

P O L S K A   A K A D E M I A   N A U K  
I N S T Y T U T   M A S Z Y N   P R Z E P Ł Y W O W Y C H

PRACE  
I N S T Y T U T U   M A S Z Y N  
P R Z E P Ł Y W O W Y C H

T R A N S A C T I O N S  
O F   T H E   I N S T I T U T E   O F   F L U I D - F L O W   M A C H I N E R Y

80

W A R S Z A W A - P O Z N A Ń 1981

---

P A Ń S T W O W E   W Y D A W N I C T W O   N A U K O W E

---

**PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPLYWOWYCH**

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

\*

**THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW  
MACHINERY**

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

---

**RADA REDAKCYJNA - EDITORIAL BOARD**

**TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI  
STEFAN PERYCZ · WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ROMUALD PUZYREWSKI  
KAZIMIERZ STELLER (PRZEWODNICZĄCY - CHAIRMAN) · ROBERT SZEWAŁSKI  
JÓZEF ŚMIGIELSKI**

**KOMITET REDAKCYJNY - EXECUTIVE EDITORS**

**KAZIMIERZ STELLER - REDAKTOR - EDITOR  
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI  
ANDRZEJ ŻABICKI**

**REDAKCJA - EDITORIAL OFFICE**

Institut Maszyn Przeplywowych PAN  
ul. Gen. Józefa Fiszerza 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright

by Państwowe Wydawnictwo Naukowe  
Warszawa 1981

Printed in Poland

ISBN 83-01-02692-8

ISSN 0079-3205

**PANSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU**

Nakład 340+90 egz. Ark. wyd. 10. Ark. druk. 7,5 Papier druk. sat. kl. V,  
70 g. 70×100 cm. Oddano do składania 26 kwietnia 1980 r. Druk ukończono  
w lutym 1981 r. Zamówienie nr 486/34, T-2/778. Cena zł 40,-

---

**DRUKARNIA UNIWERSYTETU IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU**

SYLWESTER W. GINAL

Gdańsk

## Procesy elektrotermiczne w podgrzewaczu łukowym gazu z dyszą segmentową\*

W pracy przedstawiono analizę zjawisk zachodzących w podgrzewaczu łukowym z dyszą segmentową, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnienia wymiany ciepła w dyszy segmentowej oraz zjawisk zachodzących na katodzie i anodzie oraz w ich pobliżu. W analizie wymiany ciepła podjęto próbę zastosowania praw podobieństwa zjawisk fizycznych.

### Wykaz oznaczeń

|   |  |
|---|--|
| $c_p$ – ciepło właściwe [ $\text{Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ],      | $Q$ – całkowity strumień cieplny [W],  |
| $D, R$ – średnica i promień dyszy podgrzewacza [m],               | $r$ – współrzędna [m],   |
| $e$ – ładunek elektronu [As],                                     | $T$ – temperatura [K],   |
| $E$ – natężenie pola elektrycznego [ $\text{Vm}^{-1}$ ],          | $U$ – spadek napięcia [V],   |
| $G$ – strumień masy gazu [ $\text{kgs}^{-1}$ ],                   | $w$ – prędkość [ $\text{ms}^{-1}$ ],   |
| $h$ – entalpia właściwa [ $\text{Jkg}^{-1}$ ],                    | $x$ – współrzędna [m],   |
| $I$ – natężenie prądu elektrycznego [A],                          | $\eta$ – lepkość dynamiczna [ $\text{m}^{-1} \text{kgs}^{-1}$ ],             |
| $k$ – stała Boltzmanna [ $\text{JK}^{-1}$ ],                      | $\lambda$ – przewodność cieplna właściwa [ $\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$ ], |
| $j$ – gęstość prądu elektrycznego [ $\text{Am}^{-2}$ ],           | $\pi$ – liczba podobieństwa,   |
| $L$ – długość dyszy podgrzewacza [m],                             | $\rho$ – gęstość [ $\text{kgm}^{-3}$ ],                                      |
| $p$ – ciśnienie [ $\text{Nm}^{-2}$ ],                             | $\sigma$ – przewodność elektryczna właściwa [ $\text{Sm}^{-1}$ ].            |
| $q$ – jednostkowy strumień cieplny do dyszy [ $\text{Wm}^{-1}$ ], |  |

### 1. Wstęp

Najbardziej rozpowszechnionymi urządzeniami przetwarzającymi energię elektryczną na energię cieplną gazu są podgrzewacze łukowe gazu (plazmotrony, palniki łukowe). Prowadzone od wielu lat badania wykazują, że najwyższe energie unoszone przez gaz uzyskuje się w podgrzewaczach łukowych gazu typu liniowego (osiowych) [1, 2]. Typowe dla tej grupy są podgrzewacze z dyszą segmentową (sekcyjonowaną), gdzie długość wyłado-

\* Praca wykonana w ramach prac własnych Instytutu (plan C1-7/1).

wania jest większa od samoustalającej się. Odgrywają one istotną rolę w określaniu własności termodynamicznych i elektrycznych gazu oraz w chemii plazmy [1, 3, 4].

W pracy dokonano próby uogólnienia opisu zjawisk fizycznych zachodzących w dyszy segmentowej oraz uzyskania istotnych informacji o zjawiskach przyelektrodowych, wykorzystując charakterystyczne cechy takich podgrzewaczy łukowych gazu.

## 2. Próba uogólnienia zjawisk fizycznych zachodzących w podgrzewaczu łukowym z dyszą segmentową

W analizie i uogólnieniu wyników badań, a również i przy ustalaniu programu doświadczeń, istotną rolę odgrywa podobieństwo procesów. W badaniu podgrzewaczy łukowych gazu staje się ono nieodzowne ze względu na złożoność zagadnienia. Mają tu bowiem miejsce zjawiska przenoszenia ładunku elektrycznego, masy, pędu i energii odbywające się pod wpływem zewnętrznego jak i indukowanego pola elektrycznego. W wyładowaniu łukowym w gazie decydującą rolę odgrywa wydzielające się ciepło Joule'a oraz przyłożone zewnętrzne pole elektryczne.

Wobec znacznej liczby parametrów opisujących pracę podgrzewacza łukowego, naturalne jest dążenie do ich ograniczenia przez wprowadzenie kryteriów podobieństwa. Kryteria te uzyskuje się dwiema drogami: przez sprowadzenie równań opisujących zjawisko do bezwymiarowej postaci, lub przez zastosowanie analizy wymiarowej. Problemowi temu poświęcono bardzo dużo prac (por. np. [5 ÷ 11]). W przypadku podgrzewacza gazu z dyszą segmentową przyjmuje się daleko idące uproszczenia, a mianowicie [12 ÷ 14]:

- a) ustalony charakter przepływu gazu,
- b) równowagę termodynamiczną,
- c) stałość wielkości termodynamicznych,
- d) osiową symetrię przepływu.

Założenia te pozwalają na sformułowanie następujących uproszczonych równań [2, 12, 13]:

- równania ciągłości

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho w) = 0, \quad (1)$$

- równania zachowania energii

$$\rho w \frac{\partial}{\partial x} \left( h + \frac{w^2}{2} \right) = \frac{j^2}{\sigma} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{r\lambda}{c_p} \frac{\partial}{\partial r} \left( h + Pr \frac{w^2}{2} \right) \right] + E_{\text{prom}}, \quad (2)$$

gdzie  $Pr = c_p(\eta/\lambda)$  – liczba Prandtla,  $E_{\text{prom}}$  – energia promieniowania,

- równania zachowania pędu

$$\rho w \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\eta \frac{\partial w}{\partial r} \right), \quad (3)$$

- prawo Ohma

$$j = \sigma E. \quad (4)$$

Równanie zachowania energii (2) w przypadku  $w^2/2 \ll h$  i pomijalnej roli energii promieniowania przyjmuje postać

$$\rho w \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{j^2}{\sigma} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right). \quad (5)$$

Układ równań (1)÷(4) uzupełniają zależności współczynnika przenoszenia: przewodności cieplnej  $\lambda$  i elektrycznej  $\sigma$ , lepkości  $\eta$  oraz własności termodynamicznych: ciepła właściwego  $c_p$ , stałej gazowej  $R_g$  oraz entalpii właściwej  $h$  od ciśnienia  $p$  i temperatury  $T$ .

Wielkości kryterialne można określić bezpośrednio wykorzystując równania opisujące zjawisko [15÷17]. Z wyjątkiem równania ciągłości (1), które żadnej informacji nie daje, pozostałe ((3), (4) i (5)) można zapisać w postaci tzw. „równań wymiarowych”

$$\left[ \frac{\rho w^2}{L} \right] = \left[ \frac{p}{L} \right] = \left[ \frac{\eta w}{R^2} \right], \quad (7)$$

$$[j] = [\sigma E], \quad (8)$$

$$\left[ \frac{\rho w h}{L} \right] = [\sigma E^2] = \left[ \frac{\lambda h}{R^2 c_p} \right]. \quad (9)$$

Uzyskanie bezwymiarowej postaci powyższych równań związane jest z podzieleniem ich przez wybrany człon. Jako jeden z możliwych rezultatów otrzymuje się wyrażenia

$$[1] = \left[ \frac{P}{\rho w^2} \right] = \left[ \frac{\eta L}{R^2 \rho w} \right], \quad (10)$$

$$[1] = \left[ \frac{\sigma E}{j} \right], \quad (11)$$

$$\left[ \frac{\rho w h}{\sigma L E^2} \right] = [1] = \left[ \frac{\lambda h}{R^2 c_p \sigma E^2} \right]. \quad (12)$$

Zasada zachowania pędu daje dwa kryteria. Pierwsze z nich jest analogiczne do liczby Eulera, która określa stosunek sił ciśnienia do sił bezwładności. Przyjęto tu w skali odniesienia nie spadek ciśnienia  $p$ , lecz pewną absolutną wartość  $P$ .

$$\pi_{Eu} = \frac{P}{\rho w^2}. \quad (13)$$

Druga liczba bezwymiarowa to odwrotność kryterium Reynoldsa o postaci

$$\pi_{Re} = \frac{\eta L}{R^2 \rho w}. \quad (14)$$

Ze względu na późniejsze przekształcenia, nie skrócono wielkości o tym samym wymiarze  $R$  i  $L$ .

Prawo Ohma prowadzi do kryterium uwzględniającego zewnętrzne pole elektryczne

$$\pi_E = \frac{\sigma E}{j}, \quad (15)$$

Z równania zachowania energii uzyskuje się dwa kryteria. Pierwsze określa stosunek energii traconej przez kolumnę plazmy na drodze konwekcji do energii wydzielanej w gazie przy przepływie prądu. W literaturze jego odwrotność nosi nazwę kryterium Kutatieladze [18, 19]

$$\pi_{Ku} = \frac{\rho w h}{\sigma L E^2}. \quad (16)$$

Odprowadzanie ciepła Joule'a drogą przewodności cieplnej ilustruje drugie kryterium

$$\pi_C = \frac{\partial h}{R^2 c_p \sigma E^2}. \quad (17)$$

Przedstawiony układ bezwymiarowych wielkości jest niepełny, tak jak i układ równań (3)÷(5), który opisuje jedynie podstawowe zależności.

Konieczne jest również określenie kryteriów wynikających warunków granicznych. Ponieważ temperatura  $T$ , ciśnienie  $p$  i prędkość  $w$  określane są pewnymi stałymi wartościami granicznymi, to uzupełnieniem będą jedynie kryteria stosunków geometrycznych [7, 8]

$$\pi_L = \frac{L}{R}, \quad (18)$$

$$\pi_K = \frac{R_k}{R}, \quad (19)$$

$$\pi_W = \frac{R_w}{R}, \quad (20)$$

gdzie  $R_k$  – promień trzonu katody,  $R_w$  – promień otworu wlotowego gazu.

Zgodnie z prawem Federmana-Buckinghama całość ogólną układu równań (3)÷(5) można przedstawić w postaci

$$f(\pi_{Eu}, \pi_{Re}, \pi_E, \pi_{Ku}, \pi_C, \pi_L, \pi_K, \pi_W) = 0. \quad (21)$$

Praktycznie ma się do czynienia nie z gęstością prądu  $j$ , a z natężeniem prądu  $I$ . Zazwyczaj używa się również strumienia masy gazu  $G$  zamiast prędkości  $w$  i spadku napięcia  $U$  zamiast natężenia pola elektrycznego  $E$ . Aby przejść od wielkości lokalnych do wielkości całkowych należy skorzystać z kryteriów otrzymanych z równań definiujących. Z definicji natężenia prądu elektrycznego otrzymujemy kryterium

$$\pi_J = \frac{j R^2}{I}. \quad (22)$$

Z równania określającego strumień masy uzyskuje się warunek

$$\pi_G = \frac{\rho w R^2}{G}. \quad (23)$$

Z definicji spadku napięcia w przewodniku wynika kryterium

$$\pi_U = \frac{EL}{U}. \quad (24)$$

Przekształcając część kryteriów uzyskanych z równań (3)÷(5) i wprowadzając zależności (22)÷(24) oraz (15) otrzymujemy

$$\pi'_{Eu} = \frac{\rho PR^4}{G^2}, \quad (25)$$

$$\pi'_{Re} = \frac{\eta L}{G}, \quad (26)$$

$$\pi'_E = \frac{\sigma ER^2}{I}, \quad (27)$$

$$\pi'_{Ku} = \frac{\sigma h GR^2}{LI^2}, \quad (28)$$

$$\pi'_C = \frac{h \lambda \sigma R^2}{c_p I^2}. \quad (29)$$

Przekształcone kryteria (25)÷(29) oznaczone symbolami  $\pi'_{Eu} \dots \pi'_C$  oraz kryteria podobieństwa geometrycznego (18)÷(20)  $\pi_L \dots \pi_W$  stanowią zupełny zespół wyrażen bezwymiarowych. Zgodnie z zasadami teorii podobieństwa zespół taki można przekształcić do postaci dogodniejszej przy opracowywaniu wyników. Przekształcenie polega na uzyskaniu nowego zespołu drogą łączenia i przegrupowywania poszczególnych kryteriów (mnożenie, dzielenie, potęgowanie). Proponowana postać niektórych kryteriów jest następująca:

$$\pi''_{Eu} = (\pi'_{Eu})^{0,5} = \frac{\rho^{0,5} P^{0,5} R^2}{G}, \quad (30)$$

$$\pi''_E = \pi'_E (\pi'_C)^{-1} = \frac{c_p EI}{h \lambda}, \quad (31)$$

$$\pi''_{Ku} = (\pi'_{Re} \pi'_{Ku})^{-0,5} = \frac{I}{\sigma^{0,5} \eta^{0,5} h^{0,5} R}, \quad (32)$$

$$\pi''_C = (\pi'_C)^{-0,5} = \frac{c_p I}{\sigma^{0,5} \lambda^{0,5} h^{0,5} R}. \quad (33)$$

Nowe, uogólnione równanie opisujące wyładowanie elektryczne w podgrzewaczu gazu z dyszą segmentową, będzie miało postać:

$$f(\pi''_{Eu}, \pi'_{Re}, \pi''_E, \pi''_{Ku}, \pi''_C, \pi_L, \pi_K, \pi_W) = 0. \quad (34)$$

Zakładając, że rozważania dotyczyć będą jednego, określonego gazu w określonej temperaturze i ciśnieniu, można wielkości określające jego własności fizyczne  $h, \rho, \sigma, \eta$  uważać za stałe. Wtedy równanie (34) można zapisać następująco:

$$f\left(\frac{R^2}{G}, \frac{L}{G}, EI, \frac{I}{R}, \frac{L}{R}, \frac{R_k}{R}, \frac{R_w}{R}\right) = 0. \quad (35)$$

Zwraca uwagę to, że bezwymiarowe liczby  $\pi''_{Ku}$  (32) i  $\pi''_C$  (33) po przejściu do postaci wymia-

rowej w (35) są identyczne i wynoszą  $I/R$ . Otrzymane równanie przedstawia postać wymiarową równania uogólnionego. Należy tu dodać, że kryterium natężenia pola elektrycznego w postaci (27)  $\pi'_E$  jest równoważne kryterium napięciowemu

$$\pi'_U = \pi_U^{-1} \pi'_E \pi_L = \frac{\sigma UR}{I}. \quad (36)$$

Ogrywa ono istotną rolę przy przedstawieniu uogólnionej charakterystyki napięciowo-prądowej wyładowania łukowego. Zgodnie z definicją kryteriów, określających i nieokreślających, kryterium  $\pi''_E$  zawierające zmienną zależną jest nieokreślające, natomiast pozostałe są określającymi (por. [19]).

Zgodnie z twierdzeniem Kirpiczowa-Guchmana wystarczającym warunkiem podobieństwa jest równość kryteriów  $\pi''_{Eu}$  (30),  $\pi'_{Re}$  (26),  $\pi''_{Ku}$  (32),  $\pi_L$  (18),  $\pi_K$  (19) i  $\pi_W$  (20), w przypadku tego samego gazu. Zakładając podobieństwo geometryczne podgrzewaczy łukowych, możemy opuścić trzy ostatnie wyrazy w równaniach (34) i (35). Wówczas uogólnioną postać rozkładu jednostkowej mocy doprowadzonej  $EI$  możemy wyrazić równaniem

$$EI = f\left(\frac{I}{R}, \frac{R^2}{G}, \frac{L}{G}\right). \quad (37)$$

Zależność powyższą wykorzystano przy omawianiu wyników badań w rozdziale 5.

Przedstawiona metoda uzyskania opisu wyładowania elektrycznego nie jest oczywiście jedyną. Analogiczne wyniki uzyskuje się stosując klasyczną metodę przekształcania równań opisujących zjawisko do postaci bezwymiarowej, jak również analizę wymiarową (por. [7, 8, 9, 19]).

Należy również zwrócić uwagę na to, że równania (1)÷(5) oraz (34) i (35) nie uwzględniają procesów zachodzących na elektrodach oraz w ich pobliżu. Obejmują one bowiem tylko zagadnienie współlistnienia przepływu prądu elektrycznego i gazu w dyszy podgrzewacza łukowego.

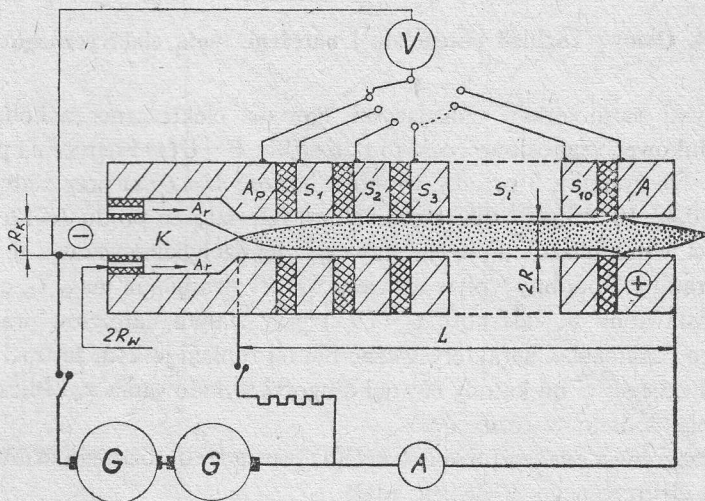
### 3. Stanowisko badawcze i zakres badań

Badania eksperymentalne przeprowadzono na podgrzewaczu łukowym typu PU40K [20] uzupełnionym dyszą segmentową. Budowę tego podgrzewacza przedstawiono schematycznie na rysunku 1, podając jego podstawowe wymiary. Na rysunku tym przedstawiono również schemat instalacji elektrycznej, pomiarowej i zasilającej. Jako główne zespoły podgrzewacza można wyróżnić: korpus z katodą i anodą pomocniczą, dyszę segmentową oraz anodę główną. Katodę  $k$  wykonano w kształcie walca o średnicy  $2R_k$ , zakończonego stożkiem z wolframu torowanego. Wyładowanie elektryczne odbywa się w cylindrycznym kanale o średnicy  $2R$  i długości  $L$ , który tworzą następujące, współosiowo usytuowane elementy:

- anoda pomocnicza  $A_p$ ,
- wzajemnie izolowane cieplnie i elektrycznie segmenty  $S_i$ ,
- anoda główna  $A$ .



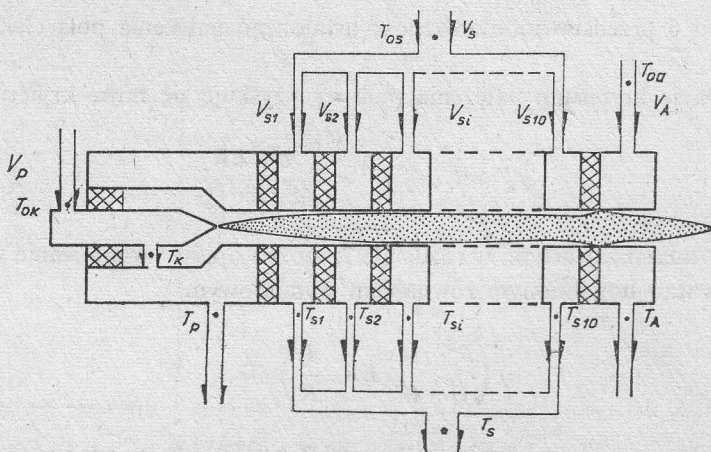
Poszczególne elementy chłodzone są indywidualnie wodą o kontrolowanym strumieniu objętości  $V$ . Schematycznie układ chłodzący przedstawiono na rysunku 2. Pomiary temperatury na wlocie i wylocie poszczególnych obiegów chłodzących dokonywano termistrami pracującymi w układzie mostka niezrównoważonego. Gaz roboczy – argon – do-



Rys. 1. Schemat instalacji elektrycznej pomiarowej i zasilającej podgrzewacz łukowy z dyszą segmentową

prowadzany jest osiowo sześcioma otworami rozmieszczonymi symetrycznie wokół katody, których zastępcza średnica wynosi  $2R_w$ .

Osiowy rozkład potencjału mierzono badając spadek napięcia na poszczególnych segmentach i anodzie względem katody (rys. 1). Źródło zasilania energią elektryczną stanowią dwie spawarki wirujące EW32a połączone szeregowo. Bardziej szczegółowe informacje dotyczące stanowiska badawczego oraz techniki pomiarowej zawiera praca [21].



Rys. 2. Schemat układu chłodzenia podgrzewacza

Badania przeprowadzono dla jednego podgrzewacza, a więc stałymi wielkościami były jego parametry geometryczne:  $2R=8 \cdot 10^{-3}$  m,  $2R_w \cong 5 \cdot 10^{-3}$  m,  $2R_k=15 \cdot 10^{-3}$  m,  $L=93 \cdot 10^{-3}$  m. Zmiennymi parametrami pracy były; natężenie prądu  $I=90 \div 300$  A oraz strumień masy gazu  $G=0,14 \div 1,10 \cdot 10^{-3}$  kgs<sup>-1</sup>.

#### 4. Osiowy rozkład potencjału i natężenia pola elektrycznego

Podstawowymi parametrami opisującymi zjawiska elektryczne zachodzące w dyszy podgrzewacza łukowego są: osiowy rozkład potencjału  $U=U(x)$  i natężenia pola elektrycznego  $E=E(x)$ . Na rysunku 3 przedstawiono zależność  $U=U(x)$  przy stałym strumieniu masy gazu  $G=0,42 \cdot 10^{-3}$  kgs<sup>-1</sup> dla trzech wybranych natężeń prądu  $I=120, 240, 300$  A. Zależność ta jest w przybliżeniu liniowa, przy czym jej nachylenie wzrasta ze zwiększaniem się natężenia prądu  $I$ . Podobny wpływ wywiera wzrost strumienia masy  $G$ , co ilustruje rysunek 4. Przedstawiono tu zależność  $U=U(x)$  przy stałym natężeniu prądu  $I=300$  A, traktując  $G$  jako parametr. Charakterystyczne dla tej funkcji jest to, że traci ona swą monotoniczność w odległości od katody równej długości wyładowania  $x_w$ . Bliższe omówienie tego zagadnienia podano w rozdziale 7.

Bardziej szczegółowa analiza funkcji  $U=U(x)$  prowadzi do badania osiowego rozkładu natężenia pola elektrycznego  $E=E(x)$ , gdzie

$$E = \frac{dU}{dx}. \quad (38)$$

Różniczkując graficznie zależność  $U=U(x)$  przedstawioną na rysunku 4, uzyskano funkcję  $E=E(x)$  (rys. 5). Jak wynika z tego wykresu, jest to funkcja malejąca do wartości ustalonej (por. [14]), osiąganej powyżej pewnej granicznej odległości od katody  $x_{gr}$ . Ustalona wartość natężenia pola elektrycznego  $E_\infty$ , dla stałego prądu wyładowania  $I$ , nie zależy od strumienia masy  $G$ . Natomiast jego wzrost powoduje wydłużanie się początkowego odcinka wyładowania.

Na rysunku 6 przedstawiono zależność ustalonego natężenia pola elektrycznego  $E_\infty$  od prądu  $I$ .

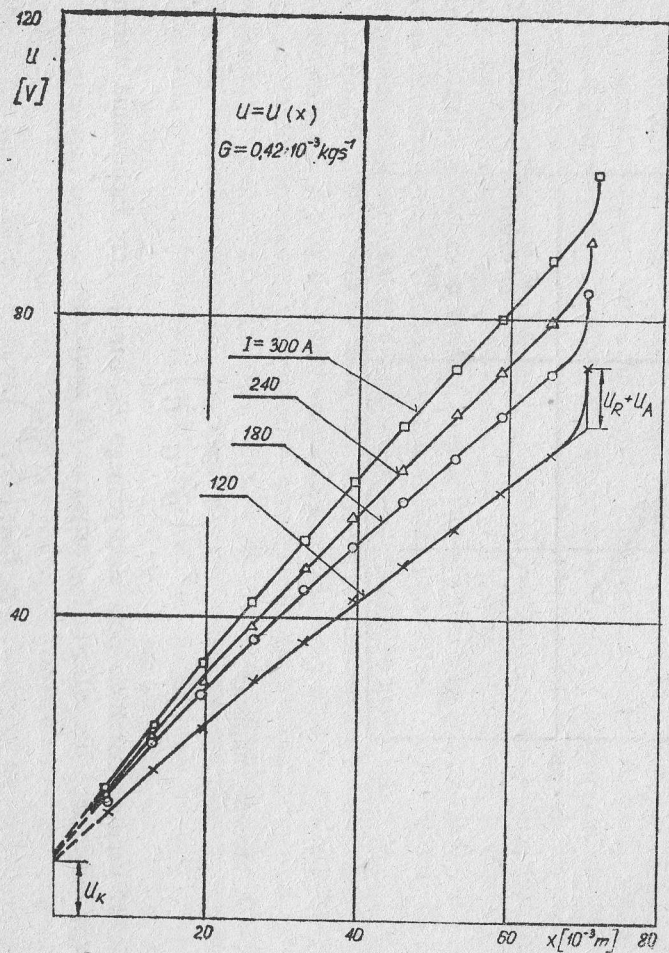
Przekształcając kryterium natężenia pola  $\pi''_E$  uzyskuje się nowe kryterium o postaci

$$\pi'''_E = \pi''_E (\pi''_{Kw})^{-1} = \frac{c_p^{0,5} \sigma^{0,5} ER}{h^{0,5} \lambda^{0,5}}. \quad (39)$$

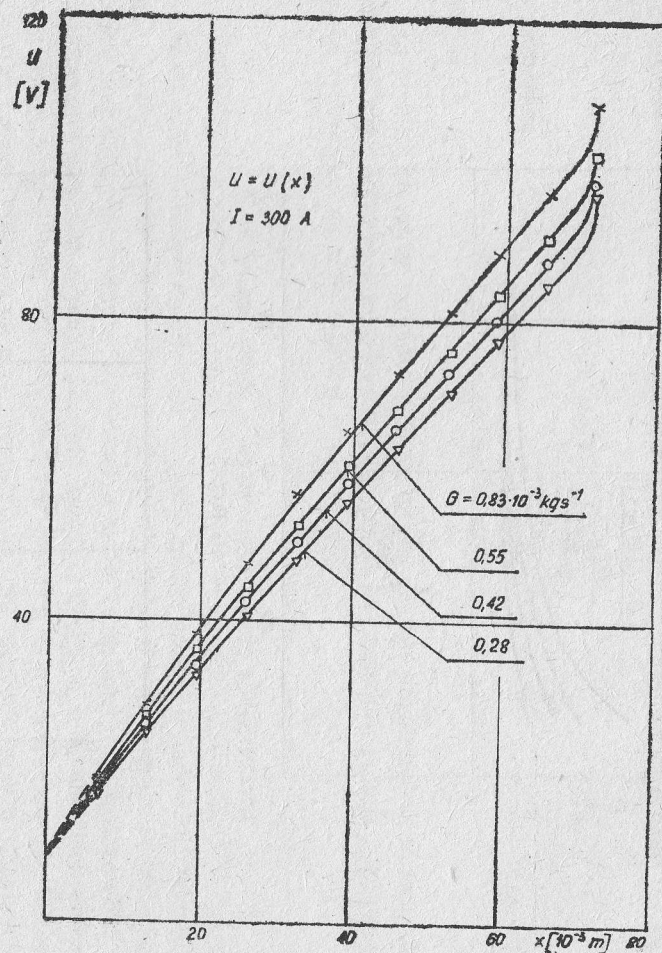
Zgodnie z wywodami zawartymi w rozdziale 2, można opisać wyładowanie w rozpatrywanym podgrzewaczu uogólnionym równaniem wymiarowym

$$f\left(\frac{R^2}{G}, \frac{L}{G}, ER, \frac{I}{R}\right) = 0. \quad (40)$$

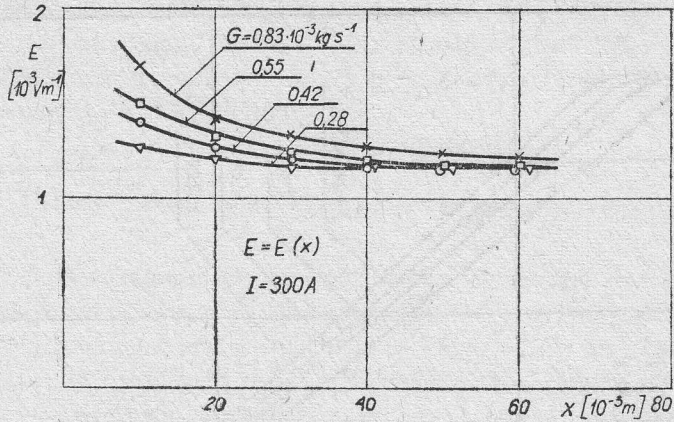
W tym przypadku wymiar wielkości całkowitej  $L$  będzie odpowiadać zmiennej  $x$ . Wyrażając kryterium nieokreślające w postaci funkcji kryteriów określających oraz wiedząc,



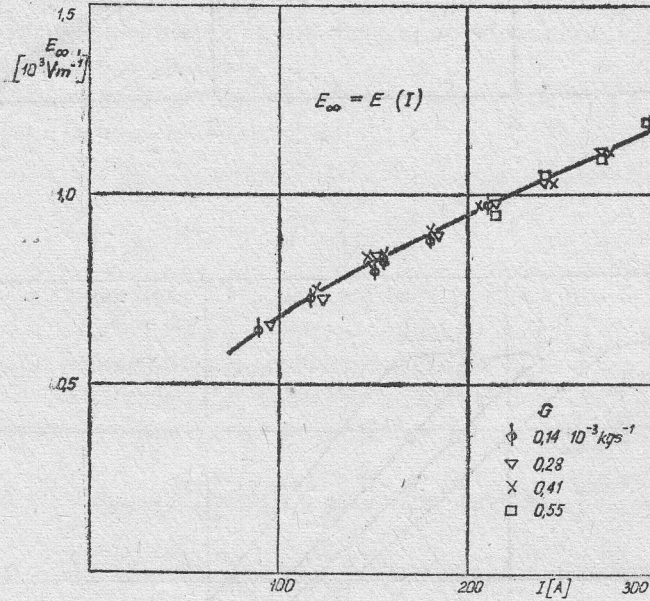
Rys. 3



Rys. 4



Rys. 5



Rys. 6

że  $R \sim D$ , możemy napisać

$$ED = f\left(\frac{I}{D}, \frac{D^2}{G}, \frac{x}{G}\right). \quad (41)$$

Ponieważ ustalone natężenie pola elektrycznego  $E_\infty$  istnieje przy zachowaniu warunku  $x > x_{\text{gr}}$ , wobec tego dla  $x/G > (x/G)_{\text{gr}}$  uzyskuje się zależność

$$E_\infty D = f\left(\frac{I}{D}, \frac{D^2}{G}\right). \quad (42)$$

Empiryczną postacią równania (42) jest zależność aproksymowana funkcją

$$E_{\infty} D = 37 \cdot 10^{-3} \left( \frac{I}{D} \right)^{0,52} \quad (43)$$

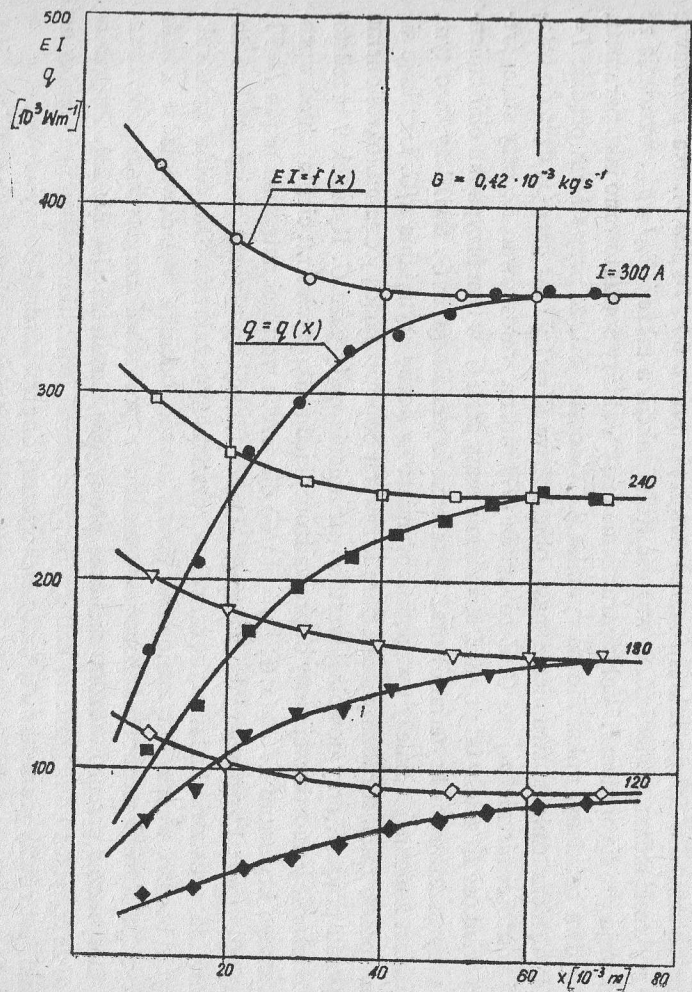
w przedziale

$$0,06 \leq \frac{D^2}{G} \leq 0,46.$$

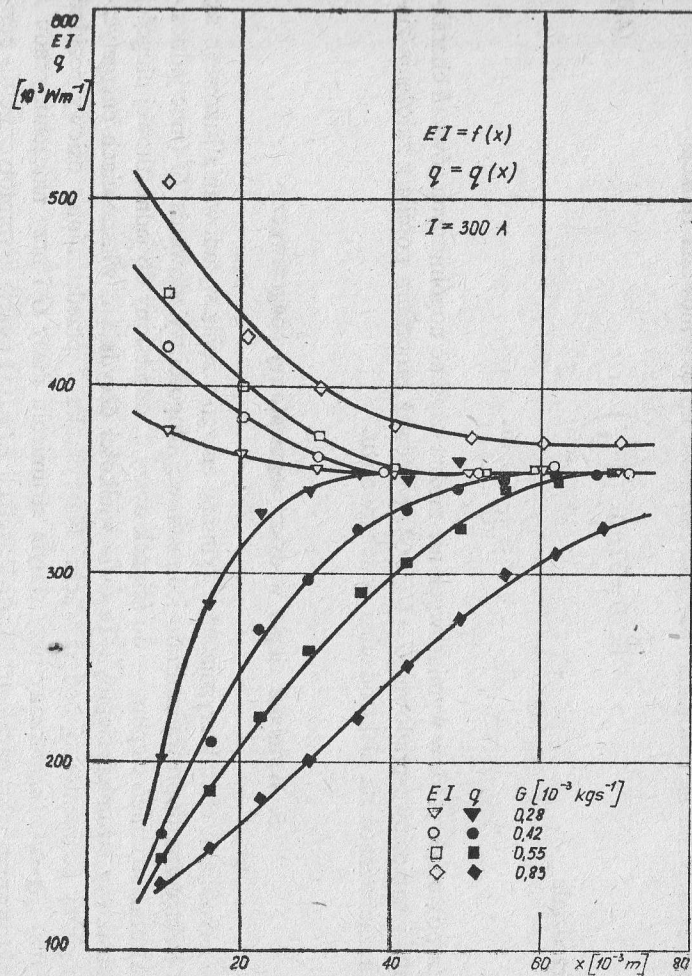
Za pomocą kryteriów wymiarowych nie można uzyskać uogólnionych równań charakterystyki napięciowo-prądowej  $U = U(I, G)$ , ponieważ procedura pomija założenia zjawiska zachodzące na elektrodach i w ich pobliżu.

### 5. Wymiana ciepła w dyszy segmentowej podgrzewacza

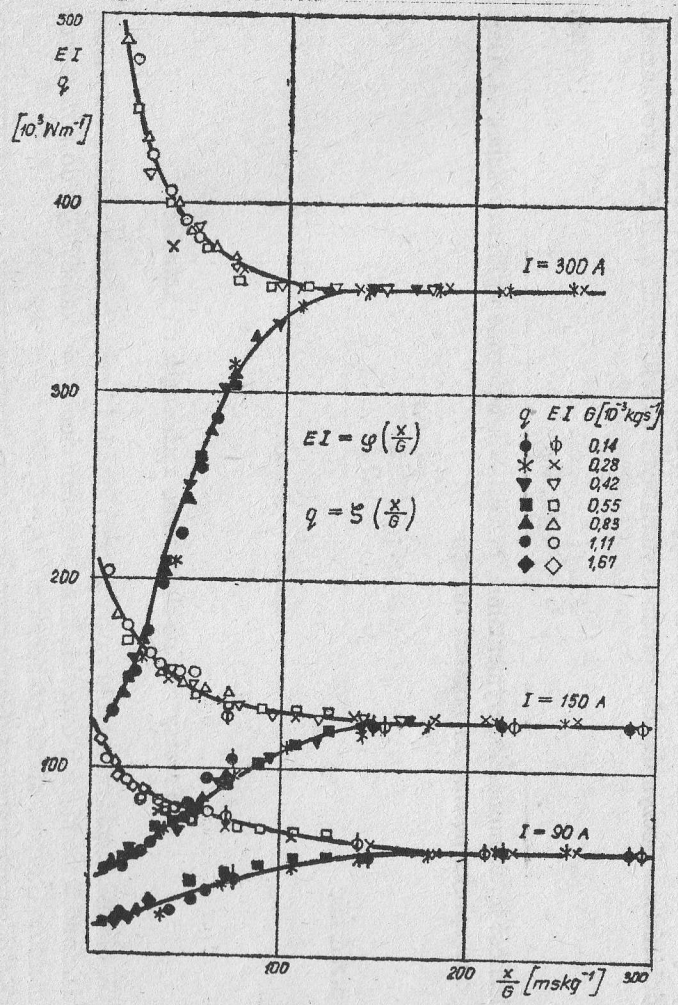
Wielkościami charakteryzującymi wymianę energii wzdłuż wyładowania łukowego są: moc elektryczna doprowadzana do jednostkowej długości wyładowania  $EI$  (moc jednostkowa) oraz strumień ciepły — do ścianek dyszy  $q$ , odniesiony do jednostkowej długości (jednostkowy strumień ciepły). Te dwie wielkości decydują o własnościach energetycznych dyszy segmentowej podgrzewacza. Na rysunku 7 przedstawiono osiowy rozkład  $EI = f(x)$  i  $q = q(x)$  zmierzony przy stałym strumieniu masy  $G$  i przy natężeniu prądu  $I$  potraktowanym jako parametr. Wartość funkcji  $EI = f(x)$  maleje asymptotycznie do pewnej stałej wartości  $E_{\infty}I$ , co wynika z przebiegu funkcji  $E = E(x)$ , zaś  $q = q(x)$  maleje asymptotycznie ze wzrostem odległości  $x$  do  $q_{\infty}$ , przy czym  $E_{\infty}I = q_{\infty}$ . Przebieg taki jest charakterystyczny dla całego zakresu zmian natężenia prądu  $90 \leq I \leq 300$  A. Na podstawie tego wykresu można stwierdzić, iż wartość tych funkcji, a także i  $E_{\infty}I = q_{\infty}$ , wzrastają ze zwiększającym się prądem  $I$ . Wpływ strumienia masy  $G$ , który potraktowano jako parametr, na obydwa rozkłady, pokazano na rysunku 8. Widoczne jest, że przy stałym prądzie  $I = 300$  A, niezależnie od strumienia masy, obie krzywe  $EI = f(x)$  oraz  $q = q(x)$  dążą do ustalonej wartości niezależnej od  $G$ . Z równania (37) można wnioskować, że przy stałej średnicy wielkość  $EI$  zależy od prądu  $I$ , strumienia masy gazu  $G$  (w tym przypadku obie zmienne są uproszczonymi kryteriami) oraz wyrażenia kryterialnego  $x/G$ . Świadczy to o tym, iż zamiast zmiennej  $x$  należy uwzględnić wymiarową liczbę kryterialną  $x/G$ . Uzyskuje się w ten sposób zamiast rodziny jedną parę krzywych odpowiadającą jednemu, określone natężeniu prądu  $I$ , przy dowolnej wartości strumienia masy gazu  $G$ . Rysunek 9 przedstawia zależność jednostkowej mocy doprowadzonej i jednostkowych strat ciepłych od wprowadzonego kryterium  $EI = \varphi(x/G)$  i  $q = \xi(x/G)$  dla trzech wartości natężenia prądu  $I = 90, 150, 300$  A potraktowanego jako parametr. Dobór funkcji aproksymującej może być dokonany na podstawie badań wykonanych w rozszerzonym zakresie. Dla celów konstrukcyjnych bardzo ważna jest znajomość początkowego odcinka wyładowania w kanale  $0 < x < x_{gr}$ , bowiem na nim położone jest maksimum sprawności energetycznej podgrzewacza. Dotychczas przeprowadzono nieliczne próby jego określenia [14, 22, 23]. Przy założeniu, że  $x_{gr}$  jest to odległość od katody, powyżej której jednostkowy strumień ciepły do ścianki jest równy jednostkowej mocy elektrycznej doprowadzonej do wyładowania  $q_{\infty} = E_{\infty}I$ , wykonano wykres  $x_{gr} = x(I)$  dla różnych wartości  $G$  jako parametru (rys. 10).



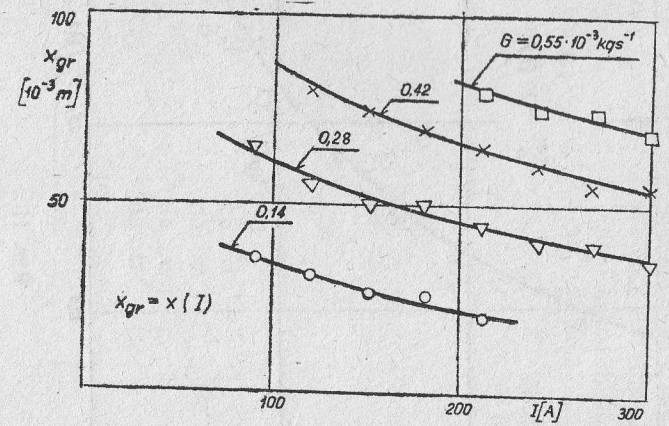
Rys. 7



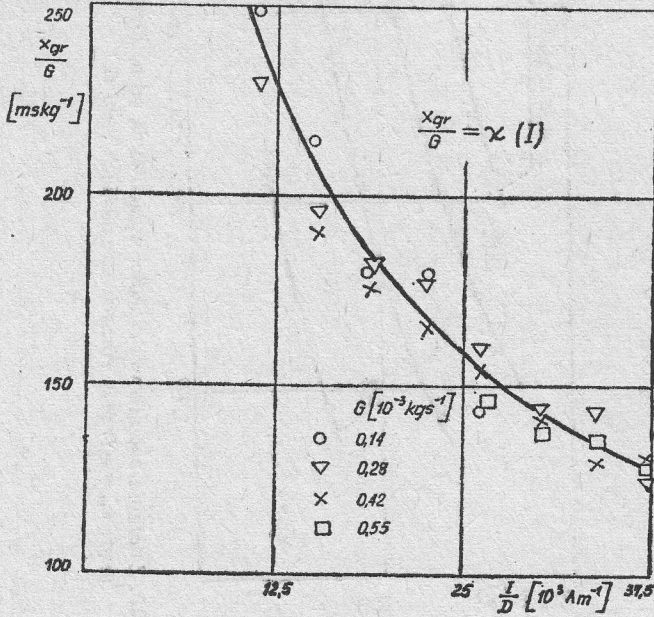
Rys. 8



Rys. 9



Rys. 10. Zależność początkowej długości wyładowania od natężenia prądu  $x_{gr} = x(I)$  przy różnych strumieniach gazu  $G$



Rys. 11

Ponieważ zależność (37) opisuje również w sposób uogólniony rozkład jednostkowych strat cieplnych, to równość  $q_{\infty} = E_{\infty} \cdot I$  warunkująca  $x_{gr}$  daje również swego rodzaju kryterium podobieństwa. Iloczyn dwóch równań kryterialnych określających  $q_{\infty}$  i  $E_{\infty} I$  prowadzi do

$$\frac{x_{gr}}{G} = f\left(\frac{I}{D}, \frac{D^2}{G}\right). \quad (44)$$

Zależność tę, ustaloną eksperymentalnie, przedstawia w formie wykresu rysunek 11. Daje się ona aproksymować za pomocą funkcji

$$\frac{x_{gr}}{G} = 24 \cdot 10^3 \left(\frac{I}{D}\right)^{-0,50}, \quad (45)$$

w przedziale

$$0,06 \leq \frac{D^2}{I} \leq 0,46.$$

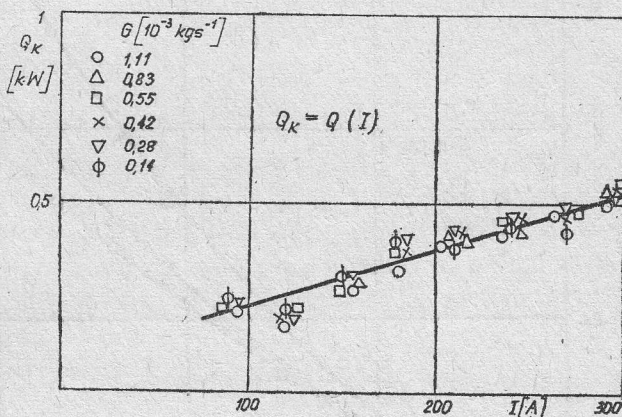
## 6. Procesy ciepno-elektryczne zachodzące na katodzie

W bilansie cieplnym zespołu zawierającego katodę i korpus z dyszą-anodą pomocniczą wydzielono w pomiarach dwa składniki: strumień cieplny do katody  $Q_k$  i do pozostałych elementów (korpus, anoda pomocnicza)  $Q_p - Q_k$ .

Katoda ogrzewana jest głównie przez jony, które przyspieszane w obszarze przykatodowego spadku napięcia uderzają w jej powierzchnię. Utrata energii następuje na skutek ter-



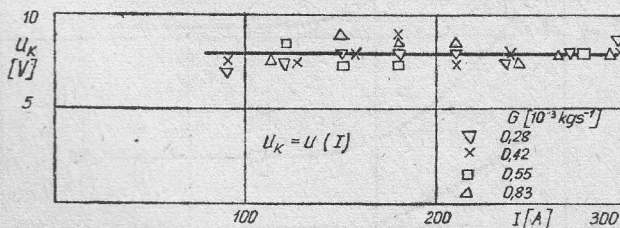
moemisji elektronów. Udział innych czynników jak ciepło Joule'a powstające przy przepływie prądu przez elektrodę, przyjmowanie ciepła od kolumny plazmowej, czy też straty energii na skutek ablacji materiału lub chłodzenia omywającego katodę gazem, może być w pierwszym przybliżeniu pominięty [9, 10, 24]. Stąd też ciepło  $Q_k$  unoszone przez wodę chłodzącą katodę jest związane przede wszystkim z przepływem prądu elektrycznego  $I$ . Zależność  $Q_k = Q(I)$  dla różnych wartości  $G$  przedstawiono na rysunku 12.  $Q_k$  jest w przy-



Rys. 12

bliżeniu proporcjonalne do  $I$ , choć mniejsze dwukrotnie niż to wynika z [24]. Nie stwierdzono wpływu strumienia masy gazu  $G$  na strumień ciepły do katody (rys. 12).

Na rysunku 13 przedstawiono zależność przykatodowego spadku napięcia  $U_k$  od natężenia prądu  $I$  przy różnych wartościach  $G$ . Wartość  $U_k$  otrzymano ekstrapolując rozkład  $U = U(x)$  (rys. 3 i 4) do wartości  $x=0$ , tj.  $\lim_{x \rightarrow 0} U(x) = U_k$ . Jak się okazuje, w badanym zakresie  $I$  spadek przykatodowy nie ulega zmianom i wynosi  $U_k = 8 \pm 1 \text{ V}$ . Ponieważ wartość

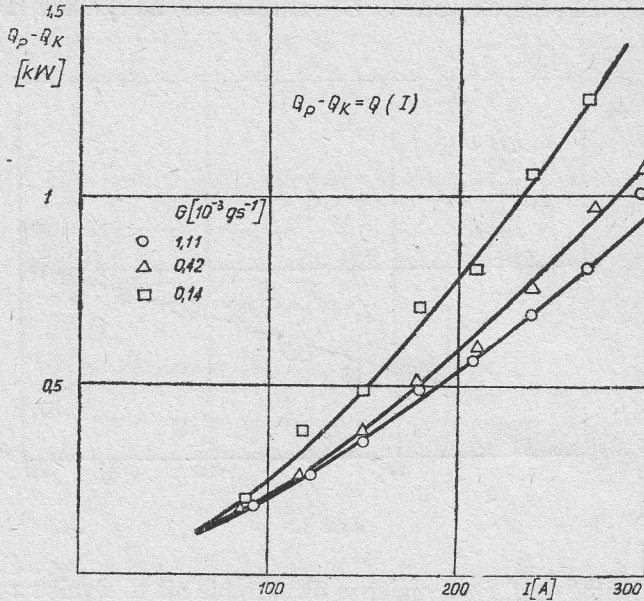


Rys. 13

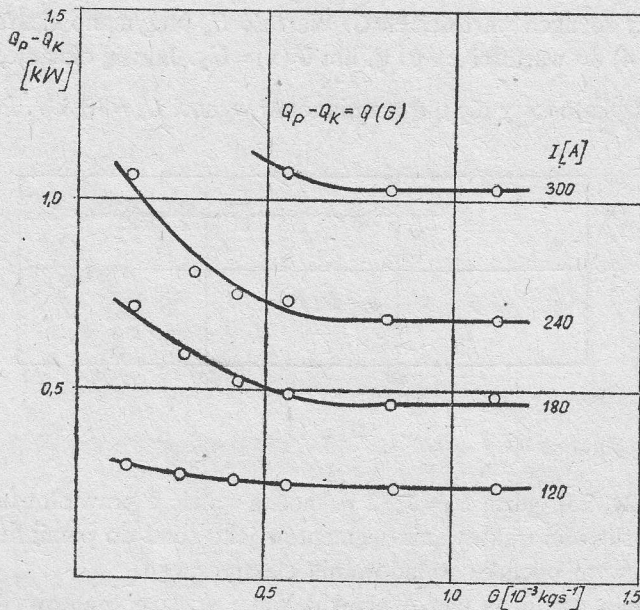
ta jest zgodna z [24, 25], gdzie  $U_k = 7 \pm 2 \text{ V}$ , można sądzić o prawidłowości ekstrapolacji, jak również o możliwości traktowania segmentów jako sond do pomiaru potencjału (por. (23)) na początkowym odcinku wyładowania elektrycznego.

Wpływ natężenia prądu na ciepło przekazywane przez początkowy odcinek wyładowania korpusowi i anodzie pomocniczej  $Q_p - Q_k$  przedstawiono na rysunku 14 dla rów-

nych wartości  $G$ . Zależność ta ma charakter paraboliczny, przy czym wzrost strumienia masy gazu  $G$  powoduje zmniejszenie wartości  $Q_p - Q_k$ . Jak wynika z rysunku 15, na którym przedstawiono zależność  $Q_p - Q_k = Q(G)$  przy zmiennym  $I$ , wartość  $Q_p - Q_k$  ustala się, gdy  $G > 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ kgs}^{-1}$ .



[Rys. 14]



Rys. 15

W badanym podgrzewaczu łukowym wierzchołek katody leży w płaszczyźnie wlotowej kanału. Anodę pomocniczą, w przypadku pomiarów cieplnych, można więc traktować jako pierwszy segment.

Z ustalenia się strumienia cieplnego  $Q_p - Q_k = Q(G) = \text{const}$  przy  $I = \text{const}$  dla  $G > 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ kgs}^{-1}$  można sądzić, że powyżej określonego strumienia gazu  $G$  do korpusu dociera ciepło przenoszone jedynie drogą promieniowania. Jak wynika z [25], w tych warunkach można je pominąć. Na podstawie tych informacji można oszacować jednostkowy strumień cieplny do ścianek dyszy  $q$  w pobliżu katody

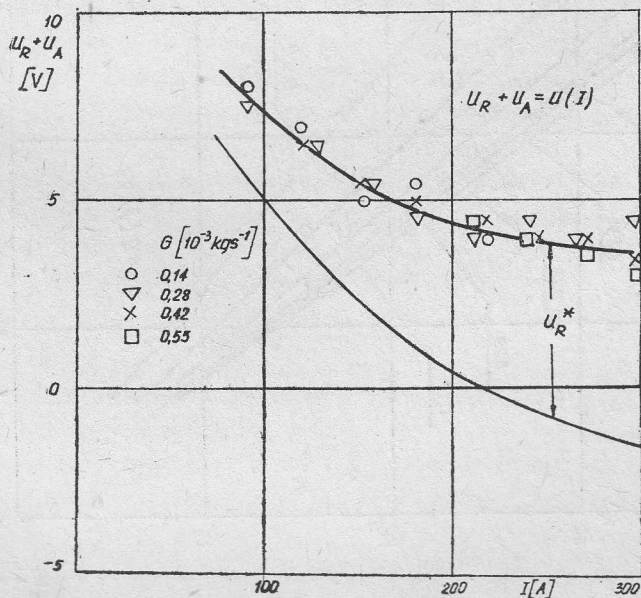
$$\lim_{x \rightarrow \frac{\Delta x_{Ap}}{2}} q(x) \cong \frac{Q_p - Q_k}{\Delta x_{Ap}}, \quad (46)$$

gdzie  $\Delta x_{Ap} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  – długość części walcowej anody pomocniczej. Obliczając na tej podstawie wartość  $q$  w pobliżu katody przy  $I = 300 \text{ A}$  uzyskujemy  $q(\Delta x_{Ap}/2) = 130 \cdot 10^3 \text{ Wm}^{-1}$ . Porównując tę wartość z danymi przedstawionymi na rysunku 8 uzyskuje się potwierdzenie poprawności tych ocen. Świadczy to o tym, że jednostkowy strumień cieplny do ścianek w pobliżu katody ma określoną, niezerową wartość.

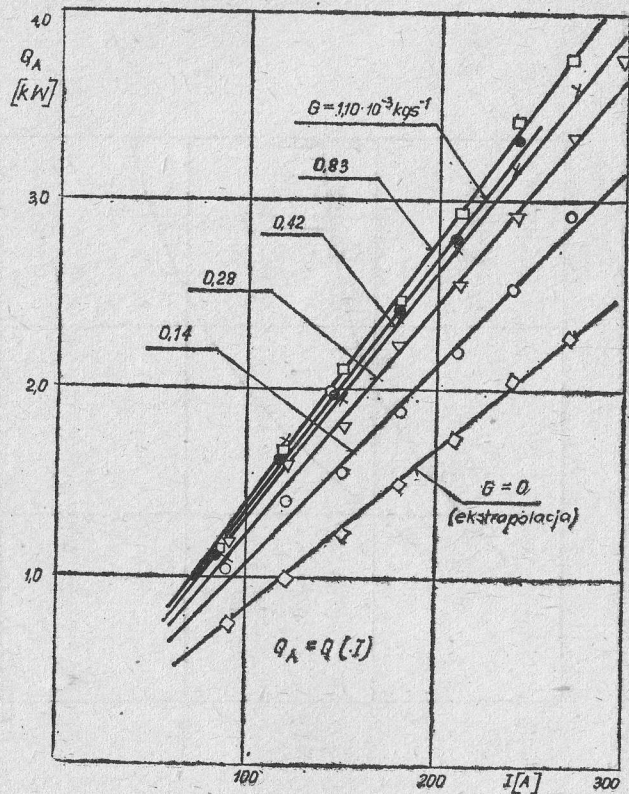
### 7. Procesy ciepłno-elektryczne zachodzące na anodzie i w jej pobliżu

Anoda podgrzewacza łukowego o długości  $\Delta x_A = 10,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  jest końcowym fragmentem dyszy segmentowej. Stąd długość wyładowania wynosi  $x_w = L - \Delta x_A$ .

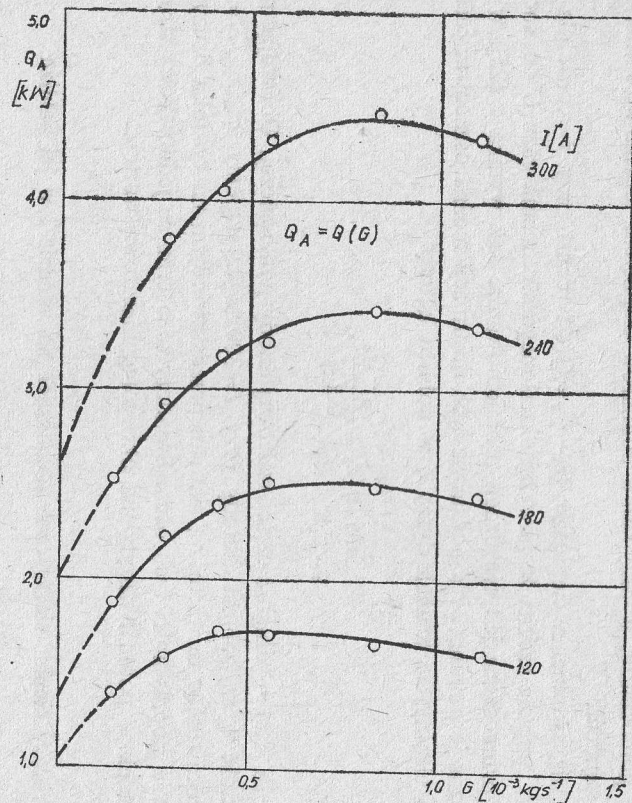
Jak wynika z poprzednich rozważań, zależność potencjału kolumny plazmowej względem katody  $U = U(x)$  jest funkcją monotonicznie wzrastającą dla  $0 \leq x < x_w$ . W odległości



Rys. 16



Rys. 17. Zależność strumienia ciepłego odprowadzonego przez wodę chłodzącą anodę  $Q_A$  od natężenia prądu  $I$  przy różnych wartościach  $G$



Rys. 18. Zależność strumienia  $Q_A$  od strumienia  $G$  przy różnych wartościach  $I$

$x=x_w$  funkcja osiąga wartość równą całkowitemu spadkowi napięcia na wyładowaniu  $U_w$ . Różni się ona od wartości uzyskanej z ekstrapolacji zależności  $U=U(x)$  do wartości  $x=x_w$  o sumę spadku napięcia w odgałęzieniu anodowym  $U_R$  i przyanodowego spadku napięcia  $U_A$ , co można zapisać w postaci

$$U_w - \lim_{x \rightarrow x_w} U(x) = U_R + U_A. \quad (47)$$

Wykorzystując rozkład potencjału wzdłuż wyładowania (rys. 3), określono sumę  $U_R + U_A$  i przedstawiono ją na rysunku 16 jako funkcję natężenia prądu  $I$ . Suma ta maleje ze wzrostem  $I$  i nie zależy od strumienia masy  $G$ . Dla oszacowania choćby jednego ze składników przyjęto daleko idące w uproszczeniach założenie, że średnie natężenie pola elektrycznego w kierunku radialnym  $E_R$  jest nie mniejsze od natężenia w kierunku osiowym w warunkach ustalonych  $E_\infty$

$$E_R \geq E_\infty. \quad (48)$$

Założenie to wynika stąd, że w kierunku osiowym przewodność elektryczna  $\sigma$  ma wartość ustaloną, zaś w promieniowym silnie maleje w kierunku ścianki. Minimalny spadek napięcia w kierunku radialnym (por. [1]) wyniesie więc

$$U_R^* \cong E_\infty R. \quad (49)$$

Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rysunku 16, uzyskując dwa ważne wnioski: 1) przy większych prądach  $I$  plamka anodowa przechodzi w dyfuzyjną ( $U_A < 0$ ); 2) odgałęzienie anodowe odgrywa istotną rolę w nagrzewaniu gazu, zwłaszcza w krótkiej dyszy.

Strumień ciepły przejmowany przez wodę chłodzącą anodę  $Q_A$  jest w przybliżeniu proporcjonalny do natężenia prądu  $I$  (rys. 17). Nachylenie prostych zwiększa się ze wzrostem strumienia masy gazu  $G$  osiągając ekstremum. Wielkość  $Q_A/I$  zwana w literaturze [10, 29, 30] napięciowym ekwiwalentem całkowitego strumienia ciepłego do anody, osiąga wartości  $9,5 \div 14$  V. Decyduje o niej, jak należy sądzić, rozwiązanie konstrukcyjne zespołu anodowego [10, 27]. Osiągane maksimum jest widoczne wyraźnie na rysunku 18, który przedstawia zależność  $Q_A = Q(G)$  dla różnych wartości  $I$ .

Ustalając doświadczalnie zależności  $Q_A = Q(I, G)$  oraz  $q_\infty = q(I)$  przy  $x \geq x_{gr}$  zweryfikowano określone uprzednio składniki sumy  $U_R + U_A$  szacując tym razem  $U_A$ . Uproszczone bilans ciepły, który pomija zjawisko ubytku masy anody przez odparowanie i promieniowanie powierzchni anody [10, 26, 28 ÷ 31] ma postać

$$Q_A = Q_{Ae} + Q_{Ac}, \quad (50)$$

gdzie  $Q_{Ae}$  – moc doprowadzana do anody na drodze elektrycznej,  $Q_{Ac}$  – moc przejmowana przez anodę od rozgrzanego gazu.

Przy dodatkowym założeniu dominującej roli prądu elektronowego ( $I_e \cong I$ ) składowa elektryczna  $Q_{Ae}$  wyrażana jest zależnością [28]

$$Q_{Ae} = I \left( \frac{5}{2} \frac{kT}{e} + U_A + \Phi_A \right), \quad (51)$$

gdzie  $\Phi_A$  praca wyjścia [V].

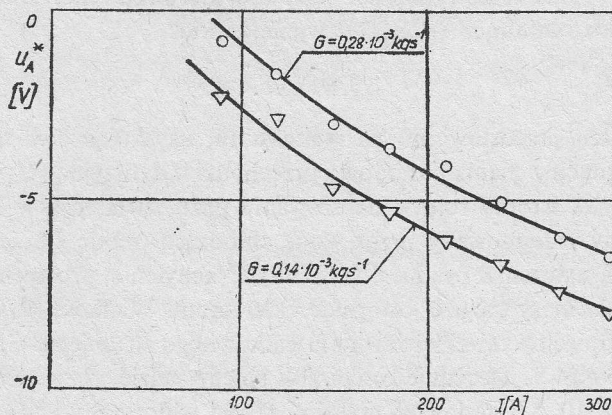
Moc przejmowaną przez anodę od kolumny plazmowej  $Q_{Ac}$  określono znając ustalony jednostkowy strumień ciepły do dyszy  $q_{\infty}$  oraz długość anody  $\Delta x_A$

$$Q_{Ac} \cong q_{\infty} \Delta x_A. \quad (52)$$

Na podstawie zależności (50) i korzystając z (51) i (52) przyanodowy spadek napięcia można wyrazić w postaci

$$U_A^* = \frac{Q_A - q_{\infty} \Delta x_A}{I} - \frac{5}{2} \frac{kT}{e} - \Phi_A. \quad (53)$$

Przyjęto dla pracy wyjścia miedzi [10, 33, 34] wartość  $\Phi_A = 4,4$  eV. Dla temperatury elektronów  $T = 10 \cdot 10^3$  K [28] entalpia elektronów wynosi  $\frac{5}{2} \frac{kT}{e} = 2,2$  V. Określona w ten sposób zależność przyanodowego spadku napięcia  $U_A^*$  od natężenia prądu  $I$  przyjmuje w całym zakresie pomiarowym wartość ujemną. Przedstawiono ją na rysunku 19. Po-



Rys. 19

twierdza to założenia przyjęte w [29 ÷ 31] i wskazuje, że średnie natężenie pola elektrycznego w warstwie przyanodowej jest mniejsze niż w kolumnie wyładowania łukowego. Co oznacza, że prąd elektryczny w pobliżu anody jest przenoszony dyfuzyjnie, zwłaszcza dla większych  $I$  [31].

## 8. Wnioski końcowe

Przeprowadzone badania zjawisk elektrotermicznych w podgrzewaczu łukowym z dyszą segmentową pozwalają ustalić, w zakresie badanych parametrów, następujące wnioski:

a. Ustalona wartość jednostkowej mocy elektrycznej doprowadzonej do wyładowania jest równa ustalonemu jednostkowemu strumieniowi cieplnemu do dyszy i nie zależy od strumienia masy gazu.

b. Odległość od katody, na której następuje zrównanie się  $EI$  i  $q$ , maleje ze zwiększeniem natężenia prądu  $I$ . Zależność tę można opisać stosując kryteria wymiarowe

$$\frac{x_{gr}}{G} = 24 \cdot 10^3 \left( \frac{I}{D} \right)^{-0,50}$$

c. Zależność ustalonej wartości natężenia pola elektrycznego  $E_\infty$  od natężenia prądu  $I$  można aproksymować związkiem empirycznym

$$E_\infty D = 37 \cdot 10^{-3} \left( \frac{I}{D} \right)^{0,52}$$

d. Wartość przykatodowego spadku napięcia wynosi  $U_k = 8 \pm 1$  V.

e. Wartość przyanodowego spadku napięcia jest ujemna przy większych natężeniach prądu.

f. W bilansie cieplnym anody główną rolę odgrywa kolumna plazmowa oraz odgałęzienie anodowe.

Uzyskane wnioski, mimo ich przybliżonego charakteru, pozwalają określić warunki podobieństwa zjawisk zachodzących w kanale podgrzewacza. Związki wynikające z zasady podobieństwa uprościły badanie podgrzewacza łukowego gazu oraz umożliwiły uogólnienie wyników pomiarów.

Praca wpłynęła do Redakcji w lipcu 1979 r.

#### Literatura

- [1] Ispolzowanie plazmy w chemiczeskich prociessach. Praca zbiorowa (tłum. z j. ang.). Izd. Mir, Moskwa 1970.
- [2] G. A. Stine, *Wysokotemperaturnaja, swierchzrukowaja aerodinamiczeskaja truba*. [W:] *Issledowanija pri wysokich temperaturach* (tłum. z j. ang.), Izd. Nauka, Moskwa 1967.
- [3] *Zastosowanie plazmy niskotemperaturowej w przemyśle* (materiały konferencyjne), Częstochowa 1977.
- [4] *Fizika i tiechnika niskotemperaturnoj plazmy*. Praca zbiorowa pod red. S. W. Dreswina, Izd. Atomizdat, Moskwa 1972.
- [5] G. J. Dautow, M. F. Żukow, *Niekotoryje obobszczenija issledowanij eliektriczieskich dug*. Prikl. Miech. i Tiechn. Fizika, 2, 1965.
- [6] G. J. Dautow, M. P. Żukow, *Kritierialnoje obobszczenije charakteristik plazmotronow wichriewoj schiemy*. Prikl. Miech. i Tiechn. Fizika, 6, 1965.
- [7] O. I. Jaśko, *Woprosy obobszczenija charakteristik elektriczieskich dug*. Inż.-Fiz. Żurnał, 15, 3, 1968.
- [8] O. I. Yás'ko, *Correlation of the characteristic od electric arcs*. Brit. J. Appl. Phys. (J. Phys. D.), 2, 2, 1969.
- [9] M. F. Żukow, W. J. Smoljakow, B. A. Urjukow, *Elektrodugowyje nagriewatieli gaza*. Izd. Nauka, Moskwa 1973.
- [10] M. F. Żukow, A. S. Korotiejew, B. A. Urjukow, *Prikladnaja dinamika tiermiczeskoj plazmy*. Izd. Nauka, Nowosibirsk 1975.
- [11] A. G. Szaszkow, K. Krejči i in., *Tieploobmien w elektrodugowom nagriewatieli gaza*. Izd. Energija, Moskwa 1974.
- [12] D. F. Bożko, J. W. Kuroczkin i in., *Rascziot tieczenija gaza w kanale plazmotrona liniejnoy schiemy*. Tiezisy dokładow V wsiesojuznoj konfierencii po gienieratoram niskotemperaturnoj plazmy, Nowosibirsk 1972.
- [13] J. W. Kuroczkin i in., *Wzaimodiejstwije turbulentnowo potoka gaza s elektriczieskoj dugoj*. Tieplofiz. Wys. Temp., 13, 6, 1975.

- [14] W. W. Bover, F. P. Incropera, *Heat Transfer, Development Length and Friction Factor Correlations for the Asymptotic Region of a Laminar Arc Constrictor*. Wärme- und Stoffübertragung, Bd. 2, 1969.
- [15] R. E. Johnstone, M. W. Thring, *Instalacje doświadczalne, modele i metody powiększania skali*. PWT, Warszawa 1960.
- [16] H. L. Langhaar, *Dimensional Analysis and Theory of Models*. New York 1950.
- [17] L. Müller, *Zasady teorii podobieństwa*. Poradnik inżyniera mechanika. WNT, Warszawa 1970.
- [18] O. I. Jaško, *Obobsczenije charakteristik elektriczeskich dug*. Inż. Fiz. Żurnał, 7, 12, 1964.
- [19] R. Niewiedział, *Uogólnienie charakterystyk wyładowania łukowego w łukowym palniku plazmowym prądu stałego*. Rozprawy Elektrotechniczne, 18, 4, 1972.
- [20] J. Kiełbiński, S. Ginal, H. Szczepańska, *Opracowanie projektu i wykonanie stoiska do badania i zdejmowania charakterystyk podgrzewaczy łukowych*. Oprac. zewn. nr 33/71, IMP-PAN Gdańsk.
- [21] S. Ginal, *Wyniki badań podgrzewacza łukowego z dyszą segmentową*. Biuletyn IMP-PAN nr 96/790/74.
- [22] M. J. Smielanskij, E. K. Žigałko, A. B. Kuwałdin, *Ekspierimentalnje issledowanija eniergietyczeskich sootnoszenij w plazmotronie s dugoj stabilizirowannoj potokom argona*. Tieplofiz. Wys. Tiemp., 5, 6, 1967.
- [23] E. P. Pachomow, I. M. Jarcew, *Ekspierimentalnoje opriedielenije dliny i charakteristik naczałnowo uczastka w stabilizirowannoj elektriczeskoj dугie*. Tieplofiz. Wys. Tiemp., 15, 5, 1977.
- [24] *Prielektrodnije prociessy i erozija elektrodow plazmotrona*. Praca zbiorowa pod red. M. F. Żukowa, Izd. SO AN SSSR, Nowosibirsk 1977.
- [25] W. Finkelburg, W. Maecker, *Elektriczeskije dugi i tiermiczeskaja plazma*. Izd. Inostr. Litierat., Moskwa 1961.
- [26] L. A. Lukens, F. P. Incropera, *Anode Heat Transfer in a Constricted Tube Arc*. AIAA Journal, 9, 12, 1071.
- [27] S. Ginal, *Wpływ poprzecznego, wirującego pola magnetycznego na pracę podgrzewacza łukowego z dyszą segmentową*. Biuletyn IMP-PAN nr 175/858/1976.
- [28] E. Pfender, E. R. Eckert, G. D. Raithby, *Energy Transfer Studies in a Wall-Stabilized Cascaded Arc*. Phenom. in Ionized Gases, Proc. of the V-th Intern. Conf., Belgrad 1965.
- [29] A. M. Dordonow i in., *Srawnitielnye charakteristiki prinuditel'nowo ochładzajemowo i radiacionno ochładzajemowo dugowych anodow*. Tieplofiz. Wys. Tiemp., 13, 3, 1975.
- [30] N. S. Mierinow i in., *Ekspierimentalnoje issledowanije anodnych prociessow w režimie otrical'nowo prielektrodnowo padienija potenciała*. Żurnał Tiechn. Fiziki, 46, 4, 1976.
- [31] W. A. Niemczinskij, Ł. N. Pierietc, *Prianodnyj stoj silnotocznoj dugi wysokowo dawlenija*. Żurnał Tiechn. Fiziki, 47, 9, 1977.
- [32] A. W. Donskoj i in., *Wlijanije dliny dugi na eniergietyczeskije charakteristiki plazmotrona*. Tieplofiz. Wys. Tiemp., 8, 5, 1970.
- [33] Z. Celiński, *Podstawy fizyki plazmy w zastosowaniach technicznych*. WNT, Warszawa 1970.
- [34] M. Sugawara, *Anode Melting Caused by a d. c. Arc Discharge and its Applications to the Determination of the Anode Fall*. Brit. J. Appl. Phys. 18, 12, 1967.

## Электротермические процессы в газовом электродуговом нагревателе с секционированным соплом

### Резюме

В работе представлен анализ теплоэлектрических явлений в газовом электродуговом нагревателе с секционированным соплом. Основываясь на принципе подобия и результатах экспериментальных исследований определяется характер изменений распределения единичной энергии приводимой и отводимой вдоль канала. Определено прикатодное падение потенциала  $U_k$  и обнаружено отрицательное значение падения прианодного потенциала.



## Electrothermal Processes in a Wall Stabilized Arc Plasma Generator

### Summary

The paper presents an analysis of electrothermal processes in a wall stabilized arc plasma generator. Basing on the similarity principle and own experimental results the distributions of energy supplied and extracted per unit length of the heater channel are shown. The cathode voltage drop  $U_c$  is also determined and the negative value of the drop revealed.