Швейгерт Ирина Вячеславовна, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, лаб. 7

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

ischweig@itam.nsc.ru

Аннотация

Выбор эффективных и биологически безопасных режимов работы холодной атмосферной плазменной струи (ХПС) имеет решающее значение для разработки противораковой терапии на основе ХПС. В эксперименте и численном моделировании, изменяя длительность импульса положительного импульсного напряжения, были найдены оптимальные режимы ХПС с регулярным распространением стримеров и максимальным током разряда при температуре $T < 42$°C. В этих режимах ХПС существенно подавляет жизнеспособность раковых клеток. Показано, что добавление наночастиц золота увеличивает цитотоксический эффект плазменной струи и снижает жизнеспособность эпителиоподобной аденокарциномы легкого NCI-H23, аденокарциномы легкого A549, аденокарциномы молочной железы BrCCh4e-134 и клеток увеальной меланомы uMel1. Модифицированные полиэтиленгликолем наночастицы золота с флуоресцентными метками использовались для визуализации поглощения наночастиц клетками. Продемонстрировано, что ХПС стимулирует проникновение наночастиц в клетки, когда их добавляли в среду с клетками непосредственно перед воздействием ХПС или сразу после, что свидетельствует о кратковременном увеличении проницаемости мембраны клеток.

Отчёт о проделанной работе

ТЕМА РАБОТЫ. УСИЛЕНИЕ ПРОТИВОРАКОВОГО ЭФФЕКТА ПРИ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКЕ КЛЕТОК СТРУЕЙ ХОЛОДНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ И НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА

2. Состав коллектива:

Руководитель: Швейгерт Ирина Вячеславовна, внс ИТПМ СО РАН, д.ф.–м.н., трудовой договор

Ответственный исполнитель: Закревский Дмитрий Эдуардович, внс ИФП СО РАН, д.ф.–м.н., трудовой договор

Ответственный исполнитель: Коваль Ольга Александровна, д.б.н., внс, ИХБФМ СО РАН, трудовой договор

Гугин Павел Павлович, 39 лет, нс ИФП СО РАН, к.ф.–м.н., трудовой договор

Милахина Елена Васильевна, 28 лет, аспирант НГТУ, инженер ИФП СО РАН, трудовой договор

Бирюков Михаил Михайлович, 27 лет, аспирант НГУ, ИХБФМ СО РАН трудовой договор

Крячкова Надежда Вадимовна, 25 года, студентка НГУ, 3 год магистратуры, ИХБФМ СО РАН трудовой договор

Полякова Алина Александровна, 22 год, студентка НГУ, ИХБФМ СО РАН трудовой договор

3. Финансовая поддержка. гранта Российского научного фонда РНФ № 22–49–08003 (https://rscf.ru/project/22–49–08003/). Руководитель Швейгерт И.В.

4. Научное содержание работы:

Целью данной работы было определение оптимальных режимов генерации холодной плазменной струи и изучение эффектов комбинированного воздействия холодной плазменной струи и наночастиц золота на опухолевые клетки, а также исследование динамики проникновения наночастиц в клетки.

В настоящее время низкотемпературная плазма атмосферного давления активно применяется в различных медицинских приложениях, в частности, для подавления роста онкологических образований. Несмотря на различия в конструкциях источников плазмы и их эксплуатационных характеристик, были получены многообещающие результаты в доклинических исследованиях на различных моделях раковых образований и в клинических испытаниях с пациентами.

Численное моделирование зажигания разряда и динамики распространения стримеров для условий эксперимента проводилось в рамках гидродинамической модели с использованием авторского кода 2DPlasmaNovH. В численных расчетах распространение стримеров и ток вблизи мишени отслеживается в течение десятки циклов напряжения. Изменение длительности импульсов напряжения τ от 5 до 16 мкс позволило найти оптимальные моды генерации плазменной струи с регулярное распространение стримеров и максимально допустимую амплитуду тока при низком нагреве поверхности ($T < 42°C$).

5. Эффект от использования кластера в достижении целей работы: В ходе выполнения проекта оптимизация работы плазменного источника была проведена на основе численного моделирования на кластере ИВЦ НГУ.
6. Перечень публикаций, содержащих результаты работы

1. **И. Швейгерт**, Д. Закревский, Е. Милахина, П. Гугин, М. Бирюков, А. Полякова, Н. Крячкова, Е. Горбунова, А. Епанчинцева, И. Пышная, О. Коваль, Усиление противоракового эффекта при совместной обработке клеток струей холодной атмосферной плазмы и наночастиц золота. Физика плазмы, 2024 принята для публикации
2. I **Schweigert**, M Biryukov, A Polyakova, N Krychkova, E Gorbunova, A Epanchintseva, I Pyshnaya, Dm Zakrevsky, E Milakhina, O Koval Pulsed voltage cold atmospheric

plasma jet and gold nanoparticles enhance cytotoxic anticancer effect. J. Phys. D: Appl. Phys. 57 (2024) 255205 https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad34df WOS (Q:1)

3. Е.В. Милахина, П.П. Гугин, Д.Э. Закревский, **И.В. Швейгерт**, М.М. Бирюков, Е.А. Патракова, О.А. Коваль Исследование электрофизических параметров холоднойплазменной струи в гелии и аргоне. Журнал технической физики, 2024, том 94, вып. 5
4. **I. V. Schweigert**, D. E. Zakrevsky, E. V. Milakhina, A. L. Aleksandrov, M. M. Biryukov, O. A. Koval, Advantages of Cold Atmospheric Plasma Jet Generated by Positive Pulse Voltage in Anti-Cancer Therapy, Plasma Physics Reports, 2023, Vol. 49, No. 11, pp. 1358–1365
5. Biryukov M., Semenov D., Kryachkova N., Polyakova A., Patrakova E., Troitskaya O., Milakhina E., Poletaeva E., Gugin P., Ryabchikova E., Zakrevsky D., **Schweigert I.,** Koval O.) The Molecular Basis for Selectivity of the Cytotoxic Response of Lung Adenocarcinoma Cells to Cold Atmospheric Plasma Biomolecules (2023 г.) WOS SCOPUS Q1 RSCI РИНЦ Q:1
6. Патракова Е.А., Бирюков М.М., Троицкая О.С., Новак Д.Д., Милахина Е.В., Гугин П.П., Закревский Д.Э., **Швейгерт И.В**., Коваль О.А. Цитотоксическая активность атмосферной холодной плазменной струи в отношении 3D-клеточной модели рака молочной железы человека // Цитология, 2023, Т. 65, № 1, стр. 39-53
7. **И. В. Швейгерт**, Д. Э. Закревский, Е. В. Милахина, А. Л. Александров, М. М. Бирюков, О. А. Коваль, ПРЕИМУЩЕСТВА СТРУИ ХОЛОДНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ В ПРОТИВОРАКОВОЙ ТЕРАПИИ. ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2023, том 49, № 11, с. 1–8
8. **Швейгерт И.В**., Закревский Д.Э., Милахина Е.В., Гугин П.П., Бирюков М.М., Патракова Е.А., Троицкая О.С., Коваль О.А. Характеристики холодной плазменной струи при возбуждении синусоидальным и положительным импульсным напряжениями для медицинских приложений // Физика плазмы. - 2023. -Т.49, No.5. -С. 447-453. DOI: 10.31857/S0367292122601400 (РИНЦ, ВАК)

9. Patrakova E., Birykov M., Troitskaya O., Gugin P., Milakhina E., Semenov, D., Poletaeva Ju., Ryabchikova E., Novak D., Kryachkova N., Polyakova A., Zhilnikova M., Zakrevsky D., **Schweigert I.,** Koval O. Chloroquine enhances death in lung adenocarcinoma A549 cells exposed to cold atmospheric plasma jet // Cells. - 2023. -Vol.12, No.2. -P. art. 290. DOI: 10.3390/cells12020290 (WoS, Scopus) Q:1

10. Gugin P.P., Zakrevskii D.É., Milakhina E.V., Biryukov M.M., Koval O.A., Patrakova E.A., **Shveigert I.V**. Optimization of the parameters of a cold plasma jet produced by sinusoidal voltage excitation for effective suppression of cancer cell viability // Biomedical Engineering. - 2023. -Vol.56, No.6. -P. 409– 413. DOI: 10.1007/s10527-023-10246-2 (WoS, Scopus)

11. **Schweigert I.V**., Zakrevsky Dm.E., Milakhina E.V., Gugin P.P., Biryukov M.M., Patrakova E.A., Troitskaya O.S., Koval O.A. Characteristics of cold atmospheric plasma jet when excited by sinusoidal and positive pulse voltages for medical applications // Plasma Physics Reports. - 2023. -Vol.49, No.5. -P. 595–601. DOI: 10.1134/S1063780X2360010X Q;4 (WoS, Scopus)