

Henryka Danuta STRYCZEWSKA
Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Politechnika Lubelska

TECHNOLOGIE ZIMNEJ PLAZMY. WYTWARZANIE, MODELOWANIE, ZASTOSOWANIA

Streszczenie. Praca przedstawia przegląd źródeł nietermicznej plazmy generowanej przy ciśnieniu atmosferycznym, główne obszary ich zastosowań, oraz problemy modelowania matematycznego ślizgającego się wyładowania łukowego. Podano wybrane wyniki modelowania. Omówiono zastosowania technologii zimnej plazmy w ekologii i bioinżynierii.

Słowa kluczowe: wyładowania elektryczne, plazma nietermiczna, ozon, ślizgający się łuk elektryczny, modelowanie i zastosowania plazmy

ATMOSPHERIC PRESSURE COLD PLASMAS. GENERATION, MODELING AND APPLICATIONS

Summary. Paper presents review of atmospheric pressure low temperature plasma sources, main areas of its applications and chosen problems of gliding arc discharge modeling. Chosen modeling results have been presented. Applications of cold plasma methods in ecology and bioengineering have been reviewed.

Keywords: electrical discharges, non-thermal plasma, gliding arc discharge, ozone, plasma modeling and applications

1. WPROWADZENIE

Plazma, zwana czwartym stanem skupienia materii, ze względu na odmienne od fazy stałej, ciekłej i gazowej właściwości, powstaje w temperaturach, w których średnie energie kinetyczne cząstek przekraczają wartość potencjału jonizacyjnego. Za granicę oddzielającą stan gazowy i plazmę uznaje się moment zmiany właściwości fizycznych gazów, wśród których pojawienie się przewodnictwa elektrycznego i utrata zdolności izolacyjnych zjonizowanego gazu są jednymi z najistotniejszych. Jest to stan skupienia o najszerszym paśmie energii cząstek oraz największym zróżnicowaniu stopnia jonizacji i składu chemicznego.

2. ŹRÓDŁA PLAZMY

W praktyce przemysłowej metalurgia oraz plazmowe źródła światła należą do najstarszych, ale wciąż z powodzeniem stosowanych technologii plazmowych [35].

Ostatnie dekady dwudziestego wieku to renesans metod plazmowych i nowe zastosowania dla wykorzystywanych już wyładowań elektrycznych, które zawsze były głównym źródłem plazmy dla celów technologicznych. Należą tu takie obszary zastosowań, jak: mikroelektronika, technologie wytwarzania materiałów półprzewodnikowych, nadprzewodnikowych, organicznych, bio- i nanomateriałów. Dwudziesty pierwszy wiek to era nowych materiałów i technologii ich wytwarzania, które bazują obecnie w większości na technologiach plazmowych i laserowych [38, 48, 49].

Plazma nietermiczna, generowana za pomocą wyładowań elektrycznych, jest coraz częściej stosowana w biotechnologiach jako medium umożliwiające prowadzenie procesów biochemicznych przy ciśnieniu atmosferycznym, w temperaturach otoczenia i bez szkodliwych dla środowiska odpadów [1, 18, 26, 42].

Zainteresowanie wytwarzaniem i zastosowaniami nietermicznej i nierównowagowej plazmy wynika przede wszystkim z możliwości swobodnego kontrolowania jej parametrów w szerokich granicach, w zależności od zastosowań, poprzez:

- skład chemiczny gazu roboczego, który decyduje o rodzaju i energiach aktywnych cząstek plazmy (elektronów, atomów, molekuł, jonów, rodników),
- ciśnienie – w zakresie od niemal próżni do ciśnienia atmosferycznego; wyższe prowadzi do zmniejszenia drogi swobodnej cząstek plazmy i równowagi termodynamicznej,
- strukturę pola elektromagnetycznego; zewnętrznie wzbudzone pole elektryczne i/lub magnetyczne wykorzystuje się do przyspieszania, grzania, kompresji i kierowania cząstek plazmy,
- geometrię wyładowania – brak lub obecność elektrod, obecność dielektryka, objętość przestrzeni wyładowczej – wyładowania w małej objętości oznaczają odejście od równowagi termodynamicznej,
- parametry układu zasilającego (moc, napięcie, częstotliwość, liczba faz, kształt napięcia zasilającego, impedancja wewnętrzna układu zasilania).

Na rysunku 1 przedstawiono przemiany energii i zjawiska towarzyszące generacji nietermicznej plazmy. W plazmie nietermicznej większość energii elektrycznej jest wykorzystywana na wytwarzanie wysokoenergetycznych elektronów, nie zaś na podgrzewanie gazu. A zatem, energia plazmy jest kierowana na dysocjację wywołaną zderzeniami z elektronami i jonizację gazu w celu wyprodukowania rodników, które rozkładają toksyczne cząsteczki gazu. W języku potocznym mówimy, że w plazmie nietermicznej elektrony są „gorące”, pozostałe zaś cząstki plazmy są „zimne” – mogą mieć temperaturę otoczenia i niższą. W wielu zastosowaniach technika plazmy

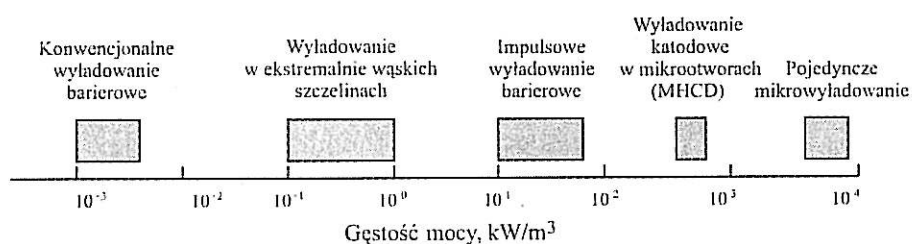
w niektórych zastosowaniach nawet 100 kV i częstotliwości od kilku herców do setek kiloherców. Długość szczeliny wyładowczej, w zależności od zastosowań, może wynosić od 0,1 mm dla wyświetlaczy plazmowych, kilka milimetrów w ozonatorach i do kilku centymetrów w laserach CO₂ [43]. Bariera dielektryczna jest w większości reaktorów DBD wykonana ze szkła, kwarcu, materiałów ceramicznych bądź polimerów.



Rys. 2. Typowe konfiguracje elektrod reaktora z wyładowaniami barierowymi
Fig. 2. Typical configurations of reactor electrodes with barrier discharges

Rozróżnia się trzy podstawowe konfiguracje elektrod w wyładowaniach barierowych, które prowadzą do: 1) wyładowań objętościowych (z ang. volume discharges, VD), 2) powierzchniowych (surface discharges, SD) oraz 3) koplarnych (z ang. co-planar discharges). Są też budowane reaktory, w których występują wszystkie z wymienionych wyżej wyładowań.

Na rysunku 3, opracowanym na podstawie [50], przedstawiono wartość gęstości objętościowej mocy w kW/m³ dla wybranych wyładowań zachodzących w obecności bariery dielektrycznej. Jak z niego wynika, największą gęstość mocy rzędu 10⁴ kW/m³ można osiągnąć w pojedynczym mikrowyładowaniu, natomiast w klasycznym wyładowaniu barierowym uzyskiwane gęstości mocy są rzędu 10⁻³ kW/m³, a więc kilka rzędów mniejsze.



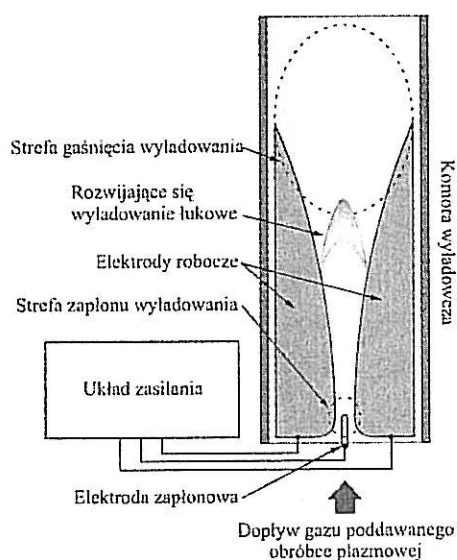
Rys. 3. Gęstość mocy wybranych wyładowań w obecności bariery dielektrycznej [50]
Fig. 3. Power density of selected discharges at presence of dielectric barrier [50]

Zwiększenie gęstości mocy wyładowań jest teoretycznie możliwe w dwojaki sposób:

- przez zastosowanie specjalnych konstrukcji elektrod i dielektryków, tak aby wyładowania zachodziły w bardzo wąskich szczelinach wyładowczych (10⁻¹ kW/m³) bądź w mikrootworach (10²÷10³ kW/m³),
- poprzez zastosowanie impulsowych źródeł zasilania (10²÷10³ kW/m³).

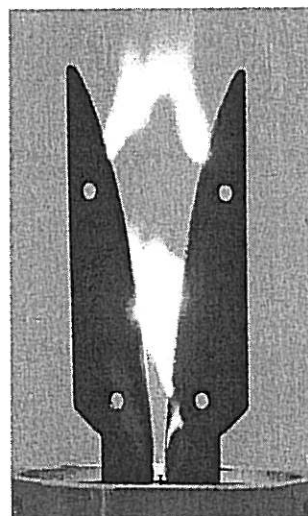
Elementem inicjującym wyładowanie, w reaktorze z rysunku 4, jest niewielkiej mocy reaktor plazmowy wytwarzający strumień plazmy o koncentracji elektronów $n_e=(10^{13}\div 10^{14})\text{ m}^{-3}$ skierowany do obszaru, w którym odległość pomiędzy elektrodami roboczymi jest najmniejsza. Koncentracja elektronów w strefie zapłonu wyładowania umożliwia zapłon wyładowania na elektrodach roboczych. Taką samą funkcję spełnia elektroda zapłonowa w reaktorze trójelektrodowym przedstawionym na rysunku 5. Wytworzona nią niewielkiej mocy iskra elektryczna jest wystarczająca do zjonizowania przestrzeni międzyelektrodowej, co ułatwia zapłon właściwego wyładowania między elektrodami roboczymi w każdym cyklu pracy reaktora.

Aby zapewnić nierównowagowe i nietermiczne warunki generowanej plazmy, napięcie zasilające zwykle zawiera się w granicach od 1kV do 2kV, a prąd pary elektrod nie przekracza 10 A. Takie wartości napięcia i prądu nie są typowe dla wyładowania łukowego.



Rys. 6. Schemat ideowy reaktora dwuelektrodowego

Fig. 6. Schematic diagram of two-electrode reactor



Rys. 7. Ślizgające się wyładowanie łukowe

Fig. 7. Gliding arc discharge

Najprostszy konstrukcyjnie jest dwuelektrodowy reaktor plazmowy ze ślizgającym się łukiem, którego geometrię oraz widok palącego się wyładowania przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Można założyć, że w miejscu zapłonu wyładowanie znajduje się w stanie równowagi termodynamicznej. Pod wpływem sił gazodynamicznych wyładowanie przesuwają się wzdłuż elektrod i jest podtrzymywane przy znacznie niższym napięciu niż wymagane do zapłonu. Towarzyszy temu kilkukrotny wzrost jego długości i objętości, a równocześnie następuje obniżenie temperatury ośrodka gazowego wewnątrz kolumny łukowej i przejście do fazy nierównowagowej. Zgaśnięcie wyładowania następuje z chwilą, gdy energia elektryczna

3.1. Przegląd modeli matematycznych wyładowań łukowych

Model ślizgającego się wyładowania łukowego, którego parametry znacznie różnią się od klasycznego łuku elektrycznego, powinien uwzględnić kilkunastokrotny wzrost długości kolumny i objętości wyładowania, jego zapłon i cykliczną pracę reaktora. Ważnym zagadnieniem jest zapewnienie warunków nierównowagowych generowanej plazmy, co jest związane z rozkładem temperatury w przestrzeni wyładowczej reaktora oraz określeniem energii (temperatury) cząstek plazmy, a zwłaszcza elektronów, których energie w plazmie nierównowagowej są znacznie wyższe niż pozostałych cząstek plazmy. Zjawiska te są trudne do diagnostyki i wymagają specjalnych metod i urządzeń badawczych. Modelowanie matematyczne i numeryczne tych zjawisk jest alternatywą dla kosztownych badań eksperymentalnych.

W zależności od celu modelowania i rodzaju zjawisk, które zamierzamy odwzorować w badanym procesie plazmowym, modele wyładowań łukowych można podzielić na: deterministyczne i stochastyczne, statyczne i dynamiczne, kanałowe i zaciskowe.

Podstawą do formułowania wszystkich modeli są równania hydrodynamiki nagrzewanego gazu, związane z wydzieloną przez wyładowanie energią elektryczną, oraz mechanizmy wymiany tej energii z otoczeniem. Wzrost temperatury i ciśnienia gazu, w którym zachodzą wyładowania, wpływają na zmienność procesów dysocjacji i jonizacji, a to oddziałuje z kolei na wartość parametrów elektrycznych i hydrodynamicznych obszaru plazmy wyładowania łukowego.

Pierwsze modele łuku zostały zaproponowane już na początku dwudziestego wieku. Można tu wymienić zaciskowy model empiryczny łuku elektrycznego, płonącego swobodnie między elektrodami węglowymi, podany przez Hertę Ayrton [27], w postaci dynamicznej charakterystyki prądowo-napięciowej uwzględniającej długość kolumny wyładowania.

Często wprowadza się podział modeli matematycznych na dwie zasadnicze grupy [7]:

- modele kanałowe, zwane również matematyczno-fizycznymi,
- modele zaciskowe, zwane modelami adaptatywnymi.

Za pomocą modeli kanałowych możemy obliczyć parametry miejscowe plazmy łuku i jej otoczenia (temperatura, ciśnienie, prędkość przepływu gazu) oraz dobrać najbardziej pożądane kształty komór w łącznikach i geometrie elektrod reaktorów plazmowych. W modelach zaciskowych zjawiska fizyczne zachodzące w łuku są sprowadzone do zastępczego dwójnika elektrycznego o nieliniowej zależności prądu i napięcia. Za ich pomocą liczymy przebiegi prądów, napięć, mocy i konduktancji w obwodach zasilania reaktorów plazmowych.

Przełomem w dziedzinie modelowania matematycznego łuku elektrycznego były modele zaciskowe Mayra i Cassiego, które, modyfikowane następnie przez wielu autorów, pozwoliły opisać konduktancję kolumny wyładowania łukowego uwzględniającą mechanizmy wymiany

3.2. Wybrane wyniki modelowania ślizgającego się łuku elektrycznego

Przedstawiono wyniki modelowania matematycznego dwuelektrodowego reaktora plazmowego z wykorzystaniem modelu Ayrton oraz analizę rozkładu temperatury w komorze wyładowczej reaktora. Zależność na dynamiczną charakterystykę prądowo-napięciową wyładowania łukowego, uwzględniająca jego długość, podaną po raz pierwszy przez Hertę Ayrton, przedstawia poniższe równanie:

$$u_l(t) = A + B \cdot l_l(t) + \frac{C + D \cdot l_l(t)}{i(t)} \quad (3)$$

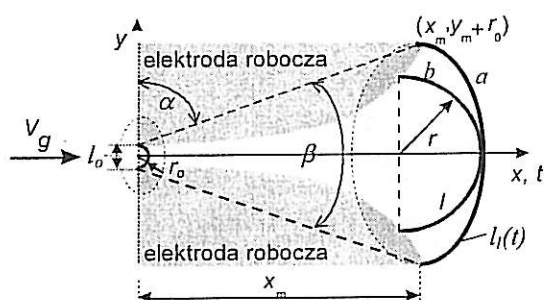
w którym: A , B , C i D to stałe wyznaczone eksperymentalnie, $l_l(t)$ – długość wyładowania, $i(t)$ – prąd łuku.

W zależności podanej przez Ayrton (3) długość kolumny wyładowania jest stała i takie założenie dla łuku płonącego swobodnie między elektrodami o stałym odstępie było uzasadnione. Długość ślizgającego się wyładowania łukowego wzrasta kilkunastokrotnie w czasie cyklu pracy, w stosunku do odległości elektrod w miejscu zapłonu, co wymagało zmodyfikowania równania 3 i uzależnienia długości wyładowania w miejscu gaśnięcia od kąta rozchylenia elektrod β , prędkości przepływu gazu v_g i czasu t , według:

$$l_l(t) = l_0 + \beta \cdot v_g \cdot t, \quad (4)$$

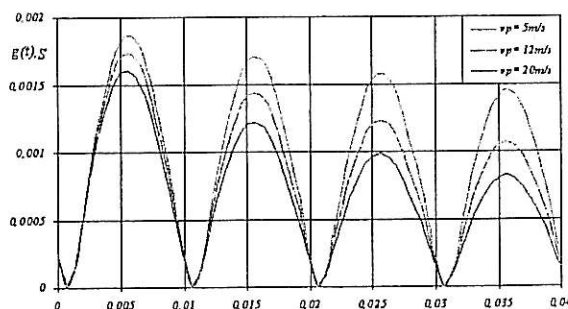
gdzie: l_0 – początkowa odległość elektrod w miejscu zapłonu wyładowania.

Założono zatem, że prędkość wyładowania jest równa prędkości gazu, a kolumna ma kształt części okręgu opartego na kącie β rozchylenia elektrod (krzywa a na rys. 8).



Rys. 8. Geometria elektrod z założonym kształtem kolumny ślizgającego się wyładowania łukowego: a – łuk oparty na kącie rozchylenia elektrod β

Fig. 8. Geometry of electrodes with assumed shape of gliding arc discharge column: a – arc based on electrode taper angle β



Rys. 9. Konduktancja wyładowania w funkcji czasu dla 3 prędkości gazu- wyniki numeryczne

Fig. 9. Discharge conductance as a function of time for 3 gas speeds – numerical results

Wybrane wyniki modelowania matematycznego ślizgającego się wyładowania zasilanego z rzeczywistego źródła napięcia sinusoidalnego w programie MathCAD przedstawiono na rysunkach 9 i 10. Stwierdzono, że zależność na charakterystykę prądowo-napięciową wyładowania łukowego, podana przez Ayrton, może dobrze odwzorowywać jakościowe

Równania te mogą zostać rozwiązane za pomocą dowolnych metod numerycznych, przy czym najprościej jest zastosować metodę różnic skończonych lub elementów skończonych. Ze względu na małą wartość prędkości promieniowej plazmy v , w porównaniu z osiową u ($v = 0,05 u$), czynnik z nią związany w równaniu bilansu mocy można pominąć. Upraszcza to równanie (5) do postaci (7), nie wpływając w znaczny sposób na wyniki obliczeń:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial z} + \sigma E^2 = 0 \quad (7)$$

W praktyce pojawiają się trudności z rozwiązaniem równania (7) ze względu na złożoną zależność parametrów λ , c_p , σ i ρ od aktualnej temperatury w przestrzeni wyładowań. W modelu matematycznym przyjęto, na podstawie pomiarów [12], że wyżej wymienione parametry są nieliniowo zależne od temperatury. W podobny sposób zostały wprowadzone do modelu matematycznego pozostałe parametry zależne od temperatury.

Równanie różniczkowe drugiego rzędu (7), bilansu mocy w kolumnie łukowej, można przekształcić do równania różnicowego, wprowadzając kwadratową siatkę dyskretyzującą, a opis różnicowy wykonano dla dowolnego punktu wewnętrznego P siatki o współrzędnych i, j . Dla zadanego promienia kanału plazmowego, jego długości i znanego w postaci analitycznej rozkładu temperatury na katodzie źródła (9) równanie bilansu mocy (7) można zapisać w następującej postaci różnicowej:

$$T_{i,j-1} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1} + T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j} + \frac{k}{2R} (T_{i,j+1} - T_{i,j}) = -\frac{\sigma E^2}{\lambda} k^2 \quad (8)$$

Po przekształceniu otrzymamy zależność na temperaturę $T_{i,j}$ w punkcie o współrzędnych i, j siatki:

$$T_{i,j} = \frac{1}{4} \left[T_{i,j-1} \left(1 - \frac{k}{2R} \right) + T_{i,j+1} \left(1 + \frac{k}{2R} \right) + T_{i-1,j} + T_{i+1,j} + \frac{\sigma E^2}{\lambda} k^2 \right] \quad (9)$$

gdzie, k – krok siatki, R – promień komory wyładowczej.

Biorąc pod uwagę cylindryczną konstrukcję plazmotronu, przyjęto układ współrzędnych biegunowych (z, r), dla których warunki brzegowe mają postać (rys. 12):

- warunek na osi symetrii dla $r=0$ $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$,
- warunek na ściankach bocznych dla $r = R$ $T=300 \text{ K}$,
- warunek na końcu elektrod reaktora plazmowego $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$.

Wyniki symulacji numerycznej rozkładu pola temperatury w komorze wyładowczej reaktora plazmowego w argonie przedstawiono na rysunku 13 dla dwóch różnych kroków siatki: $\Delta T > 10 \text{ K}$ i $\Delta T < 10 \text{ K}$ po 100 i 118 iteracjach. Obraz przestrzenny rozkładu temperatury otrzymuje się poprzez obrót wykresu z rysunku 12 wokół osi z . Przedstawiony model matematyczny nie ogranicza się do symulacji rozkładu pola temperatury i pozwala przeprowadzić obliczenia innych parametrów plazmy, które zależą od rozkładu temperatury [12].

powstających w procesach malowania, lakierowania, spalania odpadów poszpitalnych i w innych procesach chemicznych;

- recykling i usuwanie zanieczyszczeń – rozkład i spalanie odpadów organicznych, lotnych i stałych, gazów spalinowych z silników wysokoprężnych, zużytych baterii, płytek obwodów drukowanych, za pomocą plazmy łukowej i kwaziłukowej;
- wspomaganie reakcji chemicznych – selektywne usuwanie acetylenu z etylenu, rozkład etylenu, trichloroetylenu, octanu etylu i toluenu, wytwarzanie wodoru gazowego i sadzy poprzez rozpad węglowodorów.

Większość wymienionych badań jest znacznie zaawansowana, a niektóre z nich zostały już zastosowane w praktyce.

Biologiczne i medyczne zastosowania plazmy niskotemperaturowej wykorzystują bakteriobójcze właściwości wyładowań elektrycznych, a zwłaszcza wytwarzanych podczas tych wyładowań takich związków, jak ozon (O_3), tlenek azotu (NO) i nadtlenek wodoru (H_2O_2). Pożądaną cechą plazmy w tych zastosowaniach jest brak równowagi termodynamicznej – niska temperatura gazu i wysokie energie elektronów inicjują reakcje chemiczne, wpływające na struktury biologiczne i DNA bakterii, wirusów i grzybów, ale nie niszczą innych (zdrowych i korzystnych dla funkcjonowania) składników czy komórek środowiska biologicznego poddawanego obróbce plazmowej.

Badane są różne rodzaje wyładowań elektrycznych przy ciśnieniu atmosferycznym, ale szczególna uwaga jest poświęcona wyładowaniom impulsowym – energia dostarczana elektronom w bardzo krótkim czasie (rzędu nanosekund) trwania impulsu, nie podgrzewa otaczającego medium (gazu, cieczy, komórek) [4, 46, 47].

Aktualnie, zastosowania biologiczne i medyczne obejmują [3, 8, 14, 19, 21, 22, 23, 30, 31, 32, 36, 41]:

- sterylizację żywych tkanek ludzkich i zwierzęcych i wspomaganie leczenia – zabijanie mikroorganizmów, zwłaszcza trudno usuwalnych przetrwalników bakteryjnych, bioodkazywanie za pomocą wyładowań w postaci ślizgającego łuku, wyładowań stałoprądowych w powietrzu, mechanizmy oddziaływania plazmy nietermicznej na bakterie, sterylizację niskotemperaturową w plazmie impulsowej; koagulację i sterylizację ran powierzchniowych, krwi, zastosowania w stomatologii, wspomaganie leczenia nowotworów skóry;
- sterylizację narzędzi medycznych – zwłaszcza elementów wykonanych z tworzyw sztucznych nieodpornych na wysoką temperaturę; jest wykorzystywana plazma impulsowa, mikrofalowa, w środowisku suchym i wilgotnym;
- pokrywanie implantów i soczewek warstwami biokompatybilnymi – wytwarzanie i biologiczne zastosowania polimerów plazmowych w leczeniu i diagnostyce, poprawę właściwości i biokompatybilności cienkich warstw amorficznych na protezach dentystycznych, powierzchni tytanu, nanowarstw na soczewkach kontaktowych, osadzanie plazmowe kompozytowych, bioaktywnych powłok implantów wewnątrzkościowych;

Układ zasilania w energię elektryczną, niezależnie od rodzaju wyładowań elektrycznych wykorzystywanych do generacji plazmy, przesądza o sprawności całego procesu plazmowego i, w konsekwencji, o możliwości jego przemysłowego zastosowania.

BIBLIOGRAFIA

1. Addou A., Ghezzer R. M., Abdelmalek F., Brisset J. L.: Proceedings of ISPC-17. 2005, CD.
2. Akishev Yu., Grushin M., Karalnik V., Trushkin N., Kholodenko V., Chugunov V., Kobzev E., Zhirkova N., Irkhina I.: Atmospheric pressure non-thermal plasma sterilization of microorganisms in liquids and on the surfaces. Proceedings of 18th International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No. 262, 2007.
3. Akitsu T., Ohkawa H., Ohhashi W., Murayama H., Katayama-Hirayama K.: Experimental Comparison of Antibacterial Effect in Cold Plasmas at Normal Atmospheric pressure. Proceedings of 18th International Conference on Plasma Chemistry, paper No. 173, 2007.
4. Arjunan K. P., Vasilets V., Gutsol A., Anandan S., Cho Y., Fridman A.: Water sterilization using a Pulsed Spark Plasma Discharge. Proceedings of 18th International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No. 330, 2007.
5. Bogaerts A., Neyts E., Gijbels R., van der Mullen, J.: Gas discharge plasmas and their applications. "Spectrochimica Acta" 2002, Part B 57.
6. Brocilo D. et al: Removal of NO_x and dust particles from exhaust of diesel engine power generator by plasma-catalyst system. Proceedings of 17th International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No. 544, 2005.
7. Ciok Z.: Modele matematyczne łuku łączeniowego. PWN, Warszawa 1987.
8. Creighton Y., Huijser T., Broekhuijsen M.: Pulsed RF plasma sterilization of medical packaging. Proceedings of 18th International Conference on Plasma Chemistry. 2007, paper no. 769.
9. Czernichowski A.: Gliding arc: Applications to engineering and environment control. "Pure Appl. Chem." 1994, Vol. 66, No. 6, p. 1301-1310.
10. Czernichowski A., Janowski T., Stryczewska H. D.: Performances of the Supplying Systems for Plasma Reactors. Contributed Papers of 4th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, Bratislava, HAKONE IV 1993.
11. Czernichowski A., Lesueur H.: Multi-electrodes high pressure gliding discharges reactor and its application for some waste gas and vapor incineration. Plasma Applied to Waste Treatment, First Annual INEL Conference, Idaho Falls, Idaho (USA), 16-17 Jan. 1991.
12. Diateczyk J.: Badanie pola temperatury w komorze wyładowczej reaktora plazmowego, Rozprawa doktorska, Lublin 2009.

24. Kołaciński Z.: Plasma treated waste destruction. ASEM Workshop on Europe-Asia Cooperation on Clean technologies, organized by European Commission and Vietnamese Academy of Science, Hanoi 2004.
25. Komarzyniec G.: Analiza pracy transformatora pięciokolumnowego w układzie zasilania łukowego reaktora plazmowego. Rozprawa doktorska, Lublin 2008.
26. Krall N. A., Trivelpiece A. W.: Fizyka plazmy. WNT, Warszawa 1979.
27. Królikowski C.: Technika łączenia obwodów elektroenergetycznych. PWN, Warszawa 1990.
28. Li Ke, Chen Jie-rong, Mo Xiao-yan, Li Ru, Li Ying: Study of non-thermal plasma on the efficacy and mechanisms of indoor air sterilization. Proceedings of 17th International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No. 203, 2005.
29. Lock E. H., Saveliev A. V., Kennedy L. A.: Removal of Methanol and Dimethyl Sulfide by Pulsed Corona Discharge: Energy Efficiency and Byproducts Formation. Proceedings of 17th International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No. 306, 2005.
30. Lopez L. C., Gristina R., Favia P., d'Agostino R.: Covalent immobilization of biological molecules on various plasma modified polymers. Proceedings of 17th International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, No. 343, 2005.
31. Moreau M., Feuillolley M. G. J., Meylheuc T.: Chevalier S., Orange N., Brisset J. L, Bio-decontamination by Gliding Arc Discharges: Application to the treatment of *Erwinia carotovora atroseptica* 1526. Proceedings of 17th International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No. 297, 2005.
32. Motret O., Aubry O., Thuillier C., Lascaud M., Met C., Cormier J-M.: Destruction of ethylene by pulsed dielectric barrier discharge in dry and wet air – parametrical study. Proceedings of 17th International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, No. 578, 2005.
33. Non-thermal Plasma Techniques for Pollution Control, Part. A: Overview, Fundamentals and Supporting Technologies, edited by M. Penetrante & Shirley E. Schultheis. NATO ASI Series G: "Ecological Science" Vol. 34, part A and B, Springer-Verlag, 1993.
34. Pacheco M., Moreno H., Pacheco J.: Automotive toxic gases removal by non thermal plasma. Proceedings of 17th International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No. 110, 2005.
35. Pawłat J., Diatczyk J., Stryczewska, H. D.: Low temperature plasmas for exhaust gas purification from paint shop – a case study. „Przegląd Elektrotechniczny” 2011, R. 87, Nr 1, p. 245-248.
36. Perucca M., Pirri C. F., Mandracci P., Carossa C., Ceruti P.: Growth of amorphous thin-films on dental prostheses for the improvement of their performance. Proceedings of 17th International Conference on Plasma Chemistry, paper No. 655, 2005.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Marian Pasko

Wpłynęło do Redakcji dnia 27 września 2011 r.

Abstract

Low temperature atmospheric pressure plasmas are considered as a promising alternative to conventional chemical methods and are applied in many industrial processes. They are: treatment of flue gases emitted by industrial processes of combustion, painting and varnishing, wastes utilization, deodorization, disinfection and sterilization, in which plasma based processes are the ecologically justified alternative for chemical methods; material processing and new material manufacturing for application in microelectronics and nanotechnologies, in which non-thermal and non-equilibrium plasma conditions allow plasma-chemical treatment of organic materials, like rubber, fabrics, biomaterials.

Dielectric barrier discharges DBD and gliding arc discharges GAD are the good sources of non thermal non-equilibrium plasma for technological applications. Operation at atmospheric pressure, relatively small power supply systems' requirements, quite simple discharge chambers' construction and possibility to work with almost all processing gases make the DBD and GAD reactors suitable for variety of applications, which will be expanded. Investigations on the improvement of DBD and GAD plasma reactor's efficiency are carried out for a long time in many research centers. They are focused on application of new electrodes' configurations, dielectric materials, reactor's geometries and electric power supply systems.

Numerical analysis of cold plasma reactors is extremely complex. Nonlinear character of discharge phenomena, the necessity to consider and relate physical parameters of the ionized gas, cooling conditions as well as electrical parameters of the supply circuit always force to assume considerable simplifications of the discharge model.

Paper presents chosen results of two-electrode GAD reactor modeling. Then, review of up to date low temperature plasmas' applications in ecology and bioengineering are presented.

37. Pollo I.: OZON. Właściwości, produkcja, zastosowania. Prace Instytutu Matematyki, Fizyki i Chemii, Politechnika Lubelska, Wydawnictwa Uczelniane, Seria A, Nr 4, 1983.
38. Rutberg Ph. G., Safronov A. A., Popov S. D., Surov A. V., Nakonechny Gh. V.: Investigation of voltage and current variations in a multiphase AC electric arc system, 12th International Congress on Plasma Physics, 25-29 October, Nice (France), 2004.
39. Sawicki A., Krouchinin A. M.: Modeling of electrical and thermal processes in stream plasmatrons. "IEEE Transactions on Plasma Science" 2000, Vol. 28, No. 1, p. 242-247.
40. Schalekamp M.: Ozone technology in Switzerland yesterday, today and tomorrow. Proceedings of II International Conference on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, HAKONE'89, ed. By Technical University of Lublin, 1989.
41. Silla V., Munz R. J.: The treatment of Li-ion battery waste in a transferred arc plasma reactor. Proceedings of 17th International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No. 319, 2005.
42. Stryczewska H. D.: Technologie plazmowe w energetyce i inżynierii środowiska, Komitet Elektrotechniki PAN, Lublin 2009.
43. Stryczewska H. D., Diatczyk J., Komarzyniec G.: The influence of power source parameters on the gliding arc characteristics. „Przegląd Elektrotechniczny” 2008, Nr 7, p. 60-63.
44. Stryczewska H. D., Komarzyniec G., Diatczyk J.: Technological Features of Gliding Arc Discharge Plasma. „Przegląd Elektrotechniczny” 2008, Nr 7, p. 170-173.
45. Vasiliev M., Vasilieva T.: Electron-beam plasma in the production of bioactive agents and drugs. Proceedings of 17th International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No. 57, 2005.
46. Vaze N. D., Gallagher M. J., Vasilets V. N., Anandan S., Gutsol A., Milovanova T. N., Fridman A.: Air Sterilization Using Non-Thermal Plasma. Proceedings of 18th International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No. 320, 2007.
47. Vrajova J., Novotny O., Cech J., Krcma F., Stahel P.: Plasma Based Removal of Microbial Contamination of Paper. Proceedings of 18th International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No. 489, 2007.
48. Wang F., Kuthi A., Gundersen M. A.: Compact High Repetition Rate Pseudospark Pulse Generator. "IEEE Transaction on Plasma Science" 2005, vol. 33, no 4, p. 1177-1181.
49. Xia W., Fulcheri L., Gonzalez-Aguilar J., Hui L., Gruenberger T.M.: Characterization of a 3-Phase a.c. Free Burning Arc Plasma. "Plasma Science & Technology" 2006, Vol. 8, No. 2, p. 156-163.
50. Yasuoka V., Endo Y., Ishii S.: Experimental Study on Ozone Generation Using DC Driven Micro-Plasma. Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2003.

13. Ebihara K., Takayama M., Ikegami T., Stryczewska H. D., Gyoutoku Y., Yokoyama T., Gunjikake N., Mizukami H., Araki S., Tachibana M., Sakai T.: Soil Sterilization Using Ozone Generated By Dielectric Barrier Discharge. Proceedings of 17th International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No. 64, 2005.
14. Fridman G., Shereshevsky A., Balasubramanian M., Peddinghaus M., Brooks A., Gutsol A., Vasilets V., Fridman A., Friedman G.: Sterilization of Living Human and Animal Tissue by Non-Thermal Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge Plasma. Proceedings of 18th International Conference on Plasma Chemistry, paper No. 536, 2007.
15. Gallagher M. J., Gutsol A., Friedman G., Fridman A.: Non-Thermal Plasma Applications in Air-Sterilization. Proceedings of 17th International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper 729, 2005.
16. Girard-Lauriault P.-L., Mwale F., Iordanova M., Demers C., Desjardins P., Lerouge S., Wertheimer M.R.: Atmospheric Pressure Deposition of Micro-Patterned N-rich Plasma-Polymer Films for Tissue Engineering. Proceedings of 17th International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No. 133, 2005.
17. Grossmannová H., Krčma F., Slánská K.: VOC Destruction in Atmospheric Pressure Plasma Discharge. Proceedings of 17th International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, 2005, paper No. 158.
18. Heeren T., Ueno T., Wang D., Namahira T., Katsuki S., Akiyama H.: Novel Dual Marx Generator for Microplasma Applications. IEEE Transaction on Plasma Science, vol. 33, no 4, 2005, p. 1205-1209.
19. Iseki S., Aomatsu A., Ohta T., Ito M., Kano H., Higashijima Y., Hori M.: Sterilization of *Penicillium digitatum* Using Non-equilibrium Atmospheric Pressure Plasma. Proceedings of 18th International Conference on Plasma Chemistry, paper 2007, No. 204.
20. Jaroszyński L.: Analiza plazmowego reaktora łukowego wykorzystującego nieliniowość magnetowodów transformatorów układu zasilającego. Rozprawa doktorska, Lublin 2000.
21. Kalghatgi S., Fridman G., Nagaraj G., Peddinghaus M., Balasubramanian M., Brooks A., Gutsol A., Vasilets V., Fridman A., Friedman G.: Mechanism of Blood Coagulation by Non-Equilibrium Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge Plasma. Proceedings of 18th International Conference on Plasma Chemistry, paper No. 614, 2007.
22. Kalita V. et al: Plasma deposited composite bioactive porous coatings for intrabone implants. Proceedings of 17th International Conference on Plasma Chemistry, paper No. 535, 2005.
23. Khacef A., Cormier J. M.: Removal of NO_x and SO₂ from synthetic glass industry exhausts with pulsed dielectric barrier discharge. Proceedings of 17th International Conference on Plasma Chemistry, CD-rom, paper No. 590, 2005.

- inżynierię tkankową – plazma wspomaga wytwarzanie czynników bioaktywnych i leków, immobilizuje molekuly biologiczne, modyfikuje powierzchnie w celu regulowania zachowań komórki, poprawia adhezję krwi;
- diagnostykę medyczną – wytwarzanie biosensorów na bazie polimerów i cienkich warstw amorficznych do analiz medycznych.

Metody plazmowe w biomedycynie, a zwłaszcza szeroko już stosowana w praktyce medycznej ozonoterapia, wykazują wysoką skuteczność, eliminują większość bakterii, wirusów, grzybów i pleśni, aktywizują działanie enzymów antyutleniających, pobudzają wytwarzanie białych krwinek. W oddziaływaniu z żywymi organizmami i tkankami, w bezpiecznych dawkach nie dają skutków ubocznych, są bezbolesne, nie wywołują reakcji alergicznych, a często eliminują konieczność kuracji farmakologicznej.

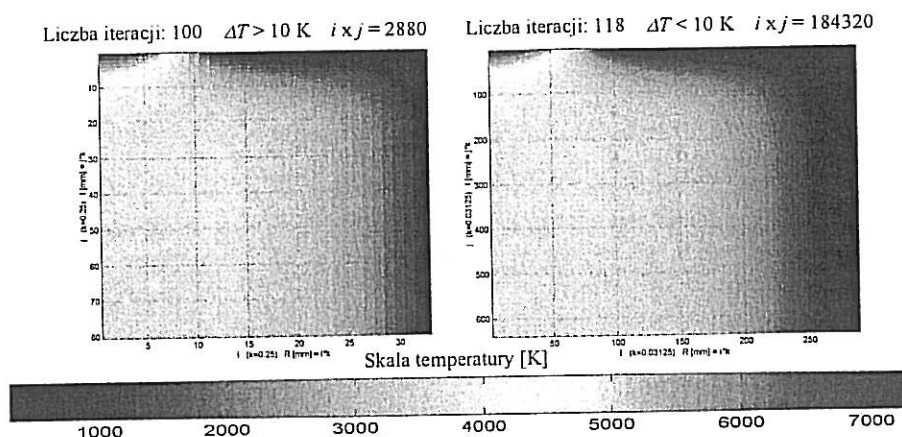
5. PODSUMOWANIE

Reaktory z wyładowaniami barierowymi oraz ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym są dobrym źródłem nietermicznej i nierównowagowej plazmy dla celów technologicznych. Praca przy ciśnieniu atmosferycznym, niezbyt wysokie wymagania odnośnie do zasilania w energię elektryczną, prosta budowa komór wyładowczych i możliwość pracy z niemal wszystkimi gazami sprawiają, że ich zastosowanie w technologiach plazmowych jest już dosyć powszechne i będzie się rozszerzało.

Analiza numeryczna urządzeń wyładowczych, ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, jest zagadnieniem stosunkowo złożonym z uwagi na konieczność zamodelowania bardzo skomplikowanych nieliniowych zjawisk towarzyszących wyładowaniom elektrycznym. Poprawne modelowanie zjawisk zapłonu wyładowań, cyklicznej pracy reaktora i jego charakterystyk dynamicznych, o parametrach charakteryzujących się znaczną zmiennością przestrzenno-czasową, wymaga istotnej modyfikacji znanych i stosowanych w praktyce modeli wyładowań łukowych.

Prace badawcze dotyczące zastosowań nietermicznej plazmy w technologiach związanych z ochroną środowiska oraz w biotechnologiach mają na celu, m.in.:

- ocenę przydatności i skuteczności różnych rodzajów wyładowań elektrycznych do wytwarzania plazmy nietermicznej, zwłaszcza przy ciśnieniu atmosferycznym,
- usprawnienie procesu generacji elektronów inicjujących proces usuwania zanieczyszczeń,
- osiągnięcie pożądanego składu końcowego mieszaniny gazowej i wysokiego stopnia konwersji szkodliwych związków poprzez dodawanie domieszek i katalizatorów (para wodna, amoniak),
- minimalizację zużycia energii,
- dopasowanie źródła zasilania elektrycznego do reaktora plazmowego.



Rys. 13. Wynik symulacji numerycznej rozkładu temperatury w komorze wyładowczej reaktora ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym

Fig. 13. Result of numerical simulation of temperature distribution in discharge chamber of reactor with gliding arc discharge

4. ZASTOSOWANIA PLAZMY W EKO- I BIOINŻYNIERII

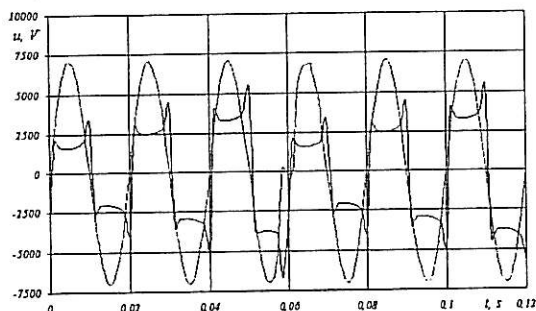
Jako zjonizowany gaz cząsteczki plazmy łatwo wchodzą w reakcje z różnymi substancjami chemicznymi, co pozwala na rozkład związków toksycznych, modyfikację struktur polimerowych, niszczenie bakterii i grzybów oraz wpływanie na ich struktury biologiczne i DNA.

Wśród zastosowań środowiskowych najbardziej technologicznie zaawansowaną i stosowaną w praktyce jest technologia obróbki wody pitnej, w której szkodliwy dla środowiska chlor był zastępowany ozonem wytwarzanym w wyładowaniach barierowych. Obecnie na świecie pracuje ponad 3000 instalacji ozonowania wody pitnej, w których ozonatory wytwarzają ponad 100 kg O₃/h, a moce jednostkowe stacji ozonowania sięgają setek megawatów [37, 40]. W połowie dwudziestego wieku zaczęto powszechnie stosować ozonowanie wody basenowej.

Inne środowiskowe zastosowania ozonu generowanego w wyładowaniach barierowych w powietrzu bądź tlenie obejmują [2, 3, 4, 6, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 23, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 36, 41, 45, 46, 47]:

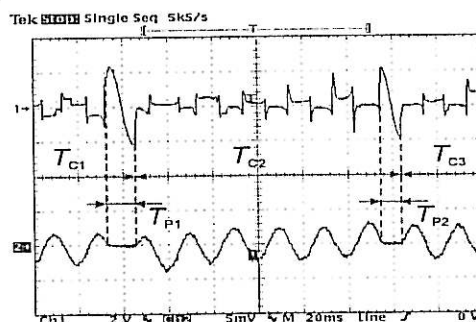
- sterylizację powietrza, wody, gleby, powierzchni i opakowań – są badane różne typy wyładowań w powietrzu, nad powierzchnią wody i bezpośrednio w wodzie, szczególnie przy zasilaniu impulsowym; są prowadzone próby usuwania mikrobiologicznych zanieczyszczeń papieru, opakowań z tworzyw sztucznych, redukcji tlenków azotu z gazów spalinowych pochodzących ze spalania gazu naturalnego, usuwania tlenków azotu (NO_x), dwutlenku siarki (SO₂), metali ciężkich i lotnych substancji organicznych (VOC)

przebiegi prądów i napięć w reaktorze ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym. Dla porównania, na rysunku 11 przedstawiono przebiegi chwilowe prądu i napięcia uzyskane oscylograficznie w reaktorze 2-elektrodowym [42].



Rys. 10. Prąd i napięcie wyładowania w kolejnych cyklach pracy reaktora – wyniki numeryczne

Fig. 10. Discharge current and voltage in successive cycles of reactor work – numerical results



Rys. 11. Napięcie (górny przebieg) i prąd (poniżej) ślizgającego się wyładowania łukowego – wyniki uzyskane eksperymentalnie

Fig. 11. Voltage (top waveform) and current (below) of gliding arc discharge – experimental results

Poniżej przedstawiono wyniki modelowania rozkładu temperatury w komorze wyładowczej reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym.

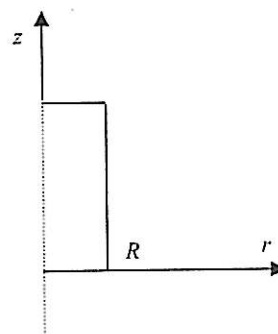
Dane niezbędne do skonstruowania modelu matematycznego można podzielić je na:

zależne od temperatury T :

- przewodność cieplna gazu λ ,
- ciepło właściwe c_p ,
- konduktywność plazmy σ ,
- gęstość właściwa gazu ρ .

niezależne od temperatury:

- prędkość T plazmy – promieniowa v i osiowa u ,
- lepkość gazu μ ,
- ciśnienie gazu p ,
- natężenie prądu wyładowania I ,
- natężenie pola elektrycznego E .



Rys. 12. Przyjęta geometria analizowanego obszaru plazmy we współrzędnych cylindrycznych

Fig. 12. Assumed geometry of the plasma area analysed in cylindrical coordinates

Rozkład temperatury cząstek plazmy opisują, wynikające z zasady zachowania energii, zależności:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial z} - \rho v c_p \frac{\partial T}{\partial r} + \sigma E^2 = 0 \quad (5)$$

$$E = \frac{I}{2\pi \int_0^R \sigma \cdot r \cdot dr} \quad (6)$$

energii z otoczeniem, konduktywność plazmy i jej zmiany wraz z temperaturą oraz termiczną stałą czasową.

Równanie Mayra łuku dynamicznego (1) zakłada zmienną rezystywność kolumny łukowej i jej energii w jednostce objętości oraz jej powierzchniowe chłodzenie, przy czym moc odbierana z jednostki długości kolumny łukowej ma stałą wartość, a jej średnica nie zmienia się wraz ze zmianą prądu:

$$\frac{dg(t)}{dt} + \frac{1}{\tau_M} g(t) = \frac{1}{\tau_M P_0} i^2(t), \quad (1)$$

W równaniu Cassiego (2) jest pomijana bezwładność procesów jonizacyjnych oraz zjawiska przyelektrodowe, zakłada się, że w łuku występuje tylko jonizacja cieplna, a temperatura, rezystywność i energia są stałe w czasie i przestrzeni. W przeciwieństwie do modelu Mayra kolumna wyładowania w modelu Cassiego jest chłodzona wewnątrz, a jej średnica zależy od wartości prądu.

$$\frac{dg^2(t)}{dt} + \frac{2}{\tau_c} g^2(t) = \frac{2}{\tau_c U_{st}^2} i^2(t), \quad (2)$$

Osobne badania dotyczą modeli stochastycznych łuku oraz wykorzystania teorii chaosu, zwłaszcza gdy interesują nas właściwości dynamiczne i stabilność układów z wyładowaniami łukowymi. Wyznaczona za pomocą modeli deterministycznych konduktancja wyładowania łukowego odpowiada jego uśrednionym charakterystykom i nie uwzględnia małych, pojawiających się wokół wartości średniej, zmian konduktancji. Mogą one powodować, na przykład w wyłącznikach prądowych, inne warunki wyłączania, zwłaszcza gdy będą się pojawiać w pobliżu przejścia prądu wyładowania przez zero.

Aby zdefiniować model stochastyczny wyładowania łukowego i określić jego parametry, konieczne jest przeprowadzenie wielu eksperymentów, z których można wybrać niezbędne informacje o zmianach konduktancji wyładowania.

W reaktorach plazmy ślizgającego się wyładowania łukowego dążymy do osiągnięcia warunków nierównowagi termodynamicznej, typowych dla wyładowań zachodzących przy niskim ciśnieniu, takich jak wyładowania jarzeniowe. Charakterystyki wyładowań ze ślizgającym się łukiem zależą od wiele parametrów (geometria elektrod, właściwości fizyczne gazu roboczego, jego prędkość i skład chemiczny, wartość prądu i napięcia, impedancja układu zasilającego). Zastosowanie metod analizy bazujących na teorii chaosu powinno dostarczyć wielu, nieosiągalnych innymi metodami, informacji o zachowaniu się układu i jego czułości na zmiany tych parametrów.

dostarczana ze źródła zasilania nie jest w stanie zrównoważyć strat energetycznych wydłużającej się kolumny łukowej. Po zgaśnięciu wyładowania następuje niemal natychmiastowa jego odbudowa w strefie zapłonu i cykl pracy reaktora powtarza się. Czas trwania jednego cyklu zależy od wielu czynników, spośród których najważniejsze to: wymiary i kształt elektrod, prędkość przepływu ośrodka gazowego przez komorę wyładowczą, temperatura panująca wewnątrz komory wyładowczej, skład chemiczny gazu, napięcie i natężenie prądu elektrod oraz częstotliwość napięcia zasilającego.

3. MODELOWANIE PLAZMY

Teoria i praktyka modelowania matematycznego wyładowań elektrycznych jest niemal równie długa jak ich przemysłowe wykorzystanie. Cały ubiegły wiek był poświęcony modelowaniu różnych zjawisk związanych z wyładowaniami łukowymi i zaowocował wieloma modelami, których użyteczność praktycznie zweryfikowano w badaniach dotyczących teorii zwarć i procesów łączeniowych, przy budowie komór gaszeniowych wyłączników prądowych, projektowaniu pieców łukowych i plazmotronów dla zastosowań w metalurgii i obróbce powierzchniowej. Podstawowym problemem w badaniach obwodów z komutacją jest gaszenie wyładowania łukowego. Modele wyładowań łukowych dla tych celów są tak definiowane, aby poprawnie zbadać zjawiska zachodzące w pobliżu przejścia prądu przez zero – miejscu naturalnego gaszenia łuku. Pozwalają one wyciągnąć wnioski dotyczące doboru geometrii oraz parametrów komór wyłączników prądowych i tak je zaprojektować, aby gaszenie łuku następowało przy pierwszym przejściu prądu przez zero. Głównym celem modelowania wyładowań w reaktorach plazmowych jest taki dobór ich parametrów oraz charakterystyk układu zasilającego, aby zapewnić nieprzerwane stabilne wyładowanie nierównowagowe, zapewniając jednocześnie wysoką wydajność i sprawność procesów plazmochemicznych.

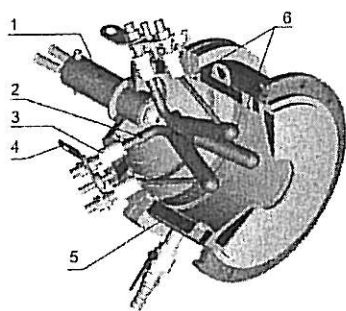
Zjawiska towarzyszące wyładowaniom łukowym, wykorzystywanym w technologiach plazmowych, są niezwykle złożone, a ich analiza wymaga wyznaczenia rozkładu pól elektromagnetycznego i temperaturowego, ich wzajemnych sprzężeń oraz rozwiązania równań przepływu energii, ładunku i masy. Nieliniowy charakter zjawisk w wyładowaniu łukowym, konieczność uwzględnienia i powiązania ze sobą fizycznych parametrów zjonizowanego gazu, warunków chłodzenia łuku i elektrycznych parametrów układu zasilania zawsze zmuszają, przy konstruowaniu modelu matematycznego, do przyjmowania znacznych założeń upraszczających i często wymagają wyznaczanych empirycznie charakterystyk wyładowania.

Odpowiednia geometria elektrod reaktora, rodzaj dielektryka oraz sposób zasilania w energię elektryczną decydują o parametrach wytwarzanej plazmy oraz możliwościach i charakterze pracy reaktora plazmowego z wyładowaniami dielektrycznymi barierowymi.

2.2. Reaktory plazmowe ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym

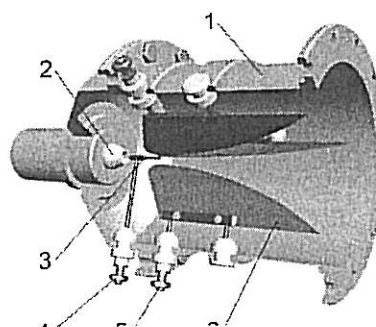
Ślizgające się wyładowanie łukowe, jako źródło nietermicznej plazmy generowanej przy ciśnieniu atmosferycznym, zostało zaproponowane przez Albina Czernichowskiego i zespół z Uniwersytetu w Orleanie, we Francji w 1990 r. Jego główną cechą jest możliwość generacji nietermicznej plazmy bezpośrednio w zanieczyszczonym gazie, przy ciśnieniu atmosferycznym i w warunkach, w jakich gazy wylotowe są emitowane do atmosfery, bez konieczności ich wstępnej obróbki [9].

Plazmę ślizgającego się wyładowania łukowego, podobnie jak innych wyładowań łukowych, można generować przy napięciu stałym, przemiennym i impulsowym. Stosowane w przemyśle plazmotrony ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym są budowane jako dwu-, trzy- i wieloelektrodowe i często posiadają dodatkową elektrodę zapłonową. Przedstawiony na rysunku 4 reaktor plazmowy wytwarza trójfazowe wyładowanie łukowe o mocy dochodzącej do 500 kW [38]. Użyte chłodzenie wodne elektrod i komory wyładowczej umożliwia stosowanie w konstrukcji reaktora materiałów mało odpornych na wysokie temperatury.



Rys. 4. Trójelektrodowy reaktor plazmowy [38]:
1 – jednofazowy reaktor plazmowy, 2 –
elektroda robocza, 3 – materiał izolujący,
4 – zacisk zasilania, 5 – obieg wody
chłodzącej, 6 – kanały dostarczania gazu

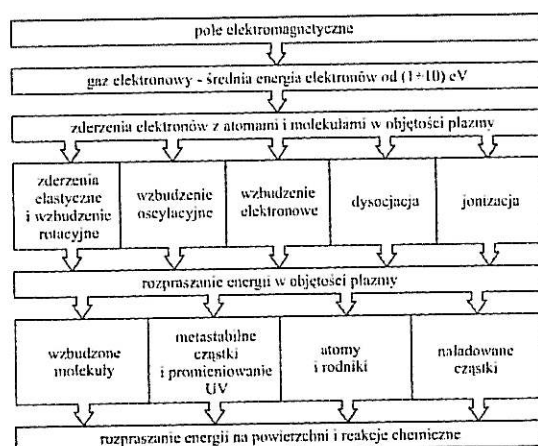
Fig. 4. T Three-electrode plasma reactor [38]:
1 – one-phase plasma reactor, 2 –
working electrode, 3 – insulating
material, 4 – supply terminal, 5 –
circulation of cooling water, 6 – ducts
for gas delivery



Rys. 5. Reaktor plazmowy z dodatkową
elektrodą zapłonową: 1 – komora
wyładowcza, 2 – dysza wlotu gazu,
3, 4 – elektroda zapłonowa, 5, 6 –
elektroda robocza

Fig. 5. Plasma reactor with auxiliary
ignitron electrode: 1 – discharge
chamber, 2 – gas inlet nozzle,
3, 4 – ignition electrode, 5, 6 –
working electrode

niskotemperaturowej jest najbardziej odpowiednia i niezastąpiona, ze względu na selektywność energii i możliwość usuwania kilku zanieczyszczeń jednocześnie.



Rys. 1. Przemiany energii i zjawiska w plazmie
Fig. 1. Energy conversion and phenomena in plasma

W innych zastosowaniach, gdy występują mieszane rodzaje odpadów, wykorzystuje się plazmę termiczną do spalania całkowitego odpadów, łącznie z pojemnikiem, a następnie plazmę niskotemperaturową do oczyszczenia gazów powstałych w procesie spalania. Dotychczas przebadano wiele typów reaktorów plazmy niskotemperaturowej wykorzystywanych w procesach związanych z ochroną środowiska. Potencjalne możliwości tych urządzeń potwierdzono niejednokrotnie przy usuwaniu tlenków azotu NO_x , dwutlenku siarki SO_2 z gazów spalinowych, metali ciężkich i lotnych substancji organicznych powstających w procesach malowania, lakierowania i w procesach chemicznych [24].

2.1. Reaktory plazmowe z wyładowaniami dielektrycznymi barierowymi

Wyładowania przy zmiennym wymuszeniu AC i w obecności bariery dielektrycznej są najczęściej wykorzystywane w technologiach nietermicznej plazmy. Typowe konfiguracje elektrod to układ płaski i cylindryczny (rys. 2), w których dielektryk (szkło, ceramika, polimer, substancja porowata) jest umieszczony na elektrodzie wysokonapięciowej, rzadziej na obu elektrodach bądź między nimi, tworząc jedną lub więcej szczelin (przerw) wyładowczych. Powszechnie wykorzystywanym w praktyce reaktorem plazmowym z wyładowaniami barierowymi jest ozonator. Wytwarzany w nim, wskutek wyładowań w powietrzu lub w tlenie, ozon (O_3) znalazł zastosowanie, niemal od początku XX wieku, w procesach obróbki wody pitnej.

Dielektryczne wyładowania barierowe są wytwarzane przy stosunkowo szerokim zakresie ciśnień, zwykle w od 0,1 do 1 atmosfery, przy napięciu przemiennym sięgającym