

Biodekontaminácia vody v atmosférických elektrických DC výbojoch

I. Jedlovský¹, Z. Machala²

¹ Katedra jadrovej fyziky a biofyziky

² Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Mlynská dolina, 84248 Bratislava, Slovenská republika

Korešpondencia: jedlovsky@fmph.uniba.sk

Abstrakt

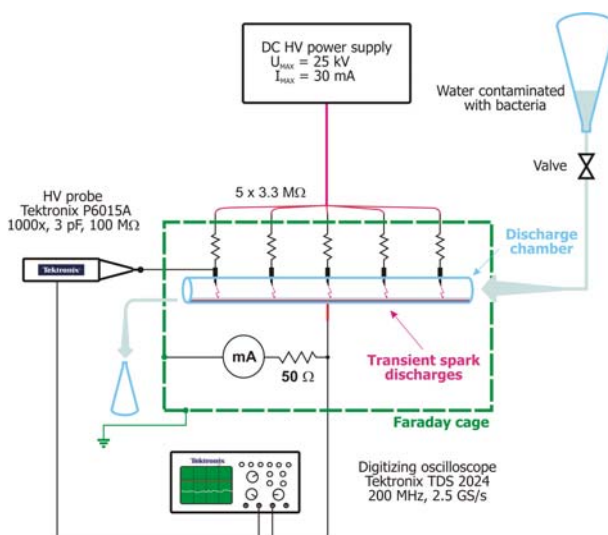
Biodekontaminácia pomocou troch režimov jednosmerných (DC) elektrických výbojov (streamerová koróna, prechodová iskra a bezpulzný tleci výboj) pri atmosférickom tlaku v konfigurácii hrot – rovina, bola testovaná na vybrané druhy baktérii vo vodnom roztoku prietochom režime. Mikrobicídny účinok bol najefektívnejší v režime prechodovej iskry s veľmi krátkym a silným pulzom. Optickou emisnou spektroskopiou sme indikovali, že dominantnú úlohu tu hrajú radikály a iné aktívne častice z pomedzi iných inaktivačných mechanizmov.

Úvod

Netermická plazma generovaná elektrickými výbojmi pri atmosférickom tlaku je v súčasnosti značným objektom výskumu pre jej účinné využitie v mnohých biologických, medicínskych a environmentálnych aplikáciách [1–4]. Vyšetrovali sme tri režimy DC výbojov pri atmosférickom tlaku a testovali ich letálne účinky na vybrané druhy baktérii vo vodnom roztoku. Identifikovali sme dominantné mechanizmy porovnávaním elektrických charakteristík výbojov a porovnávaním ich emisných spektrier [5].

Experiment

Experimentálne zariadenie pre skúmanie elektrických DC výbojov je na obr. 1. Biodekontamináciu v týchto výbojoch sme testovali prietochom režime. Na obr. 1 vidíme experimentálne zariadenie pre kontinuálny prietok dekontaminovaného roztoku. Päť paralelných výbojov horelo v priehľadnej trubicovej výbojke, kde vysokonapäťové elektródy tvorili injekčné ihly umiestnené oproti spoločnej nízkonapäťovej elektróde, ktorú tvoril medený pásik ponorený v pretekajúcom roztoku. Vzďialenosť medzi hrotmi a vodnou hladinou bola 4mm. Prietok roztoku a čas jeho opracovania vo výbojke bol rôzny.



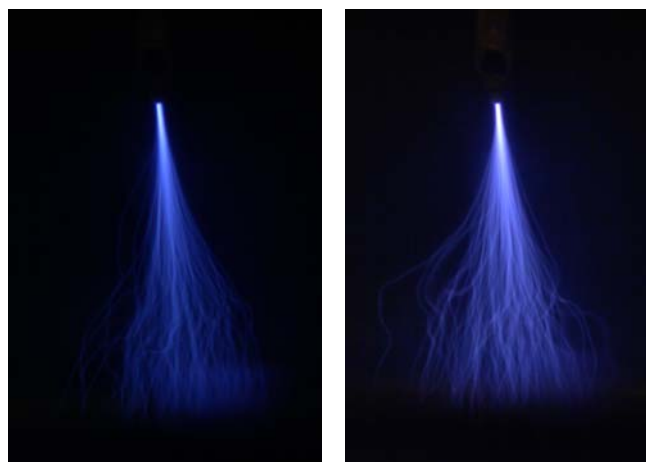
Obr. 1 Experimentálne zariadenie a trubicová výbojka pre prietochý režim

Napätie vo výboji bolo merané na každom hrote vysokonapäťovou sondou Tektronix P6015A. Prúd bol meraný buď miliampérmetrom ako stredný prúd, alebo ako osciloskopicky merané časovo závislé krivky merané na 50Ω a na 1Ω rezistore a Rogovského prúdovou sondou PEARSON 2877.

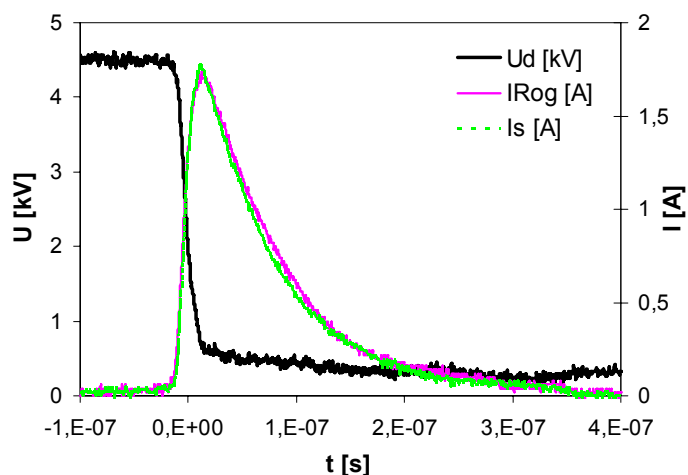
Napäťové a prúdové signály boli spracovávané digitálnym osciloskopom Tektronix TDS 2024 (200 MHz). Emisia svetla z výbojov bola detekovaná dvojkanalovým optickým emisným spektrometrom Ocean Optics SD2000 (200-1100 nm, rozlíšenie 0.6-1.2 nm).

Pracovali sme s DC výbojmi v troch režimoch a oboch polaritách: streamerová koróna (SC), prechodová iskra (TS) a tleci výboj (GD). Tieto výboje generovali nerovnovážnu plazmu s rôznymi chemickými a biologickými účinkami, ktoré mali rôzny efekt pri biodekontaminácii. Každý výboj generoval plazmu so špecifickými vlastnosťami a každý výboj bol skúmaný osobitne.

Experimentálne sme zistili, že najefektívnejší výboj bol v režime kladnej prechodovej iskry [6]. Oscilogram pulzného režimu +TS, s veľmi silnými a krátkymi (~ 100 ns) prúdovými pulzmi a frekvenciou okolo 0,5 – 8 kHz je na obr. 2-3. Počas týchto veľmi krátkych pulzov (daných malou vnútornou kapacitou výbojky C_{int}) je plazma silne nerovnovážna [7].



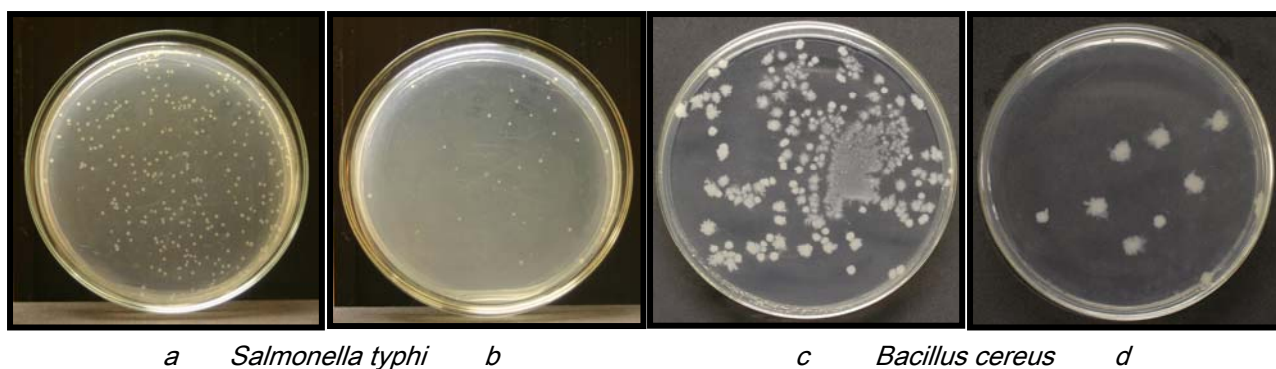
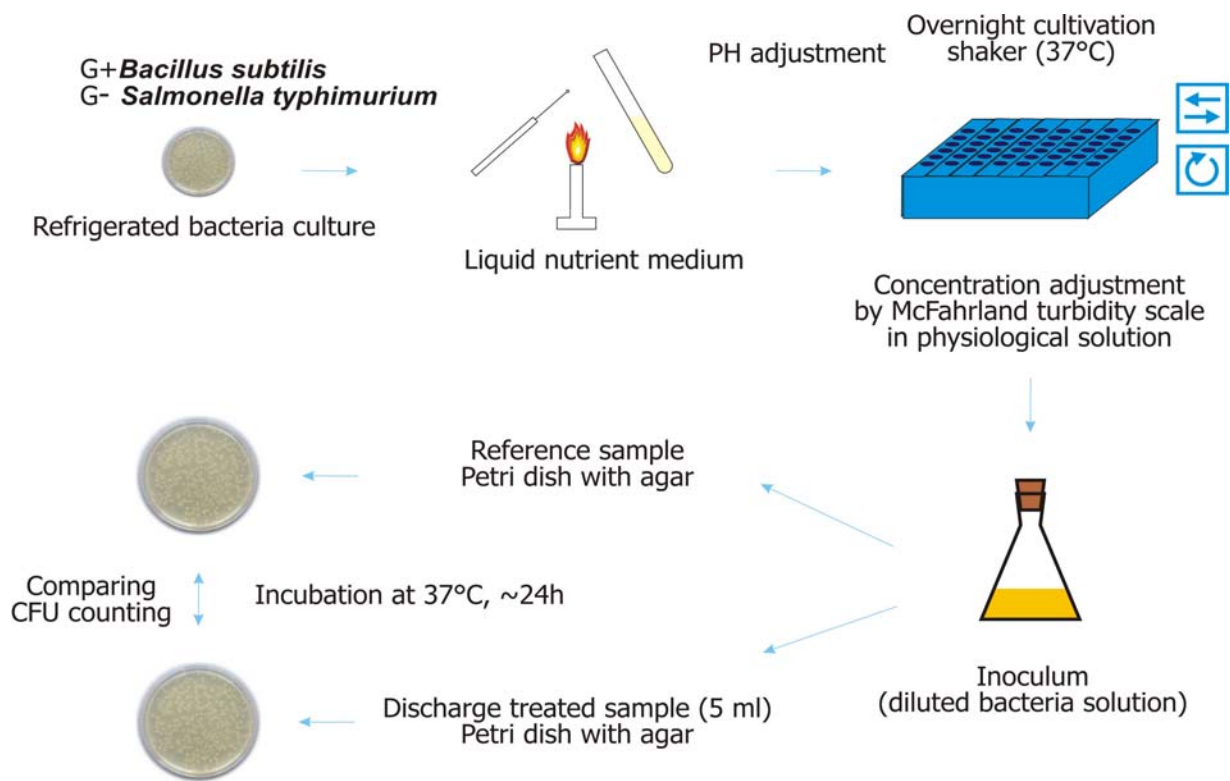
Obr. 2 Výboj v režime TS nad vodnou hladinou, vzdialenosť ~ 4 mm



Obr. 3 TS: typické napäťové (U_d) a prúdové charakteristiky prechodovej iskry (IRog - merané Rog. sondou, I_s – merané na 50Ω rezistore).

Biologické účinky atmosférických DC výbojov sme testovali vo vodnom roztoku vybraných druhov baktérií kultivovaných štandardnými mikrobiologickými metódami v Petriho miskách na živnom agare (obr. 4), ktoré boli potom štatisticky vyhodnocované. Testované boli :

- 1) *Salmonella typhimurium*, Gramm-negatívna (G-) baktéria (geneticky modifikovaný kmeň TA 98, bez patogénnych účinkov) normálne spôsobujúca týfusové ochorenia, jej inaktivácia je veľmi dôležitá z hľadiska dekontaminácie pitnej vody.
- 2) *Bacillus cereus*, Gramm-pozitívna (G+) baktéria, patrí do rovnakej skupiny ako *Bacillus anthracis* (prekurzor antraxu), ktorý v dnešnej dobe predstavuje jednu z najväčších hrozieb bioterorizmu.



Obr. 4 Schéma prípravy, úpravy bakteriálnej kultúry až po jej vyhodnotenie a kultivované baktérie na živnom agare v Petriho miskách. Referenčné (a,c) a exponované (b,d) vzorky

Biodekontaminácia *S. typhi* kladnou TS prebiehala vo výbojke s piatimi výbojmi a v prietochnom režime pre efektnejší výsledok oproti statickému režimu s jedným výbojom. Expozičný roztok s objemom 0,1 l tvorila voda alebo fyziologický roztok s pridanými baktériami a čas expozície bol rôzny (15-29 min) a tým aj jeho prietok (3-6 ml/min). Typické parametre výboja boli : stredný prúd 5 mA, napätie vo výboji $U_d = 7$ kV, $f = 8$ kHz. Výsledky sú uvedené v tabuľke 1. Účinnosť dekontaminácie sme dosiahli 99,25-100 %, čo je oveľa väčšia účinnosť oproti statickému režimu, aj keď zdržná doba roztoku v aktívnej zóne výboja bola krátka (10-20 s). Toto môže byť vplyvom väčšej objemovej hustoty vloženej energie, to znamená, že väčší objem roztoku bol vystavený priamej (direct) expozícii, ako to bolo pri statickom režime.

Dekontaminovanému roztoku (voda alebo fyziologický roztok) pri opracovaní mierne stúpla teplota (z 22 na 31 °C), značne elektrická vodivosť (z 0,52 na 0,8-1,2 mS/cm pre vodu a z 15,2 na 16,4 mS/cm pre fyziologický roztok) a kleslo pH (z 7,4 na 3). Stúpajúca teplota bola zanedbateľná vzhľadom na prežitie baktérií, ale efekt zvyšujúcej sa vodivosti a klesajúceho pH môže byť veľmi zaujímavý a v budúcnosti bude objektom ďalšieho výskumu.

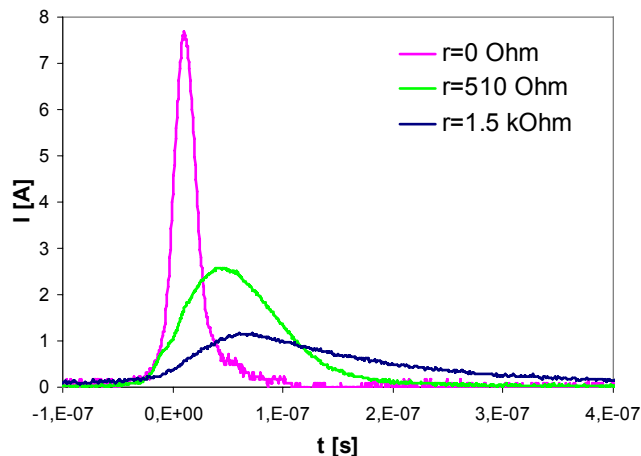
V režime TS sme podrobnejšie skúmali efekt tvaru prúdového pulzu. Amplitúda a dĺžka pulzu TS je daná vnútornou kapacitou výbojky ($C_{int} \sim 1-10$ pF), ku ktorej sa ešte pridáva vlastná kapacita VN kábla VN sondy. Tomuto efektu môžeme predísť zaradením malého rezistora r do série pred každý výboj a tým minimalizujeme kapacitu vybíjania v TS pulze.

Použili sme rezistory $r = 0$ (bez rezistora), 510 Ω a 1.5 k Ω a urobili sme korekcie v meraní napätia. Tvar pulzu sa výrazne menil s rôznou hodnotou zaradeného rezistora ako znázorňuje obr. 5. So zvyšujúcou sa hodnotou rezistora r klesala amplitúda pulzu, ale dĺžka pulzu sa predlžovala. Klesanie amplitúdy bolo spôsobené znižujúcou sa kapacitou, ktorá sa pridávala k C_{int} a dĺžka sa predlžovala s veľkosťou časovej konštanty. Stredný prúd bol približne konštantný.

Je zaujímavé, že testy biodekontaminácie s rôznou hodnotou rezistora r ukázali ako značne môže byť ovplyvnená účinnosť. Zistili sme, že najefektívnejšie sú TS pulzy, ktoré sú veľmi silné a krátke (~ 8 A, ~ 50 ns), ako je zrejmé z tabuľky 1. Takéto pulzy hovoria o silne nerovnovážnej plazme, generujúcej radikály a iné aktívne častice a nízkej energetickej strate pri ohreve plynu.

r [Ω]	Médium	Čas [min]	Poč. konc. [CFU/ ml]	Výsl. konc. [CFU/ ml]	Účinn osť [%]
0	voda	15	6650	20	99.70
0	voda	28	17300	115	99.34
0	fyz. rozt.	18	12450	0	99.99
0	fyz. rozt.	25	13300	100	99.25
510	voda	16.5	34700	4900	85.88
510	fyz. rozt.	14.5	25050	12450	50.30
1500	voda	27.5	29800	7900	73.49
1500	fyz. rozt.	28	12750	5250	58.82

Tab. 1 Biodekontaminácia *S. typhi* v prietochom režime vo výbojke s piatimi výbojmi



Obr. 5 Efekt rôznej hodnoty rezistora r na priebeh prúdového signálu

Záver

Skúmali sme biodekontamináciu vody s vybranými druhmi baktérií (*S. typhi* a *B. cereus*) s použitím troch režimov jednosmerných elektrických výbojov horiacich pri atmosférickom tlaku v konfigurácii hrot-rovina s jednou elektródou ponorenou vo vode : streamerová koróna, prechodová iskra a tleci výboj, ktoré generovali nerovnovážnu plazmu s rôznymi vlastnosťami. Pracovali sme s výbojkou s piatimi výbojmi v prietochom režime a zamerali sme sa na režim kladnej prechodovej iskry, ktorý dosahoval vysoké

účinnosti, ktoré boli dosiahnuté pri krátkych expozičných časoch vplyvom silných a krátkotrvajúcich prúdových pulzov. Testované baktérie sme kultivovali štandardnými metódami a štatisticky vyhodnocovali. V budúcnosti by sme sa chceli zamerať aj na biodekontamináciu spór, biofilmov a povrchov. Namiesto mikrobiologických testov ako diagnostiku viability baktérií plánujeme použiť fluorescenčnú spektroskopiu.

PodĎakovanie

Táto práca bola riešená s finančnou podporou MŠ SR NATO981194/07, VEGA 1/2013/05, NATO EAP.RIG 981194 a APVT-20-032404 grantov.

Literatúra

[1] M. Laroussi, IEEE Trans. Plasma Sci. 30 (2002) 1409.

[2] E. Stoffels, I. E. Kieft, R. E. J. Sladek, L. J. M. van den Bedem, E. P. van der Laan, M. Steinbuch: Plasma Sources Sci. Technol. 15 (2006) S169.

[3] H.-H. Kim, Plasma Process. Polym. 1 (2004) 91.

[4] P. Lukes and B. R. Locke: J. Phys. D: Appl. Phys. 38 (2005) 4074.

[5] Machala Z., Janda M., Hensel K., Jedlovský I., Leštinská L., Foltin V., Martišovitš V., Morvová M.: *Emission spectroscopy of atmospheric pressure plasmas for bio-medical and environmental applications*, J. Molec. Spectrosc. 243, 230-237 (2007)

[6] Z. Machala, I. Jedlovský: *“Water Bio-decontamination in DC Discharges”*, 28th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, July 15-20, 2007, Prague, Czech Republic

[7] Z. Machala, I. Jedlovský, K. Hensel: *“Bio-decontamination by DC Discharges in Atmospheric Air: Identification on Mechanisms by Emission Spectroscopy,”* 18th International Symposium on Plasma Chemistry, Kyoto, Japan, August, 2007