

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

76

WARSZAWA-POZNAŃ 1978

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

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

KOMITET REDAKCYJNY — EXECUTIVE EDITORS
KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ . ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

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

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1978
Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 340+90 egz.	Oddano do składania 27 lutego 1978 r.
Ark. wyd. 12,25. Ark. druk. 9,375	Podpisano do druku 24 października 1978 r.
Papier druk. sat. kl. V, 70 g, 70×100 cm.	Druk ukończono w październiku 1978 r.
Nr zam. 319/98. J-14/662.	Cena zł 40,-

DRUKARNIA UNIWERSYTETU IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU

MIECZYSLAW LUBAŃSKI, JANA ŠAFRANKOVA

Gdańsk, Praha

Radialny rozkład koncentracji elektronów fali jonizacji w plazmie wyładowania elektrycznego w polu magnetycznym*

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych radialnego rozkładu koncentracji elektronów fali jonizacji w plazmie w polu magnetycznym.

1. Wprowadzenie

Teoretycznym i eksperymentalnym badaniom fal jonizacji w plazmie wyładowania elektrycznego w gazach szlachetnych poświęcono wiele uwagi.

Natura tych fal i ich właściwości pod nieobecność stałego pola magnetycznego w plazmie opisane zostały w pracach przeglądowych [1, 2].

Opublikowano jednocześnie wyniki prac (np. [1, 3, 4, 6 i 7]) poświęconych badaniom fal jonizacji w plazmie w polu magnetycznym. Własności fal jonizacji w plazmie w polu magnetycznym silnie zależą od warunków dyfuzji cząstek w kierunku ścianek rury do wyładowań. Warunki dyfuzji zależą w istotny sposób od pola magnetycznego. W szczególności, w plazmie w polu magnetycznym skierowanym wzdłuż osi rury do wyładowań, może wystąpić niestabilność makroskopowa nazywana niestabilnością Kadomtseva-Nedospasova [5]. Niestabilność ta powoduje wzrost współczynnika dyfuzji (dyfuzja anomalna) wpływając tym samym na zachowanie się propagującej w rurze do wyładowań fali jonizacji. Niestabilność makroskopowa pojawia się w plazmie przy indukcji magnetycznej większej od tzw. indukcji krytycznej $B > B_c$ [5].

Murlak, Zakrzewski, Nemeček [6] przedstawili wyniki badań eksperymentalnych stałej propagacji fali jonizacji w plazmie w podłużnym polu magnetycznym w szerokim zakresie indukcji B , również w warunkach, gdy $B > B_c$. Wyniki tego eksperymentu wykazały, że względne zmiany częstotliwości oraz długości fali jonizacji w funkcji natężenia pola magnetycznego, odpowiadają względnym zmianom natężenia podłużnego pola elektrycznego E_z w plazmie, które jest miarą dyfuzji cząstek do ścianek rury do wyładowań. Wykazano, więc, że stała propagacji fali jonizacji w jednoznaczny sposób zależy od warunków dyfuzji w plazmie.

* Praca wykonana w ramach problemu międzyresortowego MR. I. 23 (Mechanika ciała stałego, cieczy i gazów).

sygnałów otrzymywanych z tej sondy przeznaczony jest woltomierz $V3$ o dużej oporności wejściowej oraz woltomierz homodynamiczny, synchronizowany sygnałem, który jednocześnie wzbudza fale jonizacji w plazmie. Sygnał wzbudzający w plazmie fale jonizacji, otrzymywany z generatora niskiej częstotliwości doprowadzony jest przez obwód separujący do specjalnej elektrody pierścieniowej EW . Obwód separujący zastosowano dla uniknięcia wpływu oscylacji plazmy na obwód synchronizacji woltomierza homodynamicznego.

Zasilanie rury do wyładowań przy użyciu dwóch zasilaczy (rys. 1) umożliwia prosty sposób polaryzacji sondy ruchomej.

W układzie pomiarowym zastosowano ponadto fotopowielacz FP wyposażony w przesuwalny wzdłuż rury do wyładowań światłowód. Dzięki temu możliwa jest obserwacja oscylacji światła w rurze w dowolnym jej przekroju.

Celem opisywanego w niniejszej pracy eksperymentu było zbadanie radialnego rozkładu koncentracji elektronów fali jonizacji rozchodzącej się w kolumnie plazmy w osiowym polu magnetycznym. W przypadku, gdy kolumna plazmy jest stabilna względem zaburzenia koncentracji o kształcie helisy ($B < B_c$) oraz gdy nie występują samowzbudne fale jonizacji, pomiar rozkładu koncentracji fali jonizacji wzbudzonej sygnałem zewnętrznym nie następuje trudności i może być wykonany konwencjonalną metodą przy użyciu sondy elektrycznej.

W przypadku, gdy występuje niestabilność makroskopowa, istnieją w plazmie jednocześnie oscylacje związane z niestabilnością makroskopową oraz ze wzbudzoną sygnałem zewnętrznym falą jonizacji. Pomiar radialnego rozkładu koncentracji rozchodzącej się w tym przypadku w plazmie fali jonizacji staje się trudniejszy.

W opisywanym tu eksperymencie do pomiaru rozkładu koncentracji wykorzystywano ruchomą sondę cylindryczną. Za miarę koncentracji elektronów przyjęto jonowy prąd sondy [8]

$$I_i = I_{i0} i_i, \quad (1)$$

gdzie I_{i0} jest dyfuzyjnym prądem jonów o temperaturze elektronów, a

$$i_i = f(\chi_p, r_p/\lambda_D, \lambda_i/r_p, T_e/T_i). \quad (2)$$

W wyrażeniu tym $\chi_p = V_p/V_e$ oznacza znormalizowany potencjał sondy, V_e – temperaturę elektronów wyrażoną w woltach, r_p – promień sondy, λ_D – promień Debye'a, λ_i – średnią drogę swobodną jonów, T_e – temperaturę elektronów, a T_i – temperaturę jonów.

Dyfuzyjny prąd sondy I_{i0} jest zależny od koncentracji cząstek naładowanych oraz od temperatury elektronów. Czynniki (2), którego postać analityczna nie jest znana, jest również funkcją koncentracji oraz temperatury elektronów. Oznacza to, że jonowy prąd sondy nie jest dokładną miarą koncentracji elektronów.

Błąd w określeniu koncentracji, na podstawie pomiarów prądu jonowego I_i sondy, jest zależny od wartości tej koncentracji oraz od temperatury elektronów. Oznacza to, że pomiary promieniowego rozkładu koncentracji elektronów oparte na wykorzystaniu prądu jonowego sondy obciążone są błędem zależnym od położenia sondy, nawet jeśli są to pomiary znormalizowanych wartości koncentracji.

Tak więc znormalizowana wartość jonowego prądu sondy może być jedynie w pierwszym przybliżeniu miarą względnej koncentracji elektronów, nawet jeśli przyjąć powszechnie uznawane założenie o stałej wartości temperatury elektronów wzdłuż promienia rury do wyładowań.

Mimo oczekiwanych niewielkich błędów w wyznaczaniu rozkładu znormalizowanej koncentracji elektronów, zastosowano do tego celu sondę elektryczną, podobnie jak to czyni większość autorów. Należy jednak mieć na uwadze fakt, że przedstawione niżej wyniki pomiarów nie mogą być traktowane jako ściśle ilościowe.

Jak wspomniano wyżej, po przekroczeniu indukcji krytycznej B_c pola magnetycznego występują w plazmie oscylacje związane z niestabilnością makroskopową kolumny. Jeżeli jednocześnie w plazmie wzbudzana jest fala jonizacji, to w obwodzie sondy elektrycznej pojawiają się składowe prądu związane z obydwojma rodzajami oscylacji. Dla umożliwienia pomiaru rozkładu poprzecznego koncentracji elektronów fali jonizacji, konieczne staje się więc wydzielenie sygnału zależnego jedynie od tej fali. W opisywanej tu pracy osiągnięto ten cel poprzez zastosowanie detekcji synchronicznej (woltomierz homodynowy).

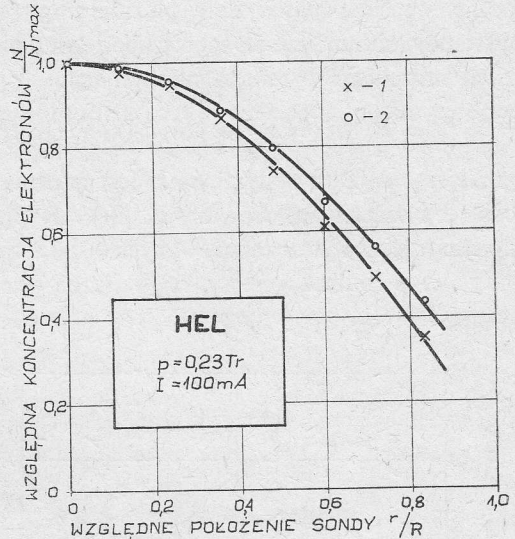
Niezależnie od pomiarów rozkładu koncentracji elektronów fali jonizacji, mierzono średnie w czasie rozkładu koncentracji elektronów, posługując się woltomierzem prądu stałego o dużej stałej czasu. Pomiaru te wykonywano dla celów porównawczych.

Przeprowadzono je w helu, przy tak wybranym ciśnieniu gazu oraz natężeniu prądu wyładowania, aby w całym wykorzystywanym zakresie indukcji magnetycznej nie występowały w plazmie samowzbudne fale jonizacji. Fala jonizacji powstawała jedynie pod wpływem zewnętrznego sygnału wzbudzającego. Częstotliwość sygnału wzbudzającego wybrano tak, aby była ona najbliższa częstotliwości, przy której wzbudzona w plazmie fala jonizacji ma największą amplitudę. Kontrolowano jednocześnie za pomocą przesuwanego fotopowielacza oraz dodatkowej sondy, czy wzbudzone w plazmie fale jonizacji nie wchodzą w zakres nieliniowy.

3. Wyniki pomiarów oraz wnioski

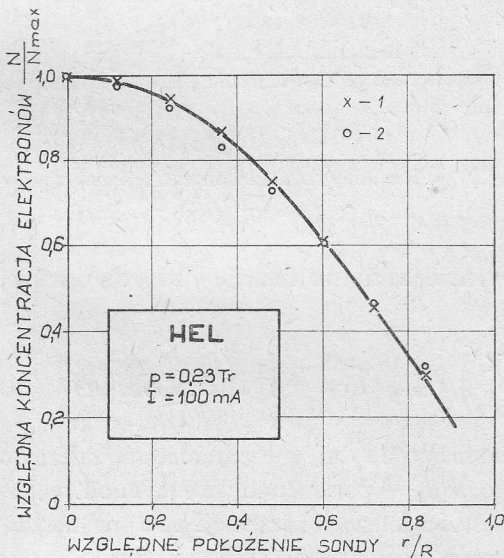
Pomiary rozkładu radialnego względnej koncentracji elektronów przeprowadzono przy ciśnieniu helu $p=0,23$ Tr oraz przy prądzie wyładowania 100 mA w szerokim zakresie indukcji pola magnetycznego. Ciśnienie oraz prąd wyładowania zostały tak wybrane, aby w plazmie nie powstawały samowzbudne fale jonizacji dla dowolnej wartości indukcji pola magnetycznego, z przedziału wartości wybranych dla przeprowadzenia eksperymentu. Ustalenie optymalnej wartości ciśnienia oraz prądu wyładowania przeprowadzono drogą kolejnych prób. W trakcie eksperymentu, jak wspomniano wyżej, mierzono rozkład koncentracji elektronów wzbudzonej zewnętrznym sygnałem fali jonizacji oraz rozkład średniej w czasie koncentracji elektronów.

Znormalizowane wartości zmierzonej koncentracji elektronów w funkcji względnego położenia sondy, dla ustalonych wartości indukcji pola magnetycznego przedstawiono na rysunkach 2 do 6. Na każdym z rysunków naniesiono wyniki pomiarów średniej w czasie wartości koncentracji elektronów $\langle N \rangle / \langle N_0 \rangle$ oraz składowej zmiennej koncentracji \tilde{N} / \tilde{N}_0 związanej wyłącznie z rozchodzącą się w plazmie falą jonizacji.

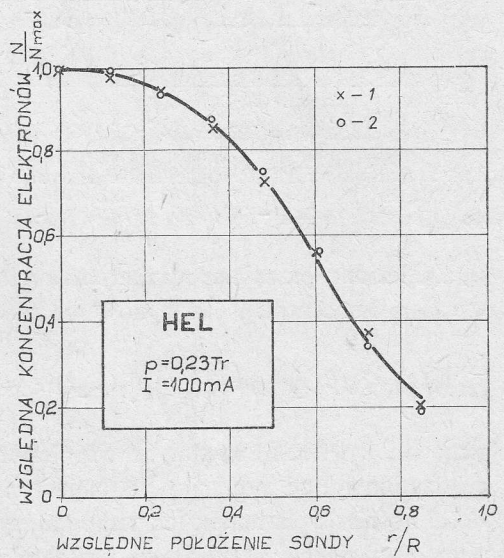


Rys. 2. Radialny rozkład koncentracji elektronów
 $B=0$, 1 - $\langle N \rangle / \langle N_0 \rangle$, 2 - \tilde{N} / \tilde{N}_0

Pomiary rozkładów średniej w czasie koncentracji elektronów w plazmie, w polu magnetycznym, w obecności niestabilności makroskopowej wykonane zostały wcześniej przez innych autorów. W szczególności Imazu, Maruyama, Sato i Nakano w pracy



Rys. 3. Radialny rozkład koncentracji elektronów
 $B=0,42$ kGs, 1 - $\langle N \rangle / \langle N_0 \rangle$, 2 - \tilde{N} / \tilde{N}_0



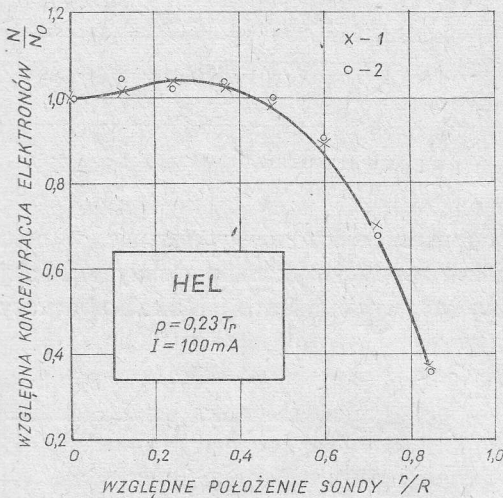
Rys. 4. Radialny rozkład koncentracji elektronów
 $B=0,63$ kGs, 1 - $\langle N \rangle / \langle N_0 \rangle$, 2 - \tilde{N} / \tilde{N}_0

[10] przedstawili wyniki takich pomiarów, prezentując jednocześnie teorię opartą na równaniach ciągłości, ruchu oraz Poissona, na podstawie której znaleźli funkcję rozkładu średniej w czasie koncentracji elektronów. W swojej teorii przyjęli oni, podobnie jak Ka-

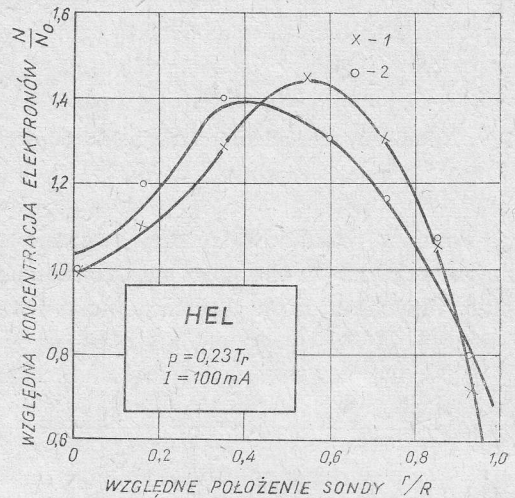
domtsev i Nedospasov, że w plazmie powyżej indukcji krytycznej B_c pola magnetycznego występuje zaburzenie koncentracji o kształcie helisy i że koncentracja cząstek naładowanych może być wyrażona następująco:

$$N_{\mp} = Re \{ N_0 h_0(r) + N_{1\mp} f(r) \exp [j(\omega t + m\theta + kz)] \}, \quad (3)$$

gdzie N_0 , $N_{1\mp}$ są stałymi, $h_0(r)$ jest znormalizowanym rozkładem średniej w czasie koncentracji cząstek naładowanych, $f(r) = J_1(\beta_1 R)$ jest funkcją rozkładu zaburzonej części koncentracji cząstek naładowanych ($\beta_1 R$ – pierwiastek funkcji Bessela J_1 , R – promień rury), ω – pulsacją helisy, m – liczbą określającą mod helisy, a k – liczbą falową.



Rys. 5. Radialny rozkład koncentracji elektronów
 $B = 0,9$ kGs, 1 - $\langle N \rangle / \langle N_0 \rangle$, 2 - \tilde{N} / \tilde{N}_0



Rys. 6. Radialny rozkład koncentracji elektronów
 $B = 1,7$ kGs, 1 - $\langle N \rangle / \langle N_0 \rangle$, 2 - \tilde{N} / \tilde{N}_0

Znalezione przez wspomnianych autorów rozwiązanie na funkcję rozkładu średniej w czasie koncentracji elektronów ma postać

$$h_0(r) = I_0(\beta_0 r) + \varphi b_1 \left(\frac{\beta_1}{\beta_0} \right)^2 F_1(\beta_0 r) + \varphi b_2 \left(\frac{\beta_1}{\beta_0} \right)^4 F_2(\beta_0 r) + \dots + \varphi b_n \left(\frac{\beta_1}{\beta_0} \right)^{2n} F_n(\beta_0 r), \quad (4)$$

gdzie b_1, b_2, \dots, b_n są stałymi współczynnikami liczbowymi, φ – parametrem zależnym między innymi od indukcji pola magnetycznego, a β_0 – parametrem zależnym od ruchliwości nośników ładunku, ich temperatury, częstości jonizacji i indukcji pola magnetycznego. Funkcje $F_n(\beta_0 r)$ są dane w postaci szeregów potęgowych argumentu $\beta_0 r$.

Wspomniani wyżej autorzy uzyskali dość dobrą zgodność wyników pomiarów z wynikami obliczeń teoretycznych rozkładu radialnego średniej w czasie koncentracji elektronów.

W niniejszej pracy mierzono zarówno rozkład radialny średniej w czasie koncentracji elektronów, jak również rozkład radialny składowej zmiennej koncentracji związanej ze wzbudzoną sygnałem zewnętrzną falą jonizacji. Pomiarzy wykazały, że oba te roz-

kłady są praktycznie identyczne w szerokim zakresie indukcji pola magnetycznego, a rozkład średniej w czasie koncentracji elektronów jest zgodny z teorią Imazu i innych [10].

Oznacza to, że rozkład radialny oscylacji koncentracji elektronów związanych z rozchodzącą się w rurze falą jonizacji o małej amplitudzie, jest w taki sam sposób zależny od pola magnetycznego oraz od zjawiska niestabilności makroskopowej w plazmie, jak rozkład średniej w czasie koncentracji elektronów. Innymi słowy, o stanie plazmy decydują pole magnetyczne oraz oscylacje makroskopowe kolumny. Oscylacje związane z propagującą w rurze falą jonizacji o niewielkiej amplitudzie nie wpływają w istotny sposób na stan makroskopowy plazmy.

Szczegółowe wyjaśnienie teoretyczne uzyskanych wyników pomiarów nie jest przedmiotem niniejszej pracy.

Autorzy bardzo dziękują Panu mgr T. Kopiczyńskiemu za cenne uwagi, a Panu inż. J. Wasilewskiemu za pomoc w przeprowadzeniu pomiarów.

Praca wpłynęła do Redakcji w marcu 1977 r.

Literatura

- [1] A. W. Cooper, N. L. Oleson, *Advances in Electronics and Electron Physics*, 155 - 278, Academic Press, 1968.
- [2] L. Pekarek, J. Krasa, *Ionization Waves in Plasmas*. Phys. Ioniz. Gases, 7th Yug. Symp., 915, 1974.
- [3] M. Sato, *Wave Nature of Moving Striations in a Longitudinal Magnetic Field*. Beitr. Plasma Phys. 9, 371, 1969.
- [4] A. J. Duncan, J. R. Forrest, *Low Frequency Waves and Instabilities of the Positive Column in a Magnetic Field*. The Physics of Fluids 14, 1973.
- [5] B. B. Kadomtsev, A. V. Nedospasov, *Instability of the Positive Column in a Magnetic Field and the Anomalous Diffusion Effect*. J. Nucl. Energy Pt. C: Plasma Phys. 1, 230, 1960.
- [6] H. Murlak, Z. Zakrzewski, Z. Nemeček, *Ionization Wave in Presence of an Axial Magnetic Field and a Macroscopic Instability in Positive Column*. 12 th Int. Conf. on Phen. in Ionized Gases, Eindhoven 1975.
- [7] Z. Zakrzewski, H. Murlak, *Studies of Small Amplitude Ionization Waves in an Axially Magnetized Helium Discharge*. Prace IMP, z. 74, 1977.
- [8] Z. Zakrzewski, T. Kopiczyński, *Effect of Collisions on Positive Ion Collection by a Cylindrical Langmuir Probe*. Plasma Phys. 16, 1195, 1974.
- [9] L. Pekarek, V. Krejčí, *The Theory of Moving Striations in a D-C Discharge Plasma*. Czech. J. Phys. B13, 881, 1963.
- [10] S. Imazu, T. Maruyama, H. Sato, Y. Nakano, *Effect of Helical Instability on the Radial Density and Potential Distribution*. Phys. of Fluids 14, 841, 1971.

Радиальное распределение концентрации электронов ионизационной волны в плазме электрического разряда в магнитном поле

Резюме

В работе представлены результаты экспериментальных исследований радиального распределения концентрации электронов, возбужденной внешним сигналом ионизационной волны в плазме электрического разряда в магнитном поле. Измерения производились также при индукции магнитного

поля большей чем критическая индукция, т.е. в диапазоне, в котором выступает макроскопическая неустойчивость плазмы. Сравнено замеренные распределения средней по времени концентрации электронов и переменные составляющие концентрации, связанные с распространением ионизационной волны в трубе.

Radial Distribution of the Ionization Wave Electron Number Density for an Electric Discharge Plasma in a Magnetic Field

Summary

Results of experimental investigations of the radial distribution of the number density of electrons for an ionization wave excited with an external signal in an electron discharge plasma located in a magnetic field have been presented in the paper. The measurements were made also for the magnetic field induction higher than the critical induction, that is in the region where a macroscopic plasma instability occurs. Measured distributions of the electron number density averaged with respect to time were compared with variable components of the number density associated with the ionization wave propagating along the discharge tube.