

P O L S K A A K A D E M I A N A U K  
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE  
INSTYTUTU MASZYN  
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS  
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

62-63

WARSZAWA—POZNAŃ 1973

---

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

---

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

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

---

KOMITET REDAKCYJNY - EXECUTIVE EDITORS  
KAZIMIERZ STELLER - REDAKTOR - EDITOR  
JERZY KOŁODKO · JÓZEF ŚMIGIELSKI  
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA - EDITORIAL OFFICE  
Instytut Maszyn Przepływowych PAN, 80-952 Gdańsk,  
skr. pocztowa 621, Gdańsk-Wrzeszcz, ul. Gen. Józefa Fiszer 14, tel. 41-12-71

Copyright  
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe  
Warszawa 1973

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 410+90 egz.	Oddano do składania 19 XII 1972 r.
Ark. wyd. 19,5. Ark. druk. 15,375+2 wkł.	Podpisano do druku 29 IX 1973 r.
Pap. druk. sat. kl. V, 70 g	Druk ukończono w październiku 1973 r.
Nr zam. 814/155	D-15/787 Cena zł 58,-

DRUKARNIA UNIwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu

Czwarte Seminarium poświęcone zagadnieniom  
MAGNETOHYDRODYNAMIKI STOSOWANEJ  
I GAZODYNAMIKI WYSOKICH TEMPERATUR

Jena, maj 1972

Čtvrtý Seminař o  
APLIKOVANÉ MAGNETOHYDRODYNAMICE  
A DYNAMICE PLYNU ZA VYSOKÝCH TEPLŮT

Jena, květen 1972

Viertes Arbeitsseminar über Fragen  
DER ANGEWANDTEN MAGNETOHYDRODYNAMIK  
UND HOCHTEMPERATUR-GASDYNAMIK

Jena, Mai 1972

Fourth Seminar on  
APPLIED MAGNETOHYDRODYNAMICS  
AND HIGH TEMPERATURE GASDYNAMICS

Jena, May 1972

Четвертый Семинар по  
ПРИКЛАДНОЙ МАГНИТОГИДРОДИНАМИКЕ  
И ГАЗОДИНАМИКЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Ена, май 1972 г.

JAROSLAV KUČERA

Praha\*

## Untersuchung der Eigenschaften eines Plasmabrenners

### 1. Einleitung

Im Institut für Thermomechanik der ČSAV wurden schon früher Methoden der Messung lokaler Temperaturen, der Pitotdrücke, der Wärmeströme, des Wärmestrahlungsanteils am Freistrahle des hochoverhitzten Gases entwickelt [11]. Nach Inbetriebsetzung des Laborplasmabrenners 100 V mit einem durch den Wirbel stabilisierten langen Bogen wurden diese Methoden im Argonplasmastrom überprüft und einer Vervollkommnung unterzogen. Diese diagnostischen Methoden ermöglichten auch, die Eigenschaften des hochoverhitzten Strahls zu studieren.

Systematische Messungen in der Stauzone, die bei drei Varianten der Bogenlänge durchgeführt wurden, erwiesen einen qualitativ abweichenden Verlauf des Wärmestroms in einigen Zonen der Voltampercharakteristiken des Plasmabrenners. Weitere Messungen, die im begrenzten Arbeitsbereich durchgeführt wurden, erwiesen auch unterschiedliche Temperaturprofile und Profile der Pitotdrücke, verschiedenartige Typen der Schwankungen der Elektrodenspannungen und der sichtbaren Form des Strahls.

Die Beschreibung des entwickelten Plasmabrenners, die Ergebnisse der Messungen und ihre Erörterung bildet das Hauptthema dieses Aufsatzes.

### 2. Beschreibung des Plasmabrenners 100 V

Ende 1968 wurde ein Plasmabrenner vom Typ 100 V mit einem durch den Wirbel stabilisierten Bogen in Betrieb gesetzt\*). Der Plasmabrenner weist eine befriedigende Betriebsfähigkeit auf, Abbrennung resp. Verschleiss einzelner Teile wurde nicht festgestellt, Betriebsstörungen traten nur selten ein. Die Konstruktion hat sich voll bewährt, da sie eine, verhältnismässig einfache Änderung der Bogenlänge sowie auch des Austrittsdurchmessers ermöglicht.

Den Längsschnitt durch den mittellangen Plasmabrenner mit 14 Platten  $P$  zwischen der Hilfs- und Hauptanode, der als Typ V-14/8 bezeichnet wurde, zeigt Abb. 1. Es wurden

\* Ústav termomechaniky ČSAV, Praha.

\*) An der Entwicklung nahm massgebenden Teil Herr Dipl. Ing. G. Miczek [1].

weiter noch zwei Varianten der Bogenlänge, u. zw. kurzer Plasmabrenner mit 4 Platten (Bezeichnung 100 V-4/8, mit Bogenlänge 72 mm) und langer Plasmabrenner mit 18 Platten (Bezeichnung 100 V-18/8, mit Bogenlänge 148 mm) gemessen.

Der Plasmabrenner [2] ist aus plattenförmigen Kupferteilen zusammengesetzt, die durch destilliertes Wasser gekühlt werden (besondere Kühlkanäle sind in den Platten ausgebildet). Die geformten Dichtungen zwischen den Teilen schliessen die Räume für Wasser und Arbeitsgas ab und gleichzeitig stellen sie eine elektrische Isolierung der Teile dar, damit beim langen Hauptbogen kein Nebenbogen entsteht.

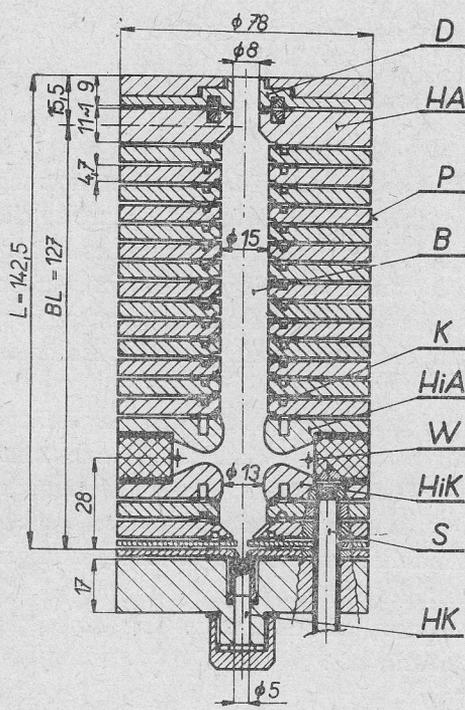


Abb. 1. Mittellanger Plasmabrenner Typ 100 V - 14/8

*D* – Düse, *HA* – Hauptanode, *P* – Platte, *B* – Bogenkammer, *K* – Kanal, *HiA* – Hilfsanode, *W* – Wirbelkammer mit tangenzialem Argonzufluß, *HiK* – Hilfskathode, *S* – Stromzuleitung zu der *HiK*, *HK* – Hauptkathode aus thoriertem Wolfram, *BL* – Bogenlänge

Das Starten des Brenners erfolgt mit Hilfe des Hochfrequenz-Zündgerätes, das den Bogen zwischen den Hilfselektroden anzündet, wobei der Wirbel sofort den Bogen auf die Hauptelektroden überträgt. Die sichtbare Länge des Plasmastrahls von 8 mm Durchmesser beträgt 25 - 50 mm.

Die Anschlüsse von Strom-, Wasser- und Argonzufuhr sind von der Seite der Hauptkathode elastisch ausgeführt, um den Plasmabrenner tragbar zu gestalten.

Die Stromversorgung des Brenners erfolgt über einen Gleichrichter mit Ausgangstromfrequenz von 300 Hz. Die Spannung kann in 9 Stufen zwischen 130 - 530 V gewählt und die Stromintensität kontinuierlich im Bereich 40 bis 180 A reguliert werden.

Die Voltampercharakteristiken von 3 Varianten der Bogenlänge des Plasmabrenners für konstante Werte des Argondurchflusses sind auf Abb. 2 dargestellt. Bei dem kurzen Plasmabrenner sinkt die Charakteristik im Arbeitsbereich, während die zwei anderen Varianten eine steigende Tendenz aufweisen [3]. Bei wiederholten Messungen unter densel-

ben Bedingungen, d.h. für konstanten Strom- und konstanten Gasdurchfluß, zeigte sich bei der Bogenspannung eine Streuung von  $\pm 1,5$  V (was ungefähr  $\pm 2\%$  ist) auf, was teils durch den Stand der Elektrodenoberflächen, teils durch andere Ursachen bedingt ist. Die einzelnen Zonen A bis G werden später beschrieben.

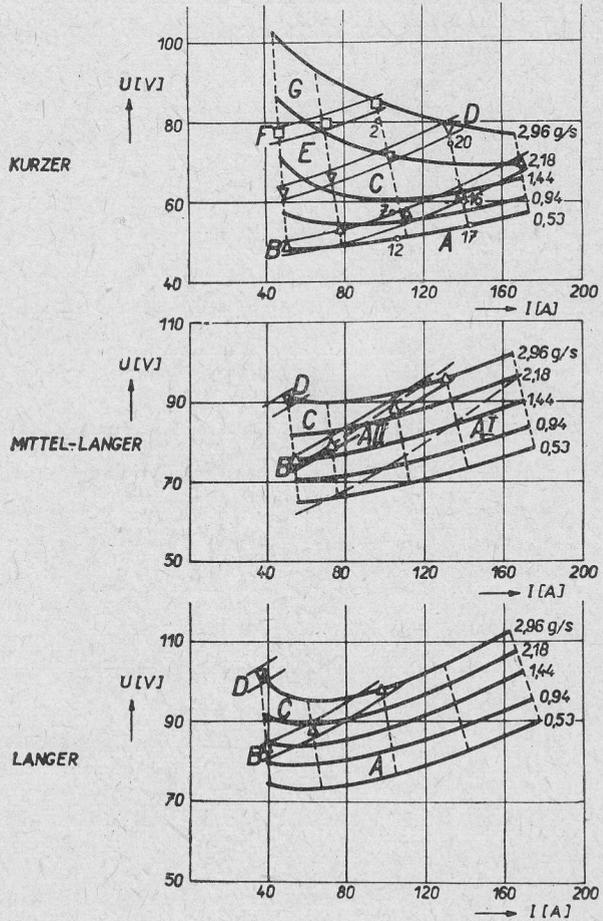


Abb. 2. Voltampercharakteristiken Typ 100 V mit Argon, 8 mm Durchmesser  
Messungen 2, 7, 12 usw. entsprechen [9, Abb. 2]

Auf Grund der gemessenen Werte wurden berechnet: die elektrische Leistung des Bogens, die Wärmeverluste durch Kühlung des Plasmabrenners, der Wirkungsgrad der Wärmeübertragung in den Gasstrahl, die mittlere Enthalpie, die mittlere Temperatur und die Geschwindigkeit am Düsenaustritt.

Die verglichenen drei Varianten der Bogenlänge beim Argondurchfluß von 0,37 bis zu 3,0 g/s weisen einen Wirkungsgrad von 20 - 70% auf, bei mittleren Argontemperaturen am Düsenaustritt 2100 - 10 500°K und mittlerer Austrittsgeschwindigkeit von 120 bis zu 850 m/s.

Es ist bemerkenswert, daß bei einem bestimmten elektrischen Stromwert die mittleren Temperaturen mit dem steigenden Argondurchfluß sinken, während die Maximaltemperaturen steigen. Es ist anzunehmen, daß diese Erscheinung mit der Konzentration des glühenden Kernes infolge des Stabilisierungswirbels zusammenhängt.

### 3. Qualitativ abweichender Verlauf der Wärmeströme in der Stauzone

Die in der Stauzone (Entfernung von 15 mm, d.h. 1,8 – facher Austrittsdurchmesser) gemessenen Wärmeströme für 3 Varianten des Plasmabrenners 100 V stellt Abb. 3 dar [4, 10]. Besonders der kurze Bogen (das obere Diagramm) weist einen bemerkenswerten

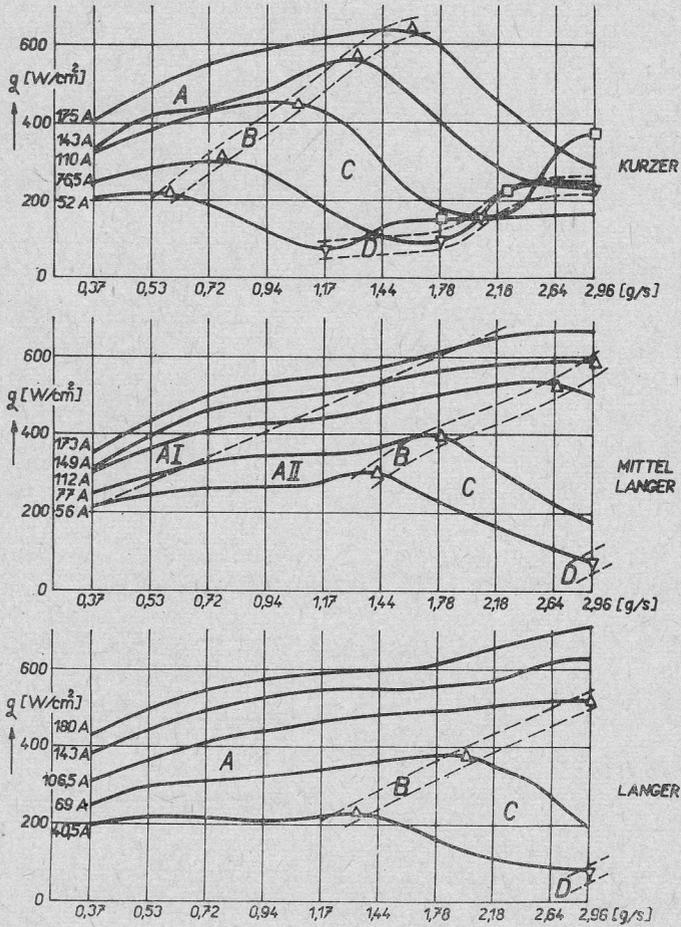


Abb. 3. Wärmeflüsse der drei Varianten des Typs 100 V mit Argon

Verlauf auf. Die Analyse zeigte die Abhängigkeit des Wärmestromes vom Gasdurchfluß und dem Bogenstrom. Den ganzen Betriebsbereich des Plasmabrenners kann man in 7 qualitativ verschiedene Zonen einteilen:

Zone A – Der Wärmestrom wächst sowohl mit der Strom- als auch mit der Gasdurchflußerhöhung.

Zone B – Beim konstanten Strom wird der maximale Wärmestrom (100%) nur bei einem Gasdurchfluß erreicht.

- Zone *C* – Der Wärmestrom wächst mit der Stromerhöhung, aber sinkt mit der Durchflußerhöhung.
- Zone *D* – Beim konstanten Strom sinkt der Wärmestrom auf das Minimum (ca 35 - 40%) nur bei einem Gasdurchfluß.
- Zone *F* – Bei kleinen elektrischen Strömen (52, 76,5, 110 A) sind die Wärmeströme durch einen Viereck ( $\square$ ) bezeichnet (ca 65 - 70%), u. zw. dort, wo eine Verlangsamung der Wärmestromzunahme bei gleichmässiger Durchflußsteigerung eintritt.
- Zone *E* – (rasche Wärmestromzunahme), die bereits erwähnte Zone *F* und
- Zone *G* – (langsame Wärmestromzunahme) sind zwar von den Linien des Wärmestroms ersichtlich, sie sind jedoch im Diagramm nicht eingezeichnet, da sie sich gegenseitig überdecken.

Diese Zonen wurden auch in den Voltampercharakteristiken auf Abb. 2 dargestellt. Die Zone *A* nimmt beim kurzen Plasmabrenner nur einen kleinen Teil des Arbeitsbereiches, ein, während die übrigen Zonen *C* und *D* die meisten Regime einnehmen. Bei den zwei anderen Varianten erstreckt sich dagegen die Zone *A* auf den überwiegenden Teil des Arbeitsbereiches, die Zone *D* zeigt sich nur beim minimalen Strom; die Zonen *E*, *F*, *G* fehlen.

Im Arbeitsbereich wurde beim kurzen Brenner der größte Wärmestrom  $645 \text{ W/cm}^2$  erzielt, beim mittellangen  $670 \text{ W/cm}^2$  und beim langen  $700 \text{ W/cm}^2$ .

Das Minimum des Wärmestromes (Zone *D*) wurde wahrscheinlich durch die wechselseitige komplizierte Wirkung der Mikrostruktur des Plasmastrahls und der umgebenden Luft verursacht, durch den Einfluß des stabilisierenden Wirbels und auch des komplizierten Mechanismus der Wärme- und Stoffübertragung bei hohen Temperaturen. Soweit uns bekannt, hat sich bis jetzt mit diesem Problem kein Autor in der Fachliteratur befaßt.

#### 4. Die übrigen qualitativ abweichenden Größen

Die Schwankungen der Bogen Spannung [2], maximale Temperatur des Stroms [5, 6, 7] und dynamischer Druck [8, 9] konnten leider nur in begrenzten Arbeitspunkten festgestellt werden. Trotzdem versuchten wir die gemessenen Werte den erwähnten Zonen *A* bis *G* zuzuordnen, um ein möglichst breites Bild zur weiteren Klärung des Mechanismus der erwähnten Erscheinungen zu bekommen.

Die Schwankungen der Bogen Spannung beim mittellangen Brenner stellt Abb. 4 dar:

- in der Zone *A I* (Abb. 2) entspricht die Frequenz 300 Hz und die Amplitude 4 V den charakteristischen Grundpulsationen des gleichgerichteten Stroms;
- in den Zonen *A II*, *B* und *C* wurden die Grundpulsationen von 300 Hz mit Schwankungen von 10 - 25 kHz und Amplitude von 0,3 bis 2,5 V moduliert;
- in der Zone *D* – minimaler Wärmestrom – sind die Grundpulsationen mit Schwankungen von Frequenz etwa 14 kHz und Amplitude etwa 4 V völlig überdeckt. Es scheint, daß hier eine Resonanzerscheinung entsteht, die Eigenschaften des Plasmastrahls beeinflußt.

Über die Schwankungen beim kurzen Plasmabrenner liegen bis jetzt keine Angaben vor, deswegen können wir auch keine entsprechende Beschreibung der Schwankungen in den Zonen *E* bis *G* bieten.

Der Zusammenhang der Zonen A bis G mit dem Strömungsfeld des Plasmastrahls des kurzen Plasmabrenners zeigt Dundrin [9, Abb. 2].

— In der Zone A, bei der Messung 17 (siehe Abb. 2 dieses Beitrags) ist das Pitotdruckprofil an der Düse parabelähnlich und symmetrisch;

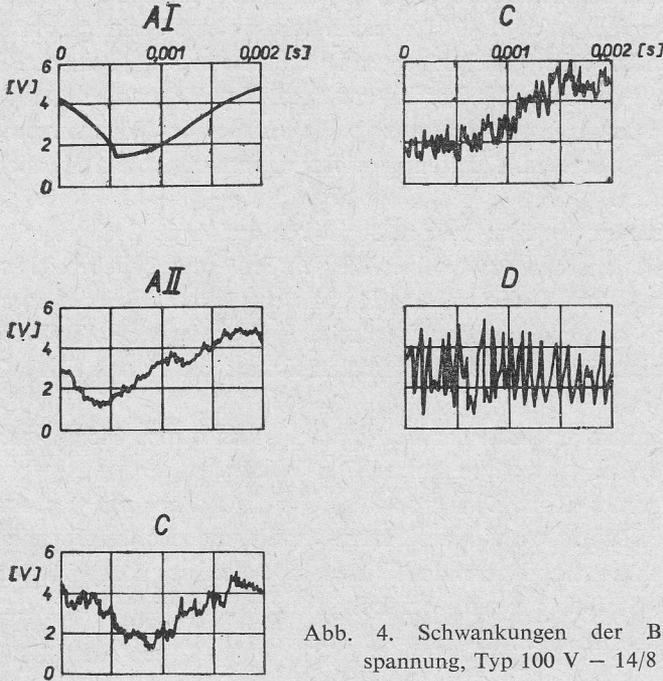


Abb. 4. Schwankungen der Bogen-  
spannung, Typ 100 V – 14/8

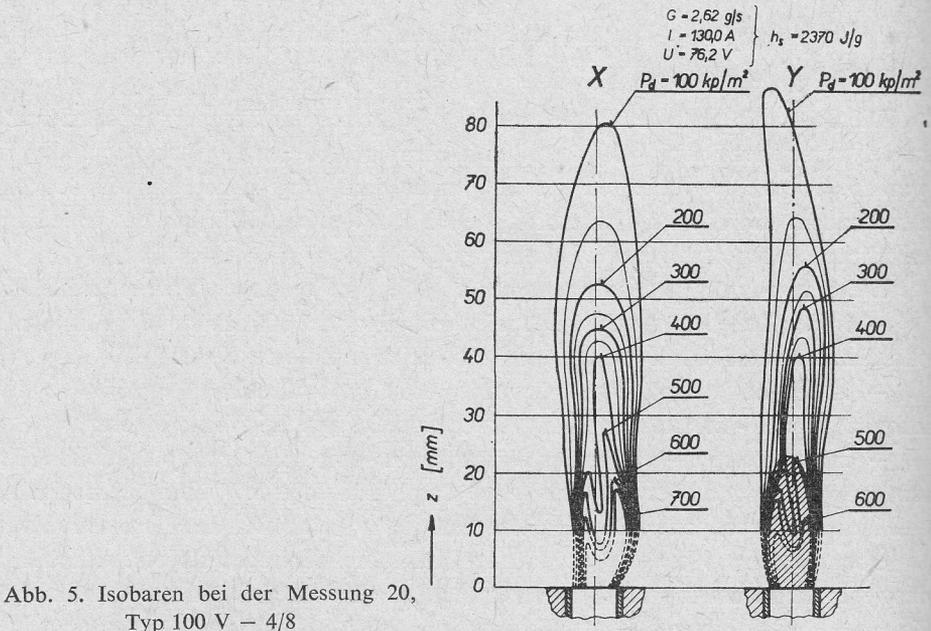


Abb. 5. Isobaren bei der Messung 20,  
Typ 100 V – 4/8

- in der Nähe der Zone B, Messungen 12 und 16, sind die Profile unsymmetrisch;
- in der Zone C, Messungen 7 und 20 (siehe auch Abb. 5) sind die Profile „sattelförmig“;
- in der Zone E, Messung 2, ist das Pitotdruckprofil wieder unsymmetrisch und weist eine parabelähnliche Form auf;
- die unsymmetrische Form des ganzen Plasmastrahlstromfeldes, sowie der sattelförmige Verlauf des Pitotdruckes bei der Messung 20 sind aus Abb. 5 ersichtlich;

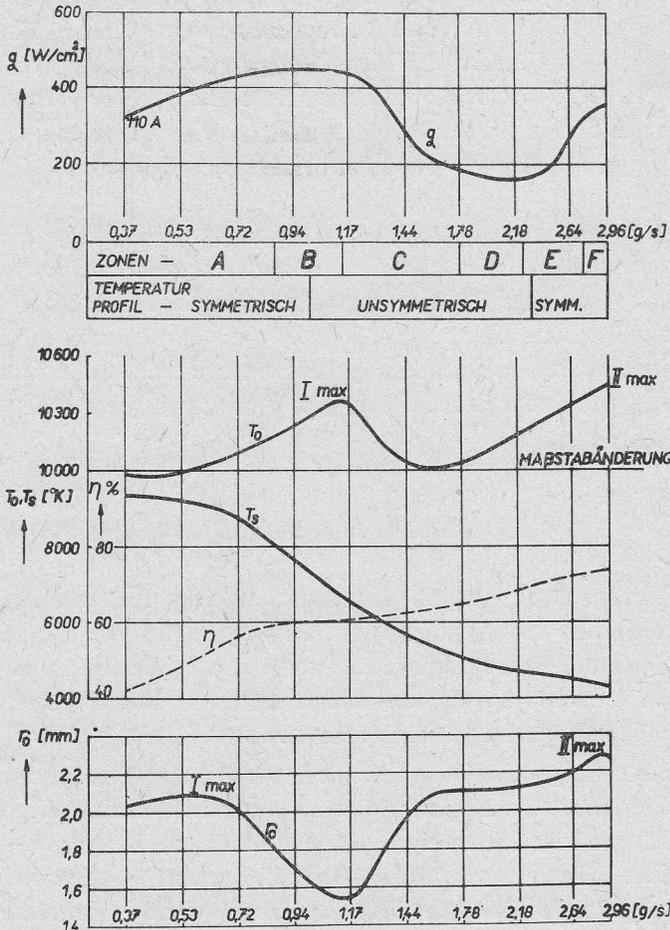


Abb. 6. Meßserie 110 A, Typ 100 V - 4/8

$q$  - Wärmestrom,  $T_0$  - höchste gemessene Temperatur,  $T_s$  - mittlere Temperatur,  $\eta$  - Wirkungsgrad,  $r_0$  - Halbhilfsmesser, der das Profil der Strahlungsintensität angibt

– der Stabilisierungswirbel kommt im Plasmastrahl markanter beim kurzen Bogen (sattelförmiger Verlauf) zum Ausdruck, während bei den übrigen Varianten mit einer längeren Bogenkammer der Wirbel mehr gedämpft ist und der sattelförmige Verlauf bisher noch nicht gemessen wurde;

– beim mittellangen Brenner entspricht die Länge des Strahlkernes (Entfernung von der Düse, bevor der Druck zu sinken beginnt) bei den meisten Messungen etwa dem 2,5 bis 2,7-fachen Düsendurchmesser. Nur bei Messungen, bei denen die berechnete mittlere Enthalpie des Plasmas kleiner als 2500 Joule/g ist, verkürzt sich die Länge des Strahlkernes. Abb. 2 stellt die Kurve (2500 J/g) durch die gestrichelte Linie dar, die in der Zone *B* liegt. In den Zonen *C*, *D* zeigt sich eine Längenverkürzung, die ungefähr bis an den Wert eines Düsendurchmessers heranreicht.

Bei anderen Versuchen wurden gleichzeitig die Wärmeströme in der Stauzone [10] und die Temperaturen [3] des Plasmastrahls gemessen. Die Ergebnisse für den kurzen Plasmabrenner bei 110 A stellt Abb. 6 dar. Für die früher erwähnten Zonen wurden die maximalen Temperaturen  $T_0$  und die mittleren Temperaturen  $T_s$  angegeben, und die Form der Temperaturverteilung wird näher charakterisiert. Der größte Wärmestrom (Zone *B*) entspricht dem ersten Maximum der Temperatur  $T_0$  (als  $I_{\max}$  bezeichnet), dem Minimum des Radius des glühenden Kernes  $r_0$  und der beginnenden Unsymmetrie des Temperaturprofils.

Die Analyse der zeitlichen Abhängigkeit der Spannungsdifferenz auf den Elektroden zeigte einen besonders charakteristischen Verlauf in der Zone *D* (siehe Abb. 4). Man kann annehmen, daß eine sehr enge Bindung der Schwankungen der elektrischen Spannungen mit den Schwankungen des elektrischen Stromes und der Plasmastrahlgeschwindigkeit und – temperatur existiert, was stark ihre hydrodynamischen Charakteristiken beeinflussen und einer der Hauptgründe der Herabsetzung des Wärmestroms sein kann.

## 5. Schlußfolgerungen

Vorliegende Arbeit beschreibt die Konstruktion eines Platten-Plasmabrenners mit einer Wirbelstabilisierung des langen Bogens. Es werden die Voltampercharakteristiken bei drei Bogenlängen und einer Ausgangsdüse von 8 mm bei Strömen von 40 - 180 A und Argondurchflüssen von 0,37 - 3,0 g/s beschrieben. Der kurze Bogen arbeitet in der sinkenden, die beiden übrigen Bögen in der steigenden Charakteristiken.

Systematische Messungen des Wärmestroms in der Stauzone ermöglichten eine Abgrenzung der Arbeitsbereiche in die Zonen *A* – *G* mit unterschiedlichen Wärmestromverläufen und unterschiedlichen übrigen Stromeigenschaften (des Geschwindigkeits – und Temperaturprofils). Ähnliche Erkenntnisse wurden – soweit bekannt – noch nie publiziert, und es wird vorläufig angenommen, daß der Wärmestrom mit der Stromerhöhung und mit der Erhöhung des Gasdurchflusses ansteigt und dann nur monoton sinkt.

Die vollzogenen Studien ermöglichten, den Einfluß der Länge der Entladungskammer auf die Eigenschaften und die Struktur des Plasmastrahls zu beurteilen. Es ist anzunehmen, daß die veröffentlichten vorläufigen Ergebnisse zur Klärung des Mechanismus der Vorgänge innerhalb der Entladungskammer sowie im Freiplasmastrahl beitragen könnten. Ähnlich könnten diese Erkenntnisse auch bei der Beurteilung der Wirkung, bei der Intensifikation und Optimalisierung der chemisch-technologischen Industrie-Plasmabrenner nützlich sein.

## Literaturverzeichnis

- [1] G. Miczek, J. Chmel, J. Kučera, *Výbojová komora plazmatronu*. Patentanmeldung PV 6465/71.
- [2] J. Kučera, *Vývoj laboratorních plazmatronů ÚT a provozní charakteristiky typu 100 VV s argonem*. Bericht ÚT – ČSAV Praha Z-338/71.
- [3] J. Kučera, *Vliv geometrie výbojové komory na vlastnosti plazmatronu 100 V*. Bericht ÚT – ČSAV Praha. In Vorbereitung.
- [4] L. Krejčí, V. Dolínek, *Experimentální studie přestupu tepla v proudu vysoce ohřátého argonu*. Bericht ÚT – ČSAV Praha Z-342/71.
- [5] J. Šlechta, *Měření teplot v jádře proudu vysokoteplotního argonu*. Bericht ÚT – ČSAV Praha Z-343/72.
- [6] J. Šlechta, *Parciální radiometr*. Bericht ÚT – ČSAV Praha. In Vorbereitung.
- [7] J. Šlechta, *Temperature Measurement in an Argon Jet*. Prace IMP, Nr. 62 - 63, 1973.
- [8] J. Dundr, *Měření nízkoteplotního argonového plazmatu pneumometrickými sondami*. Bericht ÚT – ČSAV Praha Z-339/72.
- [9] J. Dundr, *Aerodynamische Struktur des freien Argonplasmastrahles*. Prace IMP, Nr. 62 - 63, 1973.
- [10] L. Krejčí, *Vliv délky výbojové komory obloukového generátoru na přestup tepla v proudu vysoce ohřátého argonu*. Bericht ÚT – ČSAV Praha, in Vorbereitung.
- [11] J. Kučera, und Kollektiv, *Sdílení tepla při vysokých teplotách*. Bericht ÚT – ČSAV Praha Z-346/71.

## Badanie własności palnika plazmowego

## Streszczenie

W Instytucji Termomechaniki został zaprojektowany palnik plazmowy 100 V, przeznaczony do sprawdzania metod pomiaru lokalnych temperatur, prędkości i strumieni ciepła w przepływie gazu o wysokiej temperaturze. Jest to palnik typu płytkowego, z możliwością wprowadzania zmian geometrii komory wylotowej, wytwarzający długi łuk stabilizowany zawirowaniem. Przebadano trzy modyfikacje: z małą, średnią i dużą długością płomienia przy prądzie 40 - 180 A i przepływie argonu 0,37 ÷ 3,0 g/s. Średnie temperatury gazu zmierzone na wylocie palnika wynosiły do 10 500°K, a prędkości do 850 m/s.

Dla różnych warunków pracy palnika stwierdzono różne jakościowo rozkłady strumieni ciepła i innych parametrów fizycznych (dla palnika z małą długością łuku). Przedstawione wstępne wyniki mogą być pomocne przy badaniu złożonych procesów w komorze wylotowej i strumieniu gazu, jak również przy dążeniu do podwyższenia parametrów i optymalizacji palników plazmowych budowanych do celów technologicznych.

## Investigation of Plasma-Burner Properties

## Summary

A plasma-burner 100 V has been developed by the Institute of Thermomechanics. This is intended to verify the measuring methods of local temperatures, velocities and thermal flux in the stream of a high temperature gas. The plasma-burner is a plate type one, capable of being modified in the geometry of the discharge chamber and generating a long, vortex stabilized arc. Three different modifications have been investigated, viz.: with a short, middle-length and long arc at 40 - 180 A and a flow of argon 0.37 - 3.0 g/s. The average temperatures of the gas, measured at the jet outlet, have been found to be up to 10,500°K, the velocities were up to 850 m/s.

For different working conditions of the plasma-burner qualitatively various courses of the thermal flux and other physical parameters have been ascertained by systematic measurements (for a short arc plasma-burner). These preliminary results can be useful when investigating complicated occurrences in the discharge chamber and plasma stream as well as when intensifying and optimizing plasma-burners intended for technological purposes.

## Исследование свойств плазмотрона

### Резюме

В Институте термомеханики был разработан плазмотрон 100 в для сличения методов измерений локальных температур, скоростей и тепловых потоков в высоконагретом газе. Плазмотрон пластинчатого типа, позволяющий легко изменить геометрию разрядной камеры, характеризуется вихревой стабилизацией дуги. Исследовались 3 варианта: с короткой, средне-длинной и длинной дугами при 40 - 180 а и расходе аргона 0,37 - 3,0 г/сек. Средние значения температуры на выходе из сопла достигали 10 500°K, а скорости — 850 м/сек.

При систематических измерениях тепловых потоков в различных рабочих режимах были выявлены, особенно в короткой дуге, количественно отличающиеся распределения тепловых потоков в зависимости от расхода газа и электрического тока, а также изменения дугных физических свойств течения. Эти предварительные результаты могут оказать помощь при объяснении сложных явлений в разрядной камере и в потоке плазмы, а кроме того, при интенсификации и оптимизации технологических плазмотронов.