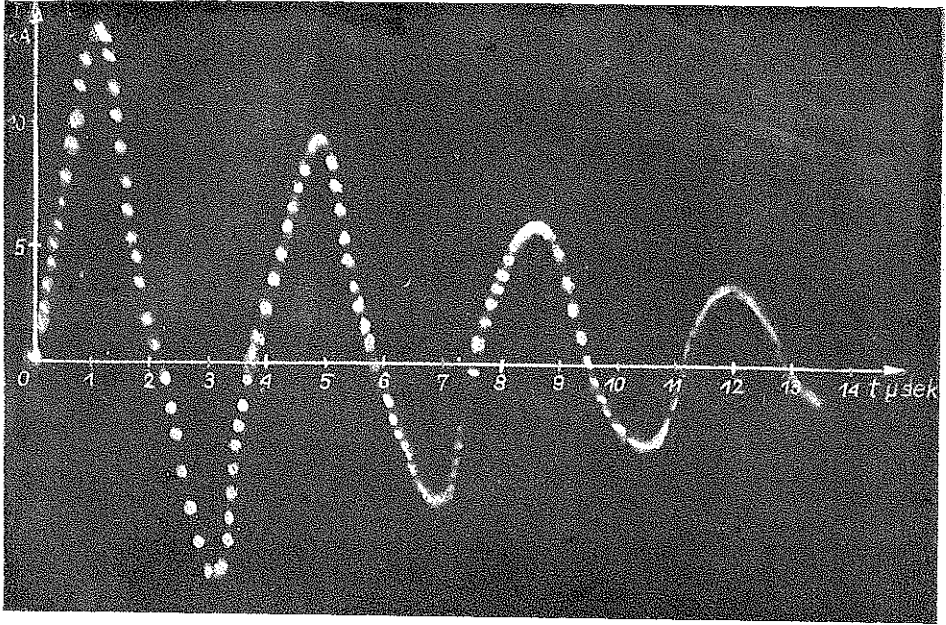
$$\omega L_p \gg R_p + R_b,$$

gdzie $\omega = 2\pi\nu$ oznacza częstość kołową obwodu wyładowania. Wówczas można pokazać, że mierzony prąd wyraża się za pomocą wzoru [3]

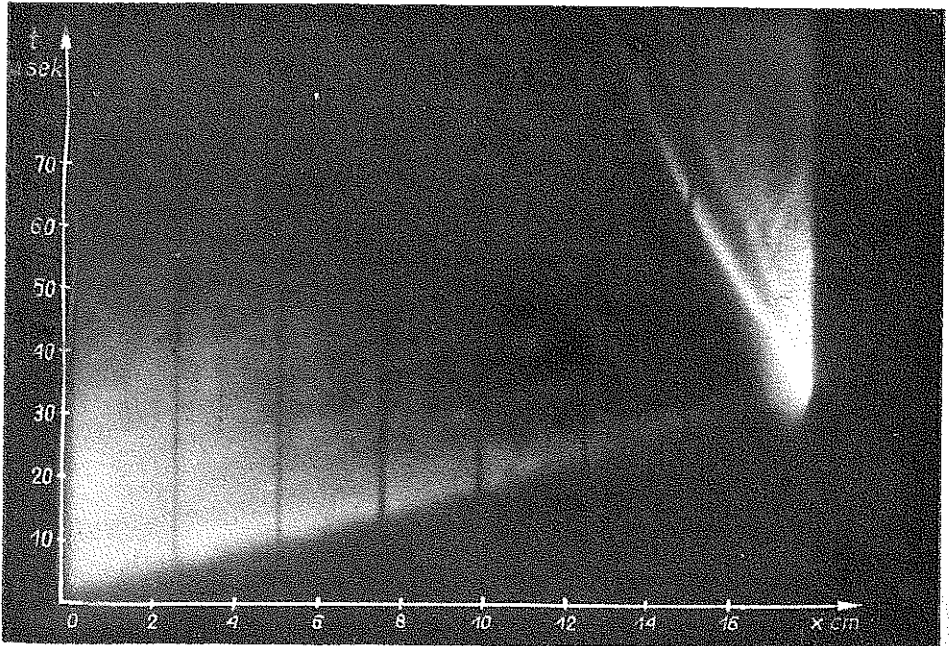
$$(1) \quad I = U_b \frac{N}{R_b},$$

gdzie N oznacza ilość zwojów pasa Rogowskiego, a U_b napięcie na wyjściu pasa. Wartość napięcia U_b jako funkcję czasu rejestrowano za pomocą oscylografu. W pracy [3] dla pasa Rogowskiego o zbliżonych parametrach stwierdzono słuszność wzoru (1) w przedziale częstości od 10^3 do 10^7 Hz. Podstawowa częstość w rozpatrywanym obwodzie wynosi $2,6 \cdot 10^5$ Hz. Wykres natężenia prądu w zależności od czasu w obwodzie wyładowania przedstawiony jest na rys. 2.

Prędkość fali uderzeniowej w rurce wyznaczono na podstawie zależności położenia czoła świecenia fali uderzeniowej od czasu. Zależność tę otrzymywano za pomocą zdjęcia fotograficznego rurki za pośrednictwem wirującego zwierciadła (rys. 3). Zwierciadło obraca się z prędkością 100 obr/sek., a odległość od niego błony fotograficznej wynosi 80 cm. Zależność prędkości fali uderzeniowej od energii baterii kondensatorów dla dwóch wymienionych wyżej wartości ciśnień w rurce przedstawiono na rys. 4 i 5.



Rys. 2. Oscylogram napięcia prądu elektrycznego dla ciśnienia w rurce 0,5 mmHg i początkowego napięcia 9 kV

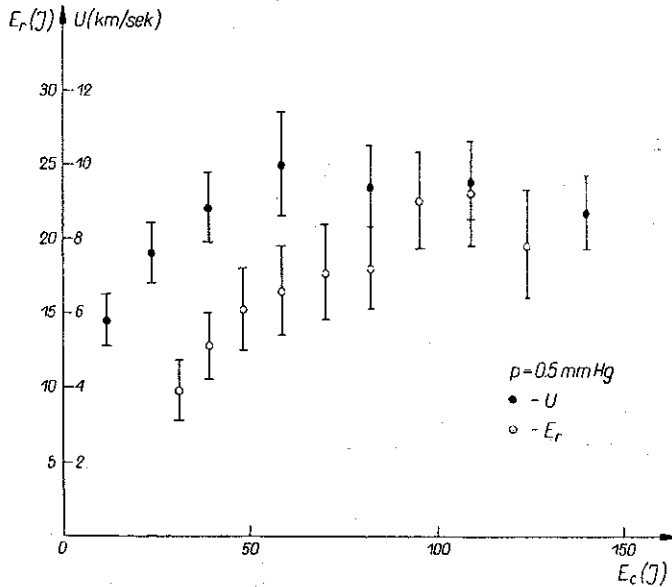


Rys. 3. Wykres położenia czoła świecenia fali uderzeniowej w zależności od czasu dla ciśnienia w rurce 0,5 mmHg i początkowego napięcia 13 kV

3. Elektryczny obwód wyładowania

Podana niżej metoda wyznaczania energii dostarczonej do rurki uderzeniowej może być zastosowana, jeśli obwód wyładowania (rys. 1) spełnia następujące założenia:

- 1) energia do rurki przekazywana jest tylko w postaci ciepła Joule'a,
- 2) wpływ obwodu pasa Rogowskiego na obwód wyładowania jest pomijalny,
- 3) parametry obwodu wyładowania można uważać za stałe skupione,
- 4) parametry obwodu R_e i L nie zależą od czasu.



Rys. 4. Wykres energii dostarczonej do rurki i prędkości fali uderzeniowej od początkowej energii baterii kondensatorów $0,5 CV_0^2$ dla ciśnienia w rurce $0,5 \text{ mmHg}$

Konstrukcja rurki uderzeniowej i sposób doprowadzenia prądu do jej elektrod pozwala przyjąć założenie 1. Założenie 2 jest spełnione, ponieważ prąd w obwodzie wyładowania i jego pochodna są dużo większe od odpowiedniego prądu i pochodnej prądu w obwodzie pasa Rogowskiego. Można uważać, że założenie 3 jest również spełnione, ponieważ długość obwodu elektrycznego jest dużo mniejsza od długości fali elektromagnetycznej o częstotliwości równej częstotliwości oscylacji prądu podczas wyładowania.

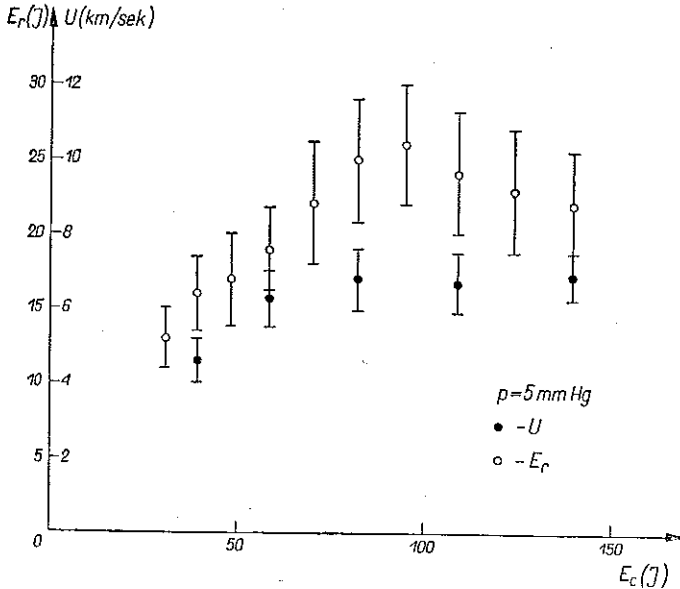
Natomiast spełnienie założenia 4 argumentowane było w sposób następujący: Przypuśćmy również, że założenie 4 jest spełnione. Wówczas natężenie prądu podczas periodycznego rozładowania baterii kondensatorów w obwodzie na rys. 1 wyraża się za pomocą wzoru

$$(2) \quad I(t) = \frac{V_0}{L\omega} e^{-at} \sin \omega t,$$

gdzie

$$(3) \quad \alpha = \frac{R_c}{2L}, \quad \omega^2 = \frac{1}{LC} - \alpha^2,$$

a V_0 oznacza napięcie początkowe na okładkach kondensatora, C pojemność baterii kondensatorów, L całkowitą indukcyjność obwodu, R_c całkowity opór obwodu, składający się z oporu między elektrodami rurki R_r i oporu zewnętrznego R_z .



Rys. 5. Wykres energii dostarczonej do rurki i prędkości fali uderzeniowej w zależności od początkowej energii baterii kondensatorów $0,5 CV_0^2$ dla ciśnienia w rurce 5,0 mmHg

Wielkości α i ω można również określić następująco:

$$(4) \quad \alpha = \frac{1}{T} \ln \frac{I_n}{I_{n+1}}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T},$$

gdzie T oznacza okres wyładowania, a I_n/I_{n+1} stosunek kolejnych amplitud prądu tego samego znaku.

Na podstawie zbadania zależności $I(t)$ (rys. 2) stwierdzono, że w rozpatrywanym zakresie ciśnienia p i napięcia V_0 wielkości α i ω są w granicach błędów doświadczalnego niezależne od czasu. Ponieważ pojemność kondensatorów C nie zależy od czasu, to na podstawie związków (3) można stwierdzić, że parametry obwodu R_c i L są stałe w czasie. Wobec tego przyjęto, że założenie 4 jest spełnione.

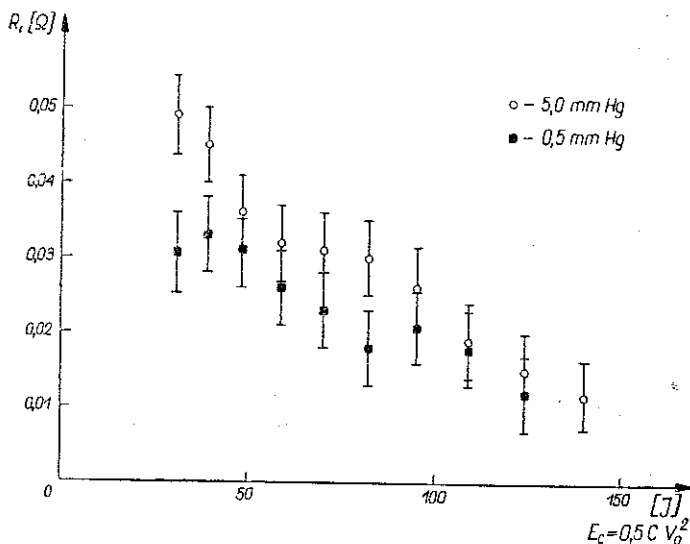
4. Wyznaczanie energii dostarczonej do rurki uderzeniowej

Na podstawie otrzymanego oscylogramu $I(t)$ stwierdzono, że okres wyładowania wynosi $T = 3,8 \pm 0,2$ μ sek., a stosunek kolejnych amplitud prądu I_n/I_{n+1} zmieniała się od 1,40 do 1,66 w zależności od napięcia początkowego baterii kondensatorów

i ciśnienia początkowego w rurce uderzeniowej. Korzystając ze wzorów (4) znaleziono wielkości α i ω . Stąd za pomocą wzorów (3) obliczono indukcyjność $L = 0,41 \pm \pm 0,03 \mu\text{H}$ i całkowity opór R_c . Następnie dokonano rozładowania baterii kondensatorów przez obwód, w którym elektrody rurki uderzeniowej zwarto na krótko. Z oscylogramu funkcji $I_1(t)$ w taki sam sposób znaleziono opór obwodu $R_z = 0,055 \pm 0,003 \Omega$ na zewnątrz rurki, który, jak stwierdzono, nie zależy od napięcia początkowego V_0 . Zmierzona stąd indukcyjność L pokrywała się z wyżej podaną wartością w granicach błędu doświadczenia. Opór pomiędzy elektrodami rurki wynosi

$$(5) \quad R_r = R_c - R_z.$$

Zależność oporu R_r między elektrodami rurki uderzeniowej dla dwóch wartości ciśnień 0,5 i 5,0 mmHg od energii baterii kondensatorów $0,5 CV_0^2$ przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Wykres oporu omowego między elektrodami rurki uderzeniowej w zależności od początkowej energii baterii kondensatorów $0,5 CV_0^2$ dla wartości ciśnień w rurce 0,5 i 5,0 mmHg

Znając opór R_r między elektrodami rurki i całkowity opór obwodu elektrycznego R_c można określić energię E_r dostarczoną do rurki. Ponieważ przyjęto, że są spełnione założenia 1 i 4 (wymienione w punkcie 3), przeto energię tę można określić za pomocą wzoru

$$E_r = R_r \int_0^{\infty} I^2(t) dt.$$

Energię całkowitą przedstawimy analogicznie:

$$E_c = R_c \int_0^{\infty} I^2(t) dt.$$

Z tych równań otrzymamy wzór na energię dostarczoną do rurki:

$$(6) \quad E_r = \frac{R_r}{R_c} E_c = \frac{R_c - R_z}{R_c} E_c,$$

gdzie $E_c = 0,5 CV_0^2$ oznacza całkowitą energię baterii kondensatorów.

Energię E_r można również wyznaczyć drugą metodą, jeśli założenie o niezależności oporu od czasu będzie spełnione jedynie dla oporu R_z (w obwodzie ze zwartymi elektrodami). Natomiast opór R_r pomiędzy elektrodami rurki może zależeć od czasu.

Energię dostarczoną E_r można w ogólnym przypadku określić za pomocą wzoru

$$(7) \quad E_r = E_c - E_z,$$

gdzie E_z oznacza energię straconą w obwodzie zewnętrznym.

Ponieważ R_z z założenia nie zależy od czasu, energię E_z można przedstawić w następującej postaci:

$$(8) \quad E_z = R_z \int_0^{\infty} I^2(t) dt;$$

wobec tego wzór (7) przyjmie postać

$$(9) \quad E_r = \frac{CV_0^2}{2} - R_z \int_0^{\infty} I^2(t) dt.$$

Opór R_z można znaleźć wyżej podaną metodą z oscylogramu funkcji $I_1(t)$ dla obwodu ze zwartymi elektrodami. Wartość $\int_0^{\infty} I^2(t) dt$ otrzymamy z oscylogramu $I(t)$, który może nie stosować się do wzoru (2).

Druga metoda wyznaczania energii dostarczonej do rurki jest ogólniejsza od pierwszej, ponieważ obejmuje większą liczbę przypadków (co wynika z założeń). Porównując wzory na energię E_r (6) i (9) dla obu metod można stwierdzić, że w pierwszej wyznaczamy wartość względną (w stosunku do energii całkowitej E_c), a w drugiej wartość bezwzględną. Ponadto do wyznaczania oporu R_r ze wzoru (5) oraz energii dostarczonej E_r ze wzoru (6) (metodą pierwszą) nie jest potrzebna znajomość bezwzględnej wartości natężenia prądu $I(t)$, czyli nie korzysta się ze wzoru (1). W metodzie drugiej użycie wzoru (1) jest konieczne, co przyczynia się do powiększenia błędu pomiarowego. Wobec tego jeśli można przyjąć, że opór R_r nie zależy od czasu, to wygodniej i korzystniej jest posługiwać się metodą pierwszą.

Wykresy energii E_r , dostarczonej do rurki, wyznaczone metodą pierwszą w zależności od całkowitej energii E_c baterii kondensatorów dla dwóch wartości ciśnień przedstawiono na rys. 4 i 5.

5. Wnioski

Technika wyznaczenia E_r w obu wymienionych wyżej metodach charakteryzuje się tym, że daje stosunkowo duże błędy względne. Powodem tego jest w obu przypadkach [por. wzór (6) i (9)] odejmowanie od siebie mało różniących się wielkości (różnica wynosi 15–50% wartości odjemnej).

W pracy [4] wyznaczano energię dostarczaną do rurki typu T na podstawie pomiaru natężenia prądu w obwodzie i spadku napięcia na elektrodach rurki. Otrzymane wartości E_r/E_e w obu pracach są do siebie zbliżone. W artykule [4] błędy pomiarowe są tego samego rzędu, natomiast technika pomiaru jest bardziej złożona.

Na rysunkach 4 i 5 zestawiono wykresy energii dostarczonej do rurki E_r i prędkości fali uderzeniowej U od wspólnego argumentu — całkowitej energii baterii kondensatorów E_e dla ciśnień początkowych w rurce 0,5 i 5,0 mmHg. Przebieg krzywych na obu wykresach jest podobny. Na tej podstawie można przypuszczać, że główną przyczyną pojawiania się maksimum prędkości fali omówionego w artykułach [1 i 2] jest charakter przedstawionego przez nas wykresu energii dostarczonej do rurki.

Drogą do podwyższenia prędkości fali uderzeniowej byłaby zmiana konstrukcji rurki na taką, w której głównym mechanizmem przekazywania energii do gazu nie było ciepło Joule'a, jak to ma miejsce w badanej konstrukcji rurki, ale np. pole magnetyczne. Wydaje się, że obecnie najdoskonalszą konstrukcją pod względem osiągniętych prędkości fali jest rurka uderzeniowa ze współosiowymi elektrodami [5].

Literatura cytowana w tekście

1. V. JOSEPHSON, *Production of high velocity shock*, J. Appl. Phys., 1, 29 (1958).
2. Z. A. PIETRZYK, *Investigation of flow through an electromagnetic shock tube. Selection of optimum parameter and preliminary results.*, Arch. Mech. Stos., 5, 15 (1963).
3. A. M. Андрианов, О. А. Базилевская, Ю. Т. Прохоров, *Исследование импульсных разрядов в газах при силе тока 500 ка. Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза*, том II АН СССР 1958.
4. J. K. DUKOWICZ, *The efficiency of energy transfer associated with magnetically driven shock waves in a tee tube*. Institute of Aerophysics University of Toronto, Utia Technical Note, No 52, AFOSR 2429 (1963).
5. J. MARSHAL, *Performance of a hydromagnetic Plasma Gun*, Phys. of Fluid, 1, 3 (1960).

Резюме

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПОДВОДИМОЙ К ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ТРУБКЕ

В работе дается метод определения энергии подводимой к ударной трубке. В качестве основы этого метода являются измеренные зависимости силы тока от времени в цепи разряда, в которой находится ударная трубка и в цепи с коротко замкнутыми электродами. Характер диаграммы энергии подведенной к ударной трубке с осевым электродом, наполненный азотом, в зависимости от начальной энергии конденсаторов подобен диаграмме скорости ударной волны в функции того же аргумента. Этот факт объясняет, в некоторой степени, появление максимума, наблюдаемого в работах [1 и 2].

S u m m a r y

DETERMINATION OF THE ENERGY INPUT IN AN ELECTRIC SHOCK TUBE

The present paper describes a method for determining the energy input in an electric shock tube based on the relations, obtained experimentally, between the intensity of current and the time in the discharge circuit including a shock tube or if the electrodes are short-circuited. The character of the diagram of the energy furnished to the shock tube with an axial electrode, filled up with nitrogen, in function of the initial energy of the condensers approaches that of the velocity diagram of the shock wave in function of the same argument. This fact explains to some extent the occurrence of maximum wave velocity observed in Refs. [1 and 2].

ZAKŁAD MECHANIKI CIECZY I GAZÓW
INSTYTUTU PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN

Praca została złożona w Redakcji dnia 22 kwietnia 1965 r.
