

Wpływ parametrów pracy reaktora typu *plasma-jet* z wyładowaniem barierowym na temperaturę gazu poddanego obróbce plazmowej

Influence of operating parameters of plasma-jet reactor with dielectric barrier discharge on temperature of treatment gas

Mgr inż. Piotr Terebun¹,
mgr inż. Michał Kwiatkowski¹,
mgr inż. Piotr Krupski,
dr inż. Jarosław Diatczyk,
dr hab. inż. Joanna Pawłat

Lublin University of Technology, Institute of
Electrical Engineering and Electrotechnologies,
ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, Poland

¹ Uczestnik projektu "Kwalifikacje dla rynku pracy – Politechnika Lubelska przyjazna dla pracodawcy" współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

**European Journal
of Medical Technologies**
2014; 3(4): 38-45

Copyright © 2014 by ISASDMT
All rights reserved
www.medical-technologies.eu
Published online 12.11.2014

Adres do korespondencji:

Mgr inż. Piotr Terebun:
piotr.terebun@gmail.com
Mgr inż. Michał
Kwiatkowski:
m.kwiatkowski@pollub.pl
Mgr inż. Piotr Krupski:
piotr-kl@o2.pl
Dr inż. Jarosław Diatczyk:
j.diatczyk@pollub.pl
Dr hab. inż. Joanna Pawłat:
askmik@hotmail.com;
Wydział Elektrotechniki
i Informatyki,
Politechnika Lubelska,
ul. Nadbystrzycka 38d,
20-618 Lublin, Polska

Streszczenie

Jednym z głównych czynników ograniczających zastosowanie plazmy nierównowagowej w medycynie jest temperatura. W pracy przedstawiono wyniki badań nad temperaturą gazu poddanego obróbce plazmowej w reaktorze plazmowym typu *plasma-jet* z wyładowaniem barierowym. Badania przeprowadzono dla głównych parametrów reaktora, które mogą mieć wpływ na temperaturę zjonizowanego gazu: wartości przepływu masowego, odległości od reaktora, składu gazu roboczego oraz parametrów układu zasilającego.

Słowa kluczowe:

plazma nietermiczna pod ciśnieniem atmosferycznym, reaktor plazmowy, temperatura

Abstract

One of the main factors limiting the use of non-equilibrium plasma in medicine is the temperature. The article presents results of research on the gas temperature in a plasma-jet reactor with dielectric barrier discharge. The study was conducted for the main parameters of the reactor, which can affect the temperature of the ionized gas: flow rate of gas, distance from the reactor, the composition of gas and the parameters of the power supply system.

Key words:

non-thermal atmospheric pressure plasma, plasma reactor, temperature

Wstęp

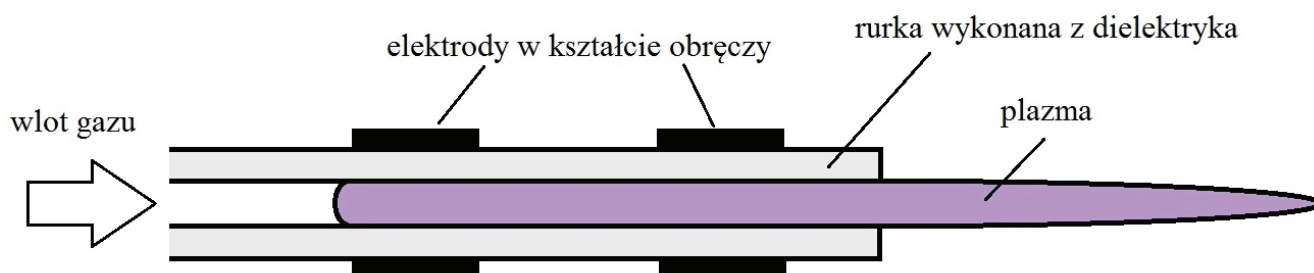
Zastosowanie plazmy nietermicznej w medycynie

Plazma to zjonizowany gaz o odpowiedniej koncentracji swobodnych nośników ładunków elektrycznych w postaci dodatnich jonów i elektronów, przy czym wypadkowy ładunek elektryczny jest równy zeru. W plazmie, która nie jest w stanie równowagi termodynamicznej, energie elektronów są znacznie większe niż energie jonów i cząstek neutralnych. Można więc przekazywać energię w sposób selektywny, co pozwala na skuteczne przeprowadzanie reakcji fizyko-chemicznych przy stosunkowo niewielkiej

temperaturze gazu roboczego [1-2]. Jednym z głównych obszarów zastosowań technologii plazmowych jest wykorzystanie plazmy nietermicznej w medycynie, rolnictwie, inżynierii środowiska, technologiach materiałowych [2-13]. Reaktory typu *jet* są urządzeniami pozwalającymi na generowanie plazmy pod ciśnieniem atmosferycznym. Mają one budowę dyszy, wewnątrz której generowana jest plazma, która następnie zostaje przetransportowana na zewnątrz reaktora w wyniku wymuszonego przepływu gazu (ryc. 1). Ze względu na niewielkie wymiary i prostotę konstrukcji podejmuje się próby ich zastosowania w stomatologii i medycynie, np. do leczenia trudno gojących się ran [6, 14-19].

Ryc. 1.

Reaktor plazmowy typu *jet* z wykorzystaniem bariery dielektrycznej



Plazma może oddziaływać na organizmy żywe poprzez:

- Naładowane cząstki plazmy – jonów oraz wysokoenergetycznych elektronów.
- Wolne rodniki wytworzone w plazmie – takich jak ozon (O₃), tlenek azotu (NO) i nadtlenek wodoru (H₂O₂).
- Pole elektryczne mające wpływ na przepuszczalność błon komórkowych dla naładowanych cząstek plazmy.
- Ciepło.
- Promieniowanie – głównie w zakresie ultrafioletu, które może stymulować komórki biologiczne, a także ma właściwości antybakteryjne.
- Naprężenia ścinające i osuszanie wywołane przepływem strumienia gazu.

Rola poszczególnych czynników w oddziaływaniu na komórki biologiczne w dużej mierze zależy od sposobu oddziaływania plazmy. Można je podzielić na:

- Oddziaływanie bezpośrednie, w którym plazma ma bezpośredni kontakt z traktowaną powierzchnią jako elektrodą uziemiającą, co skutkuje możliwością przepływu prądu do obiektu. Główną rolę odgrywają nietrwałe, ale bardzo reaktywne cząstki, które mają szansę na kontakt z podłożem.
- Oddziaływanie pośrednie, w którym wpływ na próbkę odbywa się poprzez oddziaływanie długo żyjących cząstek wytworzonych w plazmie przenoszonych wraz z strumieniem gazu. Prąd wyładowania płynie wyłącznie między elektrodami reaktora, przez co oddziaływanie

to charakteryzuje się małymi, a więc stosunkowo bezpiecznymi energiami, w związku z czym metodę określa się bardziej odpowiednią do leczenia *in vivo* niż w przypadku oddziaływania bezpośredniego.

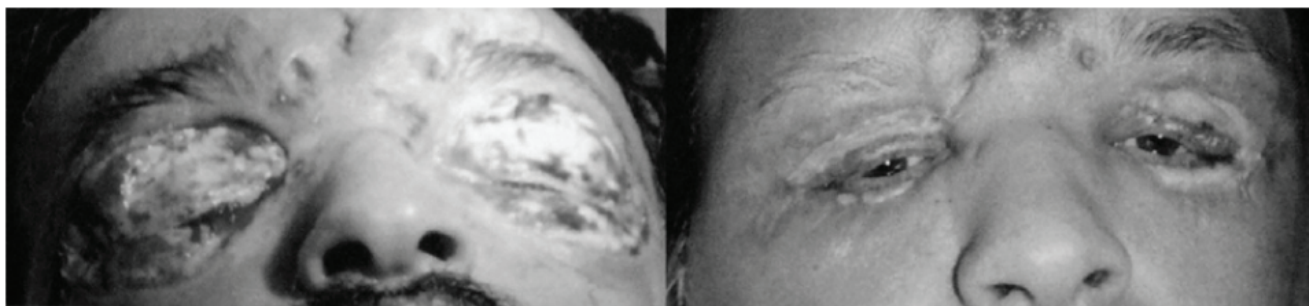
- Oddziaływanie mieszane, w którym prąd płynie głównie między elektrodami oraz w niewielkim stopniu poprzez badaną próbkę.

W literaturze spotkać można zastosowanie reaktorów typu *jet* zarówno w układach oddziaływania bezpośredniego, jak i pośredniego [1,9,11,13,15,18,20]. Przykładem pośredniego stosowania plazmy może być wyleczenie wrzodziejących ran powiek [15]. Na rycinie 2 przedstawiono stan pacjenta przed i po zastosowaniu terapii plazmowej, składającej się z 5-sekundowych sesji z zastosowaniem reaktora plazmowego z wyładowaniem barierowym (*dielectric barrier discharge* – DBD). Po sześciu dniach stosowania terapii wrzody zostały prawie całkowicie usunięte, a pacjent mógł zostać wypisany ze szpitala.

Przykładem bezpośredniego działania plazmy są badania przeprowadzone przez zespół Laure Brullé [20]. Na rycinie 3 przedstawiono zestawienie skuteczności niszczenia komórek rakowych myszy z użyciem chemioterapii (gemcytabina) oraz zastosowania plazmy generowanej w reaktorze *jet* z barierą dielektryczną (13 kV, 2 kHz, hel, 10 minut dziennie). Przeprowadzone badania wskazują na większą skuteczność oddziaływania plazmowego w stosunku do chemioterapii, zaś jako szczególnie obiecujące przedstawiane jest równoczesne zastosowanie obu metod.

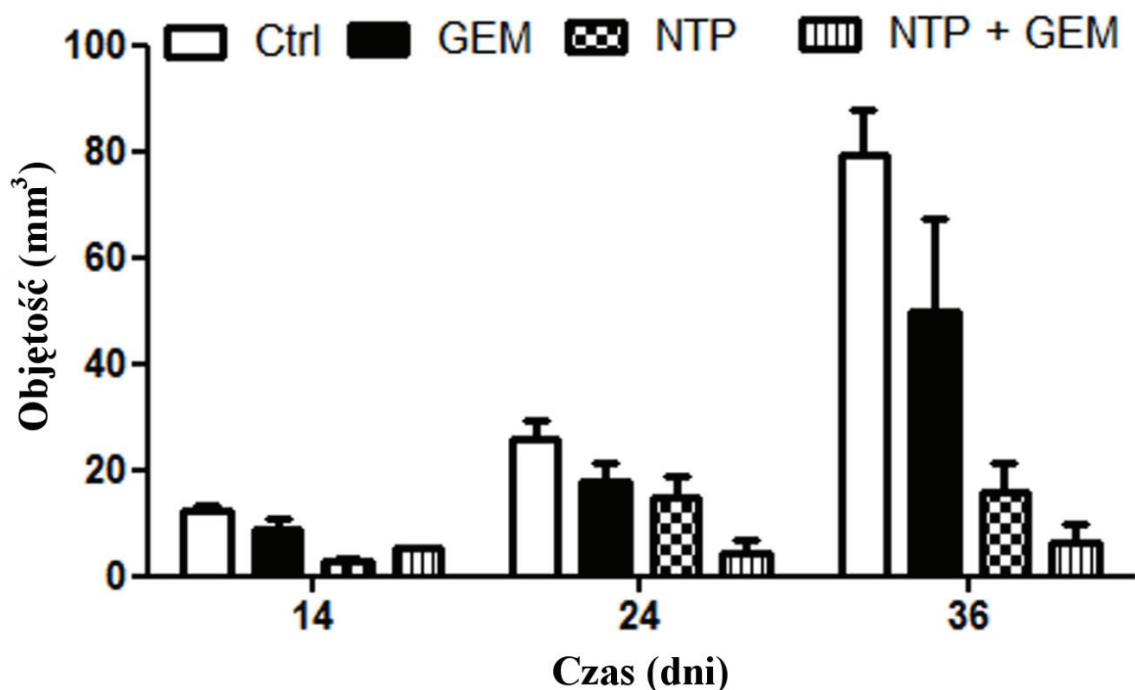
Ryc. 2.

Wrzodziejące rany powiek: efekt 6-dniowej terapii plazmowej przy użyciu reaktora typu jet (5 sek. dziennie) [15]



Ryc. 3.

Objętość komórek rakowych myszy w 14., 24. i 36. dniu od ich wprowadzenia. Ctrl – grupa kontrolna; GEM – efekt stosowania chemioterapii; NTP – efekt zastosowania plazmy niskotemperaturowej (reaktor jet z barierą dielektryczną, 13 kV, 2 kHz, hel, 10 minut dziennie) [20]



Oddziaływanie temperatur na struktury żywe

Zastosowanie plazmy w sposób kontrolowany oddziałującej na materię ożywioną może odnosić pozytywne skutki poprzez obecność określonych składowych w gazie procesowym, właściwości redukujące i wysokoenergetyczne elektrony. Należy jednak tak organizować procesy plazmochemiczne, ażeby odsunąć przedział stosowanych temperatur od wartości, przy których termiczne oddziaływania mogłyby destruktywnie wpłynąć na funkcjonowanie organizmów.

Rozpatrując wpływy, jakie może odnieść zbyt wysoka temperatura oraz ich skutki, szczególnie wrażliwymi będą białka, błony komórkowe oraz struktury enzymatyczne.

Istnienie białek jest zasadniczo zdeterminowane i uzależnione od ich przestrzennej trójwymiarowej struktury. Struktury te są utrzymywane poprzez różnorodne złożone wiązania wewnątrz aminokwasów oraz interakcje białek wraz z cząstkami wody.

Temperatura jako funkcja termodynamiczna ma tutaj znaczenie niewielkie, jednakże kiedy zinterpretuje się ją jako wartość średnią energii kinetycznej ruchu

postępowego cząstek, gdy temperatura wzrasta, wzrasta także energia kinetyczna układu, a atomy zaczynają przyjmować niekorzystne lokalizacje. W efekcie wiązania nadające białku charakterystyczny prawidłowy kształt pękają szybciej niż postępuje proces ich odnawiania. Dodatkowo powstają patologie w postaci połączeń nieprawidłowych. Zmiany w strukturach białkowych, a przez to utrata funkcji biologicznych (denaturacja), mogą prowadzić do śmierci znacznej liczby komórek. Niektóre z komórek, podczas gdy ekspozycja na wysoką temperaturę nie spowodowała kompletnej denaturacji białek, mają zdolność regeneracyjną i potrafią odbudowywać białka (renaturacja) [21,22].

Denaturacja nie jest jedyną przyczyną śmierci komórek, ponieważ istnieje cały szereg zaburzeń, przy których temperatura nie zbliżyła się jeszcze do punktu denaturacji. Głównie mówi się tu o zaburzeniu równowagi metabolicznej. Wielocząsteczkowe katalizatory obniżające energię aktywacji pewnych procesów chemicznych mają różne optima termiczne, mimo obecności w tej samej komórce. Jest to związane z ich wydajnością i współpracą z innymi enzymami w całym systemie przemian materii i energii.

Celowa lub ekstremalnie występująca implementacja nieprawidłowości termicznej w pracę kilku

enzymów skutkuje częściowym upośledzeniem pracy innych.

Błony biologiczne także wykazują podatność na degradację ze strony temperatur. Głównym problemem jest utrzymanie ich przepuszczalności i płynności, które mogą być zaburzone. Wzrost energii kinetycznej lipidów jako budulca błon prowadzi często do nieodwracalnych zmian. Niszczy to integralność błony oraz zmienia interakcje z zawieszonymi w niej białkami, od których uzależnione jest sprawne funkcjonowanie komórek. Nie jest łatwo określić temperaturę letalną dla wybranego organizmu, ponieważ jest ona zależna od czasu ekspozycji i podatności organizmu [21,22]. Przyczyną śmierci komórek może być oprócz przegrzania zaburzenie równowagi osmotycznej przez nadmierną utratę wody.

Poddając struktury biologiczne oddziaływaniu plazmy, należy zapewnić temperatury oddalone od temperatur denaturacyjnych, ale także przy znacznych czasach ekspozycji kontrolować ilość wody, jaka jest usuwana z komórek, ponieważ jej niedobór spowoduje nieprawidłową pracę, uruchomienie pewnych mechanizmów obronnych, a nawet śmierć komórek. Jednakże utrata wody jest bardzo niewielka przy niewielkim gradiencie temperatur.

Cel badań

Aby ocenić możliwości zastosowania plazmy do celów medycznych, niezbędne jest przeprowadzenie badań określających temperaturę gazu, który dociera do badanego obiektu poddanego obróbce plazmowej. Wielkość ta może zależeć od wielu parametrów, między innymi prędkości przepływu gazu, odległości od końca reaktora, mocy elektrycznej dostarczanej do układu czy składu gazu roboczego. Badania mają na celu określenie temperatury gazu w funkcji tych parametrów dla reaktora plazmowego typu *jet* z wyładowaniem barierowym, pracującym pod ciśnieniem atmosferycznym.

Stanowisko badawcze

W badaniach wykorzystano reaktor plazmowy typu *plasma-jet* z wyładowaniem barierowym (ryc. 1).

Średnica wewnętrzna reaktora wynosi 1,5 mm przy całkowitej średnicy dyszy wykonanej z dielektryka wynoszącej 200 mm. Do pomiaru temperatury gazu poddanego obróbce plazmowej wykorzystano sondę termoelektryczną typu K, współpracującą z multimetrem cyfrowym wyposażonym w elektroniczną kompensację wolnych końców. Pomiary wykonano dla odległości, w których nie zachodzi zjawisko przebicia wyładowania do sondy. W związku z tym zrezygnowano z dodatkowej izolacji elektrycznej termopary, która podnosiłaby bezwładność cieplną przyrządu. Przeprowadzono następujące serie pomiarów:

1. Dla różnych wartości przepływu gazu, w zakresie od 0,5 m³/godz. do 3,7 m³/godz.
2. Dla różnego składu gazów roboczych: czystego helu i ich mieszanin z tlenem.
3. Dla różnych odległości od końca reaktora, w zakresie od 3 do 4 cm.

Wszystkie badania przeprowadzono dla ciśnienia atmosferycznego w temperaturze pokojowej. W pomiarach zastosowano dwa różne typy zasilania:

- Wykorzystujący w swoim działaniu magazynowanie energii w rdzeniu magnetycznym, o napięciu 3,7 kV przy częstotliwości 19,6 kHz.
- Zbudowany na schemacie rezonansowej przetwornicy Mazilliego, o napięciu 5 kV przy częstotliwości 17,7 kHz.

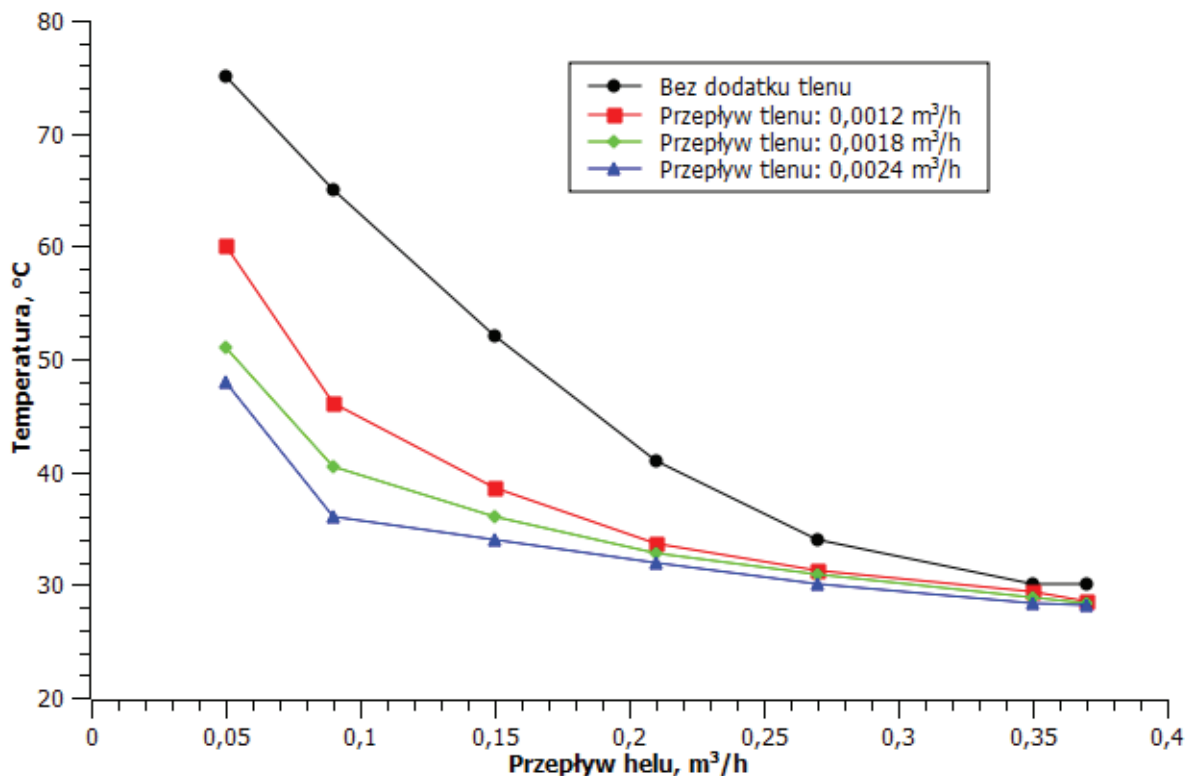
Wyniki i dyskusja

Podczas pomiarów dla stałej odległości od końca reaktora i różnych przepływów gazów roboczych, zaobserwowano wahania wskazań temperatury, które wynosiły nawet $\pm 7^{\circ}\text{C}$ dla przepływu 0,05 m³/godz. Wraz ze zwiększeniem przepływu strumień gazu stawał się bardziej jednorodny, a wahania temperatury były pomijalnie małe. Znaczącą rolę mogą odgrywać tutaj siły gazodynamiczne uzależnione od kształtu reaktora i ruchów konwekcyjnych.

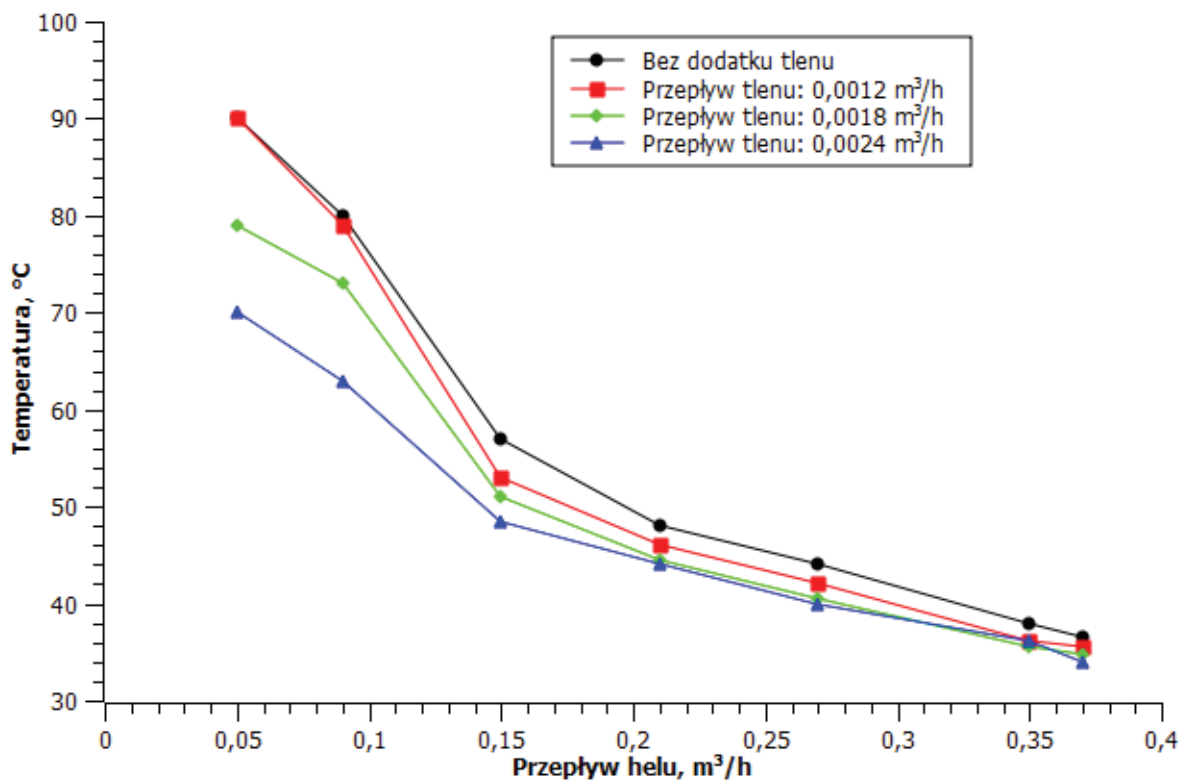
Dla obu układów zasilania można zaobserwować prostą zależność, w której temperatura maleje wraz ze wzrostem przepływu gazu (ryc. 4 i 5). Ze względu na zwiększanie masy poddanego obróbce gazu, przy jednoczesnym zachowaniu stałej mocy układu zasilającego, energia przypadająca na jednostkę

Ryc. 4.

Temperatura gazu dla różnych wartości przepływów gazów roboczych oraz stałych warunków zasilania i odległości od końca reaktora (reaktor 3,7 kV)

**Ryc. 5.**

Temperatura gazu dla różnych wartości przepływów gazów roboczych oraz stałych warunków zasilania i odległości od końca reaktora (reaktor 5 kV)



objętości jest coraz mniejsza, dzięki czemu strumień gazu osiąga coraz niższe wartości temperatury. Wartość przepływu ma także wpływ na kształt wyładowania: długość wyładowania dla reaktora 3,7 kV i zasilania czystym helem wahała się od 1 cm dla przepływów powyżej 0,35 m³/godz. do 2,5 cm dla przepływu 0,09 m³/godz.

W przypadku mieszanin helu z tlenem można zauważyć zależność, w której zwiększanie ilości tlenu w składzie gazu roboczego obniża temperaturę gazu docierającego do termopary. Może być to spowodowane zmianą jakości wyładowania, gdzie dla większych domieszek tlenu staje się ono mniejsze objętościowo. Zmniejszenie wymiarów wyładowania może mieć wpływ na ilość generowanych cząstek reaktywnych, jednak wprowadzenie tlenu może mieć z drugiej strony wpływ na zwiększenie ilości produkowanego ozonu, będącego jednym z głównych rodzajów rodników wykorzystywanych w sterylizacji plazmowej.

Porównując wyniki dla obu układów zasilania, można zaobserwować występowanie mniejszych

temperatur w układzie o niższym napięciu. Jest to bezpośrednio związane z ilością energii dostarczonej do układu, która jest zużywana także w procesie zwiększania temperatury gazu roboczego.

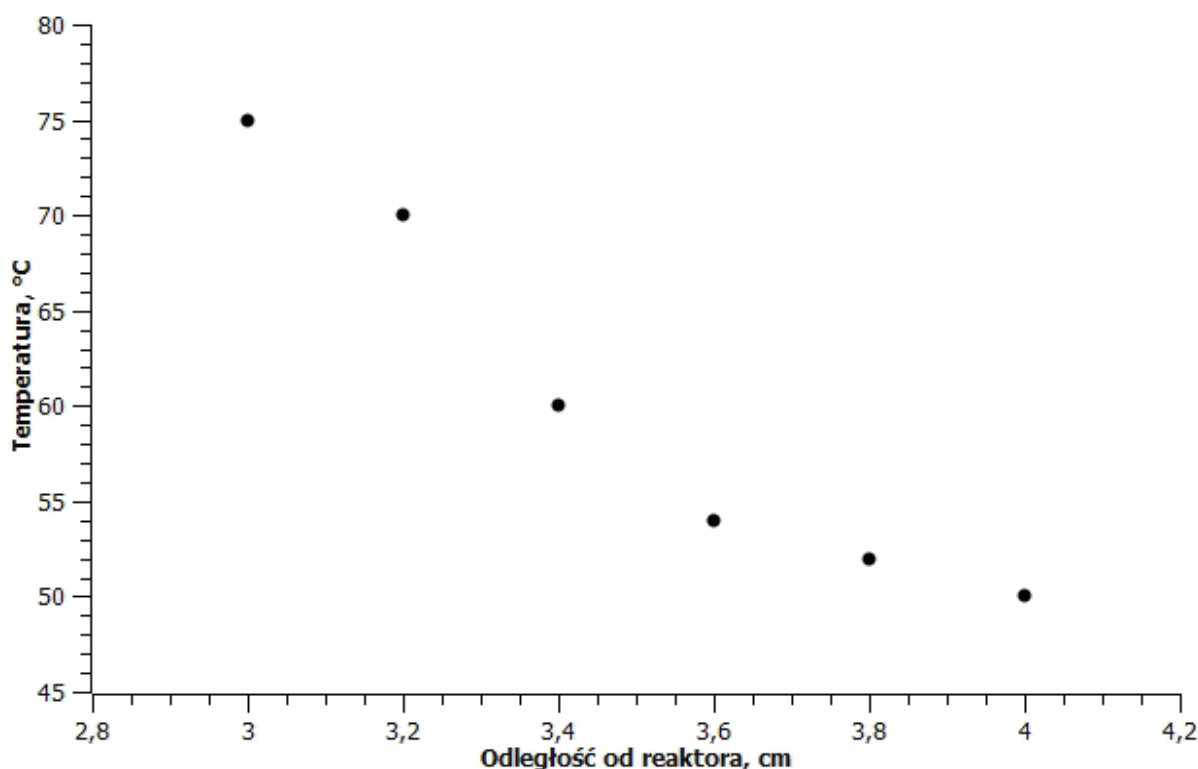
Przy stałym przepływie helu, który wynosi 0,05 m³/godz., gradient temperatur na długości 1 cm w odległościach od 3 do 4 cm od wylotu dyszy wynosi nawet do 25°C (ryc. 6). Wraz ze wzrostem odległości od reaktora temperatura gazu maleje, co jest związane z rozplywem gazu i zwiększeniem drogi, przy której zachodzi wymiana ciepła z otoczeniem.

Wnioski końcowe

Temperatura gazu poddanego obróbce plazmowej, będąca jednym z kluczowych aspektów określających możliwość zastosowania plazmy w medycynie, zależy od wielu parametrów pracy reaktora. Przeprowadzone badania wskazują na to, że główną rolę odgrywa wartość przepływu gazu roboczego, odległość od reaktora i moc układu zasilającego, w mniejszym zaś sam skład gazu roboczego. Parametry te mają jednak także wpływ na

Ryc. 6.

Temperatura gazu roboczego (hel 0,05 m³/godz.) dla różnych odległości od końca reaktora



kształt i jakość wyładowania decydujących o skuteczności działania obróbki plazmowej, konieczne jest więc takie ich dobranie, które zapewni najlepszą wydajność przy zachowaniu niskich, bezpiecznych dla badanych obiektów temperatur.

Piśmiennictwo

1. Stryczewska H, Diatczyk J, Pawłat J. Temperature Distribution in the Gliding Arc Discharge Chamber. *JAOTs* 2011; 2(14): 276-281.
2. Kolacinski Z, Szymanski L, Raniszewski G. LTE plasma reactors for materials conversion. *Eur Phys J Appl Phys* 2013; 61(02): 24314.
3. Babaeva N, Ning N, Graves D, Kushner M. Ion activation energy delivered to wounds by atmospheric pressure dielectric-barrier discharges: sputtering of lipid-like surfaces. *J Phys D: Appl Phys* 2012; 45: 115203(12pp).
4. Pawłat J: Atmospheric pressure plasma jet for sterilization of heat sensitive surfaces. *Przegląd Elektrotechniczny* 2012, 10b, 139-140.
5. Stryczewska H. Technologie plazmowe w energetyce i inżynierii środowiska, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2009.
6. Pawłat J. Atmospheric pressure plasma jet for decontamination purposes. *Eur Phys J Appl Phys* 2013; 61: 24323.
7. Ebihara K, Stryczewska H, Ikegami T, Mitsugi F, Pawłat J. On-site Ozone Treatment for Agricultural Soil and Related Applications. *Przegląd Elektrotechniczny* 2011; 7(87): 148-152.
8. Ebihara K, Stryczewska H, Mitsugi F, Ikegami T, Sakai T. i wsp. Recent development of ozone treatment for agricultural soil sterilization and biomedical prevention. *Przegląd Elektrotechniczny* 2012; 6(88): 92-94.
9. Stryczewska H, Pawłat J, Ebihara K. Non-thermal plasma aided soil decontamination. *JAOTs* 2013; 1(16): 23-30.
10. Ebihara K, Mitsugi F, Ikegami T, Nakamura N, Hashimoto Y i wsp. Ozone-mist spray sterilization for pest control in agricultural management. *European Physical Journal – Applied Physics* 2013; 61(02): 201324318.
11. Kovaľová Z, Tarabová K, Hensel K, Machala Z. Decontamination of Streptococci biofilms and Bacillus cereus spores on plastic surfaces with DC and pulsed corona discharges. *Eur Phys J Appl Phys* 2013; 61(2): 24306.
12. Mizeraczyk J, Dors M, Jasinski M, Hrycak B, Czyłkowski D. Atmospheric pressure low-power microwave microplasma source for deactivation of microorganisms. *Eur Phys J Appl Phys* 2013; 61(2): 20405.
13. Oehmigen K, Winter J, Hähnel M, Wilke C, Brandenburg R i wsp. Estimation of Possible Mechanisms of Escherichia coli Inactivation by Plasma Treated Sodium Chloride Solution. *Plasma Process Polym* 2011; 8: 904-913.
14. Dobrynin D. Physical and chemical mechanisms of direct and controllable plasma interaction with living objects. Thesis of Drexel University.
15. Fridman G, Friedman G, Gutsol A, Shekhter AB, Vasilets VN, Fridman A. *Applied Plasma Medicine. Plasma Processes and Polymers* 2008; 5(6): 503-533.
16. Weltmann KD i wsp. Atmospheric-pressure plasma sources: Prospective tools for plasma medicine. *Pure Appl Chem* 2010; 82(6): 1223-1237.
17. Heinlin J, Morfill G, Landthaler M, Stolz W, Isbary G i wsp. Plasma medicine: possible applications in dermatology. *J Dtsch Dermatol Ges* 2010; 8(12): 968-76.
18. Pawłat J, Samoń R, Stryczewska H, Diatczyk J, Giżewski T. RF-powered atmospheric pressure plasma jet for surface treatment. *European Physical Journal – Applied Physics* 2013; 61(2): 24322.
19. Pawłat J. Possibility of Atmospheric Pressure Plasma Jet Application in Decontamination of Heat Sensitive Surfaces, Transactions of the Materials Research Society of Japan 2013; 38(4): 625-628.
20. Brullé L, Vandamme M, Riès D, Martel E, Robert E i wsp. Effects of a Non Thermal Plasma Treatment Alone or in Combination with Gemcitabine in a MIA PaCa2-luc Orthotopic Pancreatic Carcinoma Model. *PLoS ONE* 2012; 7(12).
21. Schmidt-Nielsen K. *Fizjologia Zwierząt. Adaptacja do Środowiska*, PWN 1997.
22. Wharton DA. *2002 Life at the Limits, Organisms in extreme environments*, Cambridge University Press.