

## URČENIE VÝKONU A SPOTREBY PLYNU INDUKČNEJ PLAZMY NA ZÁKLADE MERANIA AXIÁLNEJ ZLOŽKY MAGNETICKÉHO POJA

MIRON MEDVID\*, Košice

Výkon a spotreba plynu sú určené pre indukčnú plazmu, ktorá vzniká v argónovom prostredí za tangenciálneho prívodu plynu a atmosférického tlaku. Radiálne rozdelenie axiálnej zložky magnetického poľa sa meralo vysokofrekvenčnou magnetickou sondou, teplota spektrograficky a plocha povrchu výboja bola určená na základe merania geometrických rozmerov plazmy.

### 1. ÚVOD

V súčasnosti sa na výpočet výkonu indukčnej plazmy pri frekvencii zdroja, ktorá vyhovuje podmienke quasistacionárneho prúdu, používajú rozličné teoretické modely. V práci [1] je rozpracovaná teória indukčného výboja na základe analógie s procesom horenia pre model nekonečného solenoidu, keď magnetické pole po celej jeho dĺžke je homogénne

$$H_z = \frac{4\pi}{c} I_n,$$

t. j. hodnoty magnetického poľa sa určujú meraním elektrického prúdu v induktore. V skutočnosti magnetické pole nie je homogénne, ale sa podstatne mení v priestore induktora a záleží od jeho geometrických rozmerov [2]

$$\beta = l/d,$$

kde  $l$  a  $d$  predstavujú dĺžku a priemer induktora.

V tejto práci sme výkon a spotrebu plynu určili na základe merania axiálnej zložky magnetického poľa pre  $\beta = 1,4$ . Indukčný výboj vznikol za neustáleho prúdenia chladného plynu v argónovom prostredí za atmosférického tlaku pri nízkom výkone a frekvencii zdroja.

\* Výskum plechov a laboratória VSŽ, KOŠICE, vstupný areál.

## II. TEÓRIA EXPERIMENTU

Indukčná plazma alebo tzv. H-výboj vzniká v dôsledku elektrickej ionizácie plynu, ktorý je ohriaty vo vysokofrekvenčnom elektromagnetickom poli. Prívod energie do výboja sa uskutočňuje tak, že vysokofrekvenčné prúdy prenikajú do vodivého prostredia v dôsledku difúzie, potom elektromagnetickej výživy, ktorý postupuje od induktora na jednotku povrchu výboja  $S_0$ , určíme zo vzťahu [3]

$$S_0 = \frac{cH_z^2}{16\pi} \left( \frac{\omega}{2\pi\sigma_k} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

kde

$$\sigma_k = \sigma(T_k),$$

$H_z$  — intenzita axiálnej zložky magnetického pola,  $\sigma$  — elektrická vodivosť plazmy,  $\omega$  — frekvencia zdroja,  $T_k$  — konečná teplota plazmy.

Vzhľadom na to, že účinnok indukčných prúdov sa prejavuje len v obmedzenej vrstve prstencovitého tvaru a šírenie energie z výbojovej vrstvy sa uskutočňuje tepelnou vodivosťou elektrónov, stacionárny stav sa ustáli, keď uňšané teplo smerom k osi plazmového stĺpca bude kompenzované tepelným tokom smerujúcim do okrajových vrstiev výboja. Takýto stav môže vzniknúť len vtedy, keď narastajúca rýchlosť plynu kolmo na vonkajší povrch výbojovej vrstvy dosiahne určité hodnoty [1]

$$u = \frac{cH_z^2}{16\pi g_0 W_k} \left( \frac{\omega}{2\pi\sigma_k} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

kde  $W_k = W(T_k)$ ,  $u$  — rýchlosť šírenia výboja,  $g_0$  — hustota chladeného plynu,  $W$  — špecifická entalpia.

V prípade, keď zanedbávame rozdielne podmienky, pri ktorých sa nachádzajú rozličné úseky povrchu výboja, potom výkon indukčnej plazmy  $P_0$  a množstvo plynu ohriateho na vysokú teplotu  $G_0$  určíme zo vzťahov

$$P_0 = F_0 S_0 = \frac{cH_z^2 r_0^2 l_0}{8} \left( \frac{\omega}{2\pi\sigma_k} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

$$G_0 = F_0 U = \frac{cH_z^2 r_0^2 l_0}{8g_0 W_k} \left( \frac{\omega}{2\pi\sigma_k} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

kde  $F_0 = 2\pi r_0 l_0$ .

Veľičiny  $r_0$  a  $l_0$  predstavujú polomer a dĺžku plazmového stĺpca.

## III. OPIS EXPERIMENTÁLNEHO ZARIADENIA A METODIKA MERANIA

Indukčnú plazmu sme získali vo vnútornom priestore kremennej trubice s priemerom 38 mm v argónovom prostredí za atmosferického tlaku. Na kremennú trubicu sme nasadili šesťzávitový induktor priemeru 50 mm a dĺžky 68 mm, ktorý sme pripojili na vysokofrekvenčný generátor GY-6a. Vysokofrekvenčný zdroj umožňoval reguláciu výstupného výkonu anódovým napätím a pomery vybudovania sme mohli regulovať oscilačnou cievkou. Základné údaje vysokofrekvenčného generátora sú: pracovný kmitočet 3,5 MHz, vysokofrekvenčný výkon 4 kW a maximálny príkon 10 kVA.

Vzhľadom na to, že vznik indukčnej plazmy v otvorenej trubici za atmosferického tlaku nie je možný, bolo nevyhnutné pristiúpit k nepriamemu spôsobu zapalovania výboja. Zapalovanie sa robilo vo výbojovej trubici dvomi grafitovými elektrodami, ktoré sme pripojili na zdroj striedavého prúdu 80 A pri frekvencii 50 Hz. Medzi elektrodami vznikla „pomocná plazma“, ktorá sa po odstránení elektród zachytila vysokofrekvenčným polom induktora.

Meranie radiálneho rozdelenia magnetického pola, teploty a geometrických rozmerov plazmy sa robilo pri nasledovnom rozmiestnení prístrojov (obr. 1). Presnosť merania magnetického pola vysokofrekvenčnou magnetickou sondou je závislá od geometrických rozmerov, preto sa sonda musí vyhotoviť v minimálnych rozmeroch. Metóдика merania magnetického pola a konštrukcia sondy je podrobne opísaná v [4, 5].

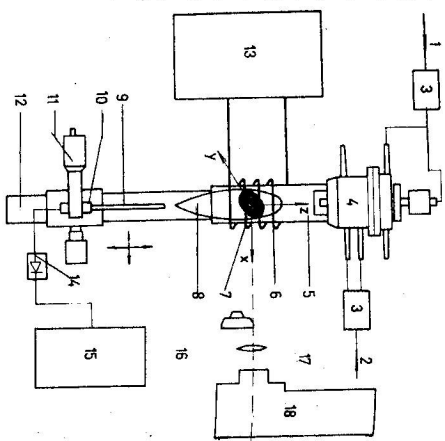
Registračným prvkom sondy je desaťzávitová cievka vyhotovená z medeneho vodiča o priemere 0,1 mm. Závitový cievky sme navinuli na izoláciu tyč o priemere 1 mm a dĺžke 3 mm. Ochrannu od vysokofrekvenčného elektrického pola sme zabezpečili uložением cievky do medenej trubičky s vonkajším priemerom 3,25 mm. Meraný signál z cievky sme viedli koaxiálnym vodičom cez usmerňovač a RC integračtor na oscilograf. Hodnoty magnetického pola sa určovali meraním napätia  $V_0$  na vstupe oscilografu [4]

$$H_z = \frac{RC}{n_c A_c} V_0,$$

kde  $A_c$  a  $n_c$  je efektívna plocha a počet závitov registračnej cievky. Pohyb sondy pozdĺž polomeru výbojovej trubice sa zabezpečoval mikrometrickým posunom. Teplota povrchu medenej trubičky dosahovala  $\sim 120^\circ\text{C}$ .

Teplota plazmy sa určovala metódou spektrogafiky vo viditeľnej oblasti spektra podľa relatívnej intenzity spektrálnych čiar argónu. Plazmu sme projektovali na štrbinu spektrografu kondenzorom s ohniskovou vzdialenosťou 140 mm pri šírke štrbiny 0,03 mm a expozícii 1 min. Pri uvedenom spôsobe snímania spektra (obr. 1) intenzita žiarenia rozličných úsekov plazmy je rozložena

Obr. 1. Schematické znázornenie rozmiestnenia prístrojov: 1 — privod plynu pozdĺž osi výbojovej trubice, 2 — tangenciálny privod plynu, 3 — prietokomer, 4 — miedená hlavica, 5 — kremenná trubica, 6 — induktor, 7 — obraz plazmy, pozorovaný cez spektrograf, 8 — indukčná plazma, 9 — magnetická sonda, 10 — pohyblivý držiak, 11 — mikrometer, 12 — optická vodiaca tyč, 13 — vysokofrekvenčný generátor GV-6a, 14 — usmerňovač, 15 — oscilograf N 102, 16 — fotografický prístroj, 17 — kondenzor, 18 — spektrograf FD-S.



podľa výšky štrbiny spektrografa. Výpočet radiálneho rozdelenia intenzity sa robí úseľnou metódou [6, 7] a teplotu plazmy sme určili z rovnice [8]

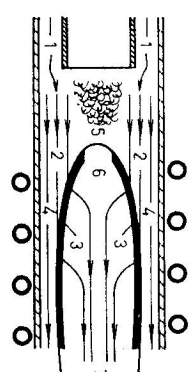
$$T = \frac{5040(E_1 - E_2)}{\lg \frac{g_1 A_1 \lambda_2}{g_2 A_2 \lambda_1} - \lg \frac{I_1}{I_2}}$$

kde  $A$  — pravdepodobnosť prechodu,  $E$  — energia vrchnej hladiny,  $g$  — štatistická váha,  $\lambda$  — vlnová dĺžka,  $I$  — intenzita žiarenia plazmy. Index 1 a 2 sa vzťahuje na dve analyzované spektrálne čiary Ar I 4200,7 Å a Ar I 4259,4 Å. Základné údaje pre vybrané čiary sme prevzali z [9]. Teplotu ohriateho plynu sme určili podľa tavenia wolfrámového vodiča o priemere 0,5 mm. Predpokladalo sa, že v bode, kde začína tavenie vodiča, teplota plynu zodpovedá  $3340 \pm 15$  °C [10].

Meranie geometrických rozmerov plazmy sme robili fotografovaním výboja cez tnavý filter, rovnoobežne a kolmo na os induktora. Frekvenciu generátora sme určovali absorpčným vlnomerom a spotrebou plynu prietokomerom.

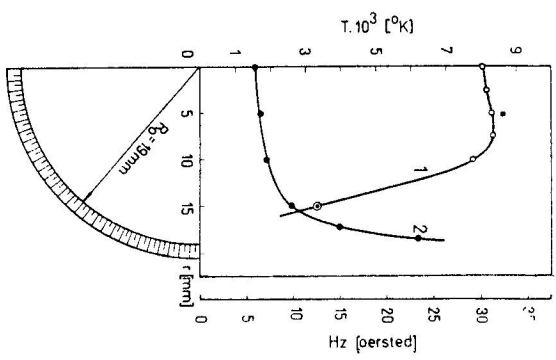
#### IV. VÝSLEDKY MERANIA

Meranie radiálneho rozdelenia magnetického poľa a teploty sme robili v ploche maximálneho polomeru plazmy za nasledujúcich podmienok prúdenia chladného a horúceho plynu (obr. 2). Z grafu, ktorý je znázornený na obr. 3, vyplýva, že magnetické pole v priestore induktora nie je homogénne;



Obr. 2. Schematické znázornenie prúdenia chladného a horúceho plynu do výbojovej trubice. 1, 2 — pohyb chladného plynu, 3 — výbojová vrstva, 4 — prúdenie plynu mimo plazmy, 5 — vírivý pohyb plynu, 6 — oblasť horúceho plynu, 7 — vysokoteplotný plameň.

Obr. 3. Radiálne rozdelenie axiálnej zložky magnetického poľa (2) a teploty plazmy (1).

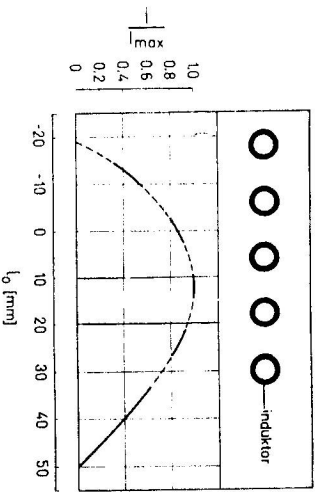


ale v radiálnom smere sa mení. Najpodstatnejšie vytláčanie magnetického poľa možno pozorovať v centrálnej oblasti výboja, kde vodivosť plazmy je maximálna, preto axiálna zložka v tejto oblasti sa mení nepatrne. Prudké zvýšenie intenzity magnetického poľa nastáva v okrajových oblastiach plazmového stĺpca a v blízkosti steny výbojovej trubice, kde vodivosť plazmy je podstatne nižšia. Z priebehu krivky radiálneho rozdelenia teploty (obr. 3) vidieť, že teplota v centrálnej oblasti plazmy sa mierne zvyšuje až do vzdialenosti  $\sim 7$  mm, potom prudko klesá smerom k stene výbojovej trubice.

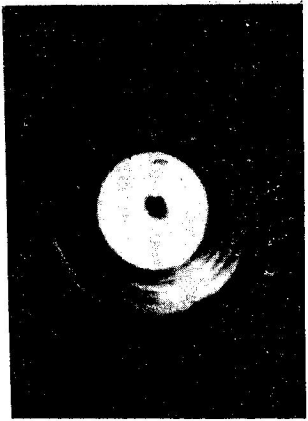
Z experimentálnej krivky relatívneho rozdelenia intenzity žiarenia výboja pozdĺž osi plazmového stĺpca (obr. 4) vidieť, že za tangenciálneho prúdenia plynu pri prietoku 9 l/min plazma je vytlačovaná z priestoru induktora a maximálna intenzita je rozložená v priestore druheho závitú. Je zaujímavé poznamenať, že pri spoločnom tangenciálnom a axiálnom prúdení možno dosiahnuť taký tvar výboja, aký má statická plazma pri nízkych tlakoch (obr. 5).

Výkon a spotrebu plynu indukčnej plazmy vypočítame z rovnice (3) a (4). Hodnotu magnetického poľa sme určili z experimentálnej krivky vo vzdialenosti 17 mm od osi plazmového stĺpca, t. j. vo vzdialenosti zodpovedajúcej maximálnemu polomeru plazmy. Elektrickú vodivosť ionizovaného plynu sme určili pri  $\sigma_k = 5,0 \times 10^{12} \text{ sec}^{-1}$  a špecifickú entalpiu  $W_k = 4,23 \text{ kJ g}^{-1}$  sme určili pri

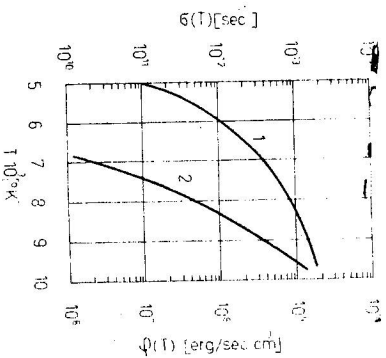
teploty  $T_e = 8,0 \times 10^3$  °K. Hustota chladného plynu je  $1,73 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$ , výkon žiarenia plazmy na jednotku objemu argónu pri teplote  $7,0 \times 10^3$  °K zodpovedá hodnote  $2,0 \times 10^6 \text{ erg sec}^{-1} \text{ cm}^{-3}$ . Experimentálne výsledky a výpočty sú uvedené v tab. 1, závislosti  $\sigma(T)$  a  $q(T)$  sú znázornené na obr. 6 a prevzali sme ich z [11]. V prípade, keď pri výpočtoch počítame s maximálnym polomerom plazmy  $r_0 \text{ max} = 16,96 \text{ mm}$ , hodnota výkonu je  $0,920 \text{ kW}$ , t. j. výsledok je zvýšený v dôsledku zväčšenia plochy povrchu plazmy.



Obr. 4. Relatívne rozdelenie intenzity žiarenia výboja pozdĺž osi plazmového stĺpca.



Obr. 5. Tvar indukčnej plazmy pri tan-genciálnom prúde  $G = 91/\text{min}$  a axiálnom prívode plynu cez grafiovú tyč  $G = 31/\text{min}$ .



Obr. 6. Teoretické údaje pre argónovú plazmu. 1 — závislosť elektrickej vodivosti od teploty, 2 — závislosť výkonu žiarenia plazmy na jednotku objemu argónu od teploty.

Tabuľka 1

$\omega = 3,6 \text{ MHz}; R_0 = 19 \text{ m}$								
	Hz [Oerstedi]	$T_e \times 10^3$ [°K]	$r_0$ [mm]	$l_0$ [mm]	$q_0 \times 10^{-3}$ kW/cm <sup>2</sup>	$U$ cm/sec	$P_0 \times 10^{-3}$ [kW]	$G_0$ l/min
Exp.	17,5	8,0	12,30	68,10	—	—	—	9,0
Teor.	—	—	—	—	12,7	1,74	668	5,5

Vzhľadom na to, že merania, sme robili pri výkone generátora  $\sim 2 \text{ kW}$ , z experimentálnych výsledkov potom vyplýva, že len  $\sim 35\%$  celkového výkonu odoberá plazma a približne  $20\%$  sa stráca v dôsledku optického žiarenia plazmy. Zvyšok výkonu spotrebuje induktor, alebo sa odvádza plynom na steny výbojovej trubice. Tieto údaje sa dobre zhodujú s experimentálnymi hodnotami, ktoré sú uvedené v [8, 12—14]. Rozdiel medzi teoretickou a experimentálnou hodnotou v spotrebe plynu výbojom spôsobuje to, že určité množstvo plynu sa vôbec do plazmy nedostáva, ale prúdi pozdĺž steny výbojovej trubice a zabezpečuje jej chladenie.

#### V. CHYBY MERANIA A ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV

Chyby merania radiálneho rozdelenia magnetického pola vznikajú tým, že priemer sondy je pravnateľný s charakteristickou dĺžkou, na ktorej nastáva podstatný spád magnetického pola. Z týchto dôvodov hodnota axiálnej zložky magnetického pola je určená s presnosťou  $\sim 20\%$ . Relatívna chyba pri meraní teploty plazmy je závislá od presnosti merania intenzity vybraných spektrálnych čiar, a je tým menšia, čím je väčší rozdiel medzi energiou vybudenia vrchných hladín. Presnosť určenia teploty plazmy pre uvedené spektrálne čiary neprevyšuje  $10\%$ . Keďže merania geometrických rozmerov plazmy sa robili fotografovaním výboja a snímky sme vyhodnotili mikrofotometriky, presnosť určenia polomeru a dĺžky plazmového stĺpca je  $\sim 2\%$ .

Hodnoty výkonu a spotreby plynu možno upresniť, keď budú urobené merania magnetického pola v rozličných bodoch povrchu výboja. Vzhľadom na to, že pri výpočtoch sme použili zjednodušený model plazmy, bude užitočné výkon výboja porovnať s experimentálnymi hodnotami. V tomto prípade je potrebné využiť experimentálne údaje o skutočnom tvare výboja a vypočítať rotačnú plochu plazmy.

## VI. ZÁVER

Výkon a spotřebu plynu indukčnej plazmy sme vypočítali na základe experimentálnych hodnôt axiálnej zložky magnetického poľa, teploty a geometrických rozmerov plazmy. Z experimentálnych výsledkov vyplýva, že magnetické pole nie je rovnomerne rozdelené v priestore induktora, ale v radiálnom smere sa podstatne mení. Približné výpočty ukazujú, že len ~ 35 % celkového výkonu sa spotrebuje plazmou a zvyšok energie sa stráca žiarením, úboja a odvádzá na stenu vŕbojovej trubice. Z porovnania experimentálnej a teoretickej hodnoty spotreby plynu vyplýva, že len určité množstvo plynu sa spotrebuje vŕbojom a zvyšok prúdi v blízkosti steny vŕbojovej trubice. Táto vrstva neionizovaného plynu odtláča plazmu od steny trubice a zabezpečuje jej intenzívne chladenie.

Záverom chceme vysloviť poďakovanie prof. Dr. Š. Veisovi za užitočné pripomienky k uvedenej problematike a doc. Ing. J. Pavlíkovi, CSC, za veseľstrannú pomoc pri experimentálnych prácach.

## LITERATÚRA

- [1] Рапаев Ю. П., ПМТФ (1968), № 3, 7.
- [2] Трехов Е. С., Фоменко А. Ф., Хошев Ю. М., Теплофизика высоких температур 7 (1969), 860.
- [3] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Электродинамика сплошной сред. Гостехиздат, Москва 1957.
- [4] Гольдберг Р. Н., Сб. Диалектика плазмы. Изд. Мир, Москва 1962.
- [5] Русанов В. Д., Современные методы исследования плазмы. Госатомиздат, Москва 1962.
- [6] Воккастен К., J. Opt. Soc. Am. 51 (1961), 943.
- [7] Gross В., Methoden physikalischer therm. SNTL, Praha, 1962.
- [8] Крутинский М. М., Никулин А. А., Молдавер В. А., Применение плазменного нагрета. Изд. Энергия, Москва—Ленинград 1964.
- [9] Дравин Н., Z. Phys. 146 (1956), 294.
- [10] Крутинский М. М., Никулин А. А., ПИТТД, Москва 1949.
- [11] Сошкинов В. Н., Трехов Е. С., Хошев Ю. М., Сб. Физика газоразрядной плазмы. Атомиздат, Москва 1968.
- [12] Мариновский С. В., Сб. Исследования при высоких температурах. Изд. Наука Москва 1967.
- [13] Сметянский М. С., Рогонов С. В., Никушин М. Я., Докл. Моск. энерг. инст.-тута. МЭИ, Москва 1967.
- [14] Кипеллиса и термодинамика химических реакций в низкотемпературной плазме. Изд. Наука, Москва 1965.

Došlo 16. 5. 1970

## DETERMINATION OF POWER AND GAS CONSUMPTION OF INDUCTANCE PLASMA ON THE BASE OF MEASUREMENT OF MAGNETIC FIELD AXIAL COMPONENT

Miron Medvid

Summary

The power and the gas consumption are determined for the inductance plasma arising in the argon atmosphere in the course of tangential gas supply and under atmospheric pressure. The radial distribution of the magnetic field axial component was measured by a high-frequency magnetic probe, the temperature was measured spectrographically and the discharge surface area was determined on the basis of the plasma geometric size measurement.