



Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-17-0382**

Interakcia studenej plazmy a vody, účinky plazmou aktivovanej vody na biologické systémy a ich využitie v medicíne a poľnohospodárstve

Zodpovedný riešiteľ **doc. RNDr. Zdenko Machala, PhD.**

Príjemca **Univerzita Komenského v Bratislave**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Univerzita Komenského v Bratislave (Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Prírodovedecká fakulta, Lekárska fakulta)

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

VUT Brno, Česko
Masarykova Univerzita Brno, Česko
Queens University Belfast, UK
Univerzita Padova, Taliansko
Univerzita Bologna, Taliansko
Technická Univerzita Lublin, Poľsko
Ruhr University Bochum, Nemecko
University Freiburg, Nemecko
INP Greifswald, Nemecko
Ústav fyziky plazmatu, AV ČR, Česko

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

-

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

Publikácie v karentovaných časopisoch

1. Z. Machala, B. Tarabová, D. Sersenová, M. Janda, K. Hensel: Plasma activated water chemical and antibacterial effects: Correlation with gaseous and aqueous reactive oxygen and nitrogen species, plasma sources and air flow conditions, J. Phys. D: Appl. Phys. 52, 034002 (2019), highly cited in WoS
2. K. Kučerová, M. Henselová, Ľ. Slováková, K. Hensel: Effects of Plasma Activated Water on Wheat: Germination, Growth Parameters, Photosynthetic Pigments, Soluble Protein Content and Antioxidant Enzymes Activity, Plasma Process. Polym. 16 (3), e1800131 (2019)
3. B. Tarabová, P. Lukeš, M.U. Hammer, H. Jablonowski, T. von Woedtke, S. Reuter, Z. Machala: Fluorescent measurement of peroxytrite/peroxytrous acid in cold air plasma treated aqueous solutions, Phys. Chem. Chem. Phys. 21, 8883-8896 (2019)
4. J. Pawlat, P. Terebun, M. Kwiatkowski, B. Tarabová, Z. Kovaľová, K. Kučerová, Z.

- Machala, M. Janda, K. Hensel: Evaluation of oxidative species in gaseous and liquid phase generated by mini-gliding arc discharge, *Plasma Chem. Plasma Process.* 39, 627-643 (2019)
5. A. Jaworek, A. M. Gañán-Calvo, Z. Machala: Low temperature plasmas and electrosprays, topical review, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 52, 233001 (2019)
6. A. Khlyustova, C. Labay, Z. Machala, M. P. Ginebra, C. Canal: Important parameters in plasma jets for the production of RONS in liquids for plasma medicine: A brief review., *Frontiers of Chem. Sci. Eng.* 13 (2), 238-252 (2019)
7. G. Bauer, D. Sersenová, D. B. Graves, Z. Machala: Cold Atmospheric Plasma and Plasma-Activated Medium Trigger RONS-Based Tumor Cell Apoptosis, *Sci. Rep.* 9, 14210 (2019)
8. G. Bauer, D. Sersenová, D. B. Graves, Z. Machala: Dynamics of Singlet Oxygen-Triggered, RONS-Based Apoptosis Induction after Treatment of Tumor Cells with Cold Atmospheric Plasma, *Sci. Reports* 9 (13931), 1-34 (2019)
9. Kučerová K., Machala Z., Hensel K.: Transient Spark Discharge Generated in Various N₂/O₂ Gas Mixtures: Reactive Species in the Gas and Water and Their Antibacterial Effects, *Plasma Chem. Plasma Process.* 40, 749–773 (2020).
10. Ndiffo Yemeli G.B., Švubová R., Kostolani D., Kyzek S., Machala Z.: The effect of water activated by nonthermal air plasma on the growth of farm plants: Case of maize and barley, *Plasma Process Polym.* 18 (1), 2000205 (2020).
11. Cimerman R., Čibíková M., Satrapinskyy L., Hensel K.: The Effect of Packing Material Properties on Tars Removal by Plasma Catalysis, *Catalysts* 10 (12), 1476 (2020).
12. Polčic P. and Mentel M.: Reconstituting the Mammalian Apoptotic Switch in Yeast, *Genes* 11, 145 (2020).
13. Tarabová B., Tampieri F., Maran E., Marotta E., Ostrihoňová A., Krewing M., Machala Z.: Chemical and Antimicrobial Effects of Air Non-Thermal Plasma Processing of Fresh Apple Juice with Focus on Safety Aspects, *Foods* 10 (9), 2055 (2021)
14. D. Kostoláni, Ndiffo Yemeli G. B., Švubová R., Kyzek S., Machala Z.: Physiological Responses of Young Pea and Barley Seedlings to Plasma-Activated Water, *Plants* 10 (8), 1750 (2021).
15. D. Sersenová, Machala Z., Repiská V., Gbelcová H.: Selective Apoptotic Effect of Plasma Activated Liquids on Human Cancer Cell Lines, *Molecules* 26 (14), 4254 (2021).
16. Janda M., Hassan M. E., Martišovitéš V., Hensel K., Kwiatkowski M., Terebun P. Pawlat J., Machala Z.: In-situ monitoring of electrosprayed water microdroplets using laser and LED light attenuation technique: Comparison with ultra-high-speed camera imaging, *J. Appl. Phys.* 129 (18), 183305, 15 pp (2021)
17. M. Janda, Hensel K., Tóth P., Hassan M. E., Machala Z.: The role of HNO₂ in the generation of plasma activated water by air transient spark discharge, *Appl. Sci.* 11 (15), 7053, 20 pp (2021).
18. P. Polčic and Z. Machala: Effects of Non-Thermal Plasma on Yeast *Saccharomyces cerevisiae*, *Int. J. Mol. Sci.* 22 (5), 2247 (2021)
19. M.E. Hassan, M. Janda, Z. Machala: Transport of Gaseous Hydrogen Peroxide and Ozone into Bulk Water vs. Electrosprayed Aerosol. *Water* 13, 182 (2021).
20. Ndiffo Yemeli G.B., Švubová R., Kostolani D., Kyzek S., Machala Z.: The effect of water activated by nonthermal air plasma on the growth of farm plants: Case of maize and barley, *Plasma Process Polym.* 18 (1), 2000205 (2021).
21. Kučerová K., Henselová M., Slováková L., Bačovčinová M., Hensel K.: Effect of plasma activated water, hydrogen peroxide and nitrates on lettuce growth and its physiological parameters, *Appl. Sci.* 11 (5), 1985, 13 pp (2021).
22. Lukačová Z., Švubová R. Selveková P., Hensel K.: The effect of plasma activated water on maize (*Zea mays* L.) under arsenic stress, *Plants* 10 (9), 1899, 20 pp (2021).
23. P. Cacciani, P. Čermák, S. Béguier, A. Campargue : The absorption spectrum of ammonia between 5650 and 6350 cm⁻¹; *J. Quantitative Spectrosc. Radiative Transfer* 258 (2021) 107334
24. Cimerman R., Hensel K.: Generation of honeycomb discharge assisted by micro-hollow surface dielectric barrier discharge, *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol.* 15 (1), e01003, 13 pp (2021).
25. Ndiffo Yemeli G.B., Janda M., Machala Z.: Non-thermal Plasma as a Priming Tool to Improve the Yield of Pea in Outdoor Conditions, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*

42 (69), 1143–1168 (2022)

26. Menthéour R., Machala Z.: Coupled Antibacterial Effects of Plasma-Activated Water and Pulsed Electric Field, *Frontiers in Physics* 10 (895813), 1 (2022)

27. Pastorek M., Suchoňová M., Konečná B., Pásztor S., Petrus J., Ivašková N., Celec P., Gardlík R., Machala Z., Tóthová Ľ.: The Effect of Air Plasma Activated Liquid on Uropathogenic Bacteria, *Plasma Chem. Plasma Process.*, 42, 561–574 (2022) (2022)

28. Cimerman R., Maťaš E., Sárený M., Hensel K. : Electrical and optical characterization of multi-hollow surface dielectric barrier discharge in configuration with the air-exposed electrode, *Phys. Plasmas* 29 (11), 113510, 16 pp (2022)

29. D. Jakubčín, A. Lavrikova, K. Hensel: Effects of cold plasma generated by transient spark discharge on proteins and amino acids in water solutions, *Plasma Process. Polym.*, zaslane na recenziiu 11/2022

30. M. Janda, K. Hensel, Z. Machala, T. A. Field: The influence of electric circuit parameters on NOx generation by transient spark discharge, *Plasma Source Sci. Technol.*, zaslane na recenziiu 11/2022

31. T. A. Field, C. Harkin, L. Asimakoulas, M. Janda, K. Hensel, Z. Machala: Towards plasma control with a new self-pulsing driving circuit, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, zaslane na recenziiu 11/2022

Pozvané prednášky na (medzinárodných) konferenciách

1. Machala Z.: Elektrické výboje s vodou a ich biomedicínske aplikácie, 23. Konferencia Slovenských Fyzikov, Smolenice, p. 10, 5-8.9. (2018), pozvaná prednáška

2. Machala Z.: Air Discharges and Plasma Activated Water for Applications in Bio-decontamination, Agriculture and Food Processing, Material Research Society Fall Meeting and Exhibit, Symposium BM06, Boston, USA, Nov 25-30, BM06.08.01 (2018), pozvaná prednáška

3. Janda M., Hensel K., Machala Z.: Chemical kinetic model of transient spark: Spark phase and NOx formation, 22nd Symposium on Applications of Plasma Processes and 11th EU-Japan Joint Symposium on Plasma Processing SAPP XXII, Štrbské Pleso (Slovakia), January 18-24, p. 25-32 (2019), pozvaná prednáška

4. Machala Z., Tarabová B., Janda M., Hensel K.: Plasma activated water: effects for biomedical and agriculture/food applications and challenges of RONS detection, 8th Central European Symposium on Plasma Chemistry CESPC, Gozd Martuljek (Slovenia), May 26-30, K1 (2019), pozvaná prednáška

5. Machala Z., Tarabová B., Vukušić T., Janda M., Hensel K.: Plasma activated water chemical and antibacterial effects correlate with gaseous and aqueous RONS, plasma source, air and water flow conditions, 24th International Symposium on Plasma Chemistry ISPC, Napoli (Italy), June 9-14, I-5 (2019), pozvaná prednáška

6. Janda M., Hensel K., Machala Z.: Chemical kinetic modelling of NOx formation in Transient Spark discharge, 34th International Conference on Phenomena in Ionized Gases XXXIV ICPIG and 10th International Conference on Reactive Plasmas ICRP-10, Sapporo (Japan), July 14-19, TL-03 (2019), pozvaná prednáška

7. Machala Z., Mentheour R., Sersenová D., Tarabová B., Ndiffo Yemeli G.B., Vukušić T., Pásztor S., Gbelcová H., Konečná B., Tóthová Ľ., Janda M., Hensel K.: Tuning the chemistry of air plasma-water interaction and biomedical/agriculture applications of plasma activated water, *Plasma Science & Entrepreneurship* 2019, Luxembourg (LU), Nov 14-15, p. 15 (2019), pozvaná prednáška

8. Machala Z.: Chemistry of air plasma-water interaction and biomedical/agriculture applications of plasma activated water, ICAPST-20, First International conference on advances in plasma science and technology, Sri Shakthi Institute of Engineering and Technology Coimbatore, India, 12-14 February (2020), pozvaná prednáška

9. Janda M., Hensel K., Machala Z.: Transient spark driving circuit optimization for enhanced generation of nitrogen oxides, 30th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases SPIG 2020, Šabac (Serbia), August 24-28 (2020), pozvaná prednáška

10. Machala Z., Ndiffo Yemeli G. B., Kyzek S., Švubová R., Kucerova K., Hensel K.: PLASMA ACTIVATED WATER AND AMMONIA SOLUTIONS TESTED AS FERTILIZERS , IWOPA – 3rd INTERNATIONAL WORKSHOP ON PLASMA AGRICULTURE, Greifswald, Germany, March 1-3, (2021) pozvaná prednáška.

11. Machala Z.: Air plasma-water interactions for biomedical/agriculture applications of

plasma activated water, Second International Conference on Advances in Plasma Science and Technology ICAPST, Coimbatore, India, online, May 27-29, p. INV-23 (2021) pozvaná prednáška.

12. Z. Machala, V. Martišovits, D. Sersenová, H. Gbelcová, V. Repiská, M. Suchoňová, B. Konečná, L. Tóthová, A.C. Ricchiuto, G. Neretti, D.B. Graves, G. Bauer: Corona plasma pen using streamer discharge in air induces disinfection and selective anticancer effects both directly and by pla, 8th International Conference on Plasma Medicine ICPM-8,, Incheon (South Korea) - Virtual, , August 3-6, p. WeA4-1 (2021) pozvaná prednáška.

13. Tarabová B., Hammer M. U., Jablonowski H., von Woedtke T., Reuter S., Janda M., Hensel K., Machala Z., Lukeš P.: Selectivity of the detection methods of reactive oxygen and nitrogen species in plasma treated aqueous solutions, 8th International Conference on Plasma Medicine ICPM-8, Incheon (South Korea) - Virtual, August 3-6, WeB4-1 (2021) pozvaná prednáška.

14. Gardlik R., Suchonova M., Tothova L., Konecna B., Pastorek M., Gromova B., Pasztor S., Budis J., Radvanszky J., Machala Z.: The use of plasma activated water in mouse model of colitis, 8th International Conference on Plasma Medicine ICPM-8,, Incheon (South Korea) - Virtual, August 3-6, TuB2-1 (2021) pozvaná prednáška.

15. Machala Z., Ndiffo Yemeli G. B., Kyzek S., Kostolani D., Švubová R., Mentheour R., Hassan M.E., Janda M., Hensel K.: Reactive oxygen and nitrogen species in plasma activated water: tuning their concentrations and functions in plant growth promotion, 19th INT. CONF. PLASMA PHYSICS AND APPLICATIONS & 1st WORKSHOP ON PLASMA APPLICATIONS FOR SMART AND SUSTAINABLE AGRICULTURE, Magurele, Bucharest ROMANIA, Aug 31 - Sep 3, (2021) pozvaná prednáška.

16. Janda M., Hassan M. E., Ndiffo Yemeli G. B., Mentheour R., Pásztor S., Szarázová K., Hensel K., Machala Z.: Pulsed plasma discharges in air as an efficient strategy of nitrogen fixation and (H)NO_x transport into water, Solvay Workshop on "Plasma Technology and Other Green Methods for Nitrogen Fixation", Brussels (Belgium), November 15-17, p. 14 (2021) pozvaná prednáška.

17. Machala Z., Cimerman R., Janda M., Vazquez T., Hensel K.: UV-vis a FTIR spektroskopie ako diagnostika procesov aplikácií studenej plazmy pre čistenie ovzdušia, dekontamináciu vody a v bi, Shimadzu Deň užívateľov 2022, Oščadnica (Slovakia), June 16-17, (2022), pozvaná prednáška

18. Janda M., Hassan M.E., Mentheour R., Jankovič R., Hensel K., Machala Z.: Plasma-liquid Interactions: Transport of Reactive Species and Effects of Plasma-Activated Water, Gordon Research Conference: Plasma Processing Science, Andover, NH, USA, July 24-29 (2022) pozvaná prednáška

19. Janda M., Hensel K., Tóth P., Pareek P., Hassan M. E., Machala Z.: The role of HNO₂ in the generation of plasma activated water by transient spark discharge, 9th International Conference on Plasma Medicine ICPM-9, Utrecht (The Netherlands), June 27-July 1, p. 2022 (2022), pozvaná prednáška

20. Hensel K., Cimerman R.: Removal of tars by non-thermal plasma and hybrid catalysis-plasma systems, 12th International Symposium on Non-thermal Plasma Technology for Pollution Control and Sustainable Energy ISNTP-12, Sapporo (Japan), August 28 - September 2 (2022), pozvaná prednáška

Uplatnenie výsledkov projektu

Projekt bol zameraný na základný výskum, hoci s významným aplikačným potenciálom. Po ďalšej optimalizácii môžu výsledky projektu byť aplikované v medicínskych, potravinárskych a poľnohospodárskych technológiách (konkrétne na liečbu infekcií močových ciest, hojenie rán, potenciálnu liečbu rakovinových nádorov, studenú pasterizáciu ovocných štiav, ako aj pre zlepšenie klíčenia a rastu rastlín a ich poľnohospodárskej produkcie), i v ďalších oblastiach vedy a výskumu.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

Základným cieľom tohto multidisciplinárneho projektu bolo skúmať vzájomnú interakciu elektrických výbojov generujúcich studenú plazmu a vody (resp. vodných roztokov), pri ktorej vzniká tzv. plazmou aktivovaná voda (PAV). PAV má viaceré možnosti využitia v biológii a medicíne, pri konzervácii potravín a v poľnohospodárstve. Vyšetrovali sme viaceré

zdroje studenej plazmy – elektrické výboje a prispôbovali ich pre fungovanie v kontakte s vodou. Testovali sme nové a vylepšovali etablované metódy in-situ diagnostiky rozhrania plazma-voda, v aerosóloch i „bulk“ kvapaline. Študovali sme tvorbu, životnosť a uskladnenie PAV a analyzovali jej chemické zloženie v závislosti od rôznych experimentálnych parametrov a podmienok uskladnenia. Skúmali sme interakcie plazmy s vodou a účinkov PAV na rôzne biologické systémy (od biomolekúl, cez organické molekuly, baktérie, kvasinky, až po ľudské rakovinové a nerakovinové bunky) pre hlbšie pochopenie ich základných mechanizmov. Na základe čiastočného pochopenia mechanizmov interakcie plazmy s vodou a vybranými biologickými systémami sme testovali použitie PAV s rôznym zložením pre viaceré biomedicínske, potravinárske a poľnohospodárske aplikácie, konkrétne na liečbu kolitídy, infekcií močových ciest, hojenie rán, potenciálnu liečbu rakovinových nádorov, studenú pasterizáciu ovocných štiav, ako aj pre zlepšenie klíčenia a rastu rastlín a ich poľnohospodárskej produkcie. Tento základný cieľ sme dosiahli postupným riešením čiastkových cieľov, ktoré boli úspešne splnené. Výstupy projektu budú mať prínos v medicínskych, potravinárskych i poľnohospodárskych aplikáciách plazmy a PAV a prispievajú k rozšíreniu plazmových technológií aj do ďalších oblastí vedy a výskumu.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

The basic objective of this multidisciplinary project was to investigate the mutual interaction of electric discharges generating cold plasma and water (or aqueous solutions), where the so-called plasma activated water (PAW) is generated. PAW has several possibilities of use in biology and medicine, in food preservation and in agriculture. We investigated several sources of cold plasma - electrical discharges - and adapted them to operate in contact with water. We tested new and improved established methods of in-situ diagnostics of the plasma-water interface, in aerosols and bulk liquid. We studied the formation, lifetime and storage of PAW and analyzed its chemical composition depending on various experimental parameters and storage conditions. We investigated the interaction of plasma with water and the effects of PAW on various biological systems (from biomolecules, through organic molecules, bacteria, yeast, to human cancer and non-cancer cells) for a deeper understanding of their basic mechanisms. Based on a partial understanding of the mechanisms of plasma interaction with water and selected biological systems, we tested the use of PAW with different compositions for several biomedical, food and agricultural applications, namely for the treatment of colitis, urinary tract infections, wound healing, potential treatment of cancerous tumors, cold pasteurization of fruit juices, as well as for improving the germination and growth of plants and their agricultural production. We achieved this basic objective by gradually addressing the sub-goals, which were successfully met. The outputs of the project will be beneficial in medical, food and agricultural applications of plasma and PAW, and will contribute to the expansion of plasma technologies in other areas of science and research.