

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,  
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 533.9.07

**ИЗМЕРЕНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ НЕТЕРМАЛЬНОЙ  
АРГОНОВОЙ СВЧ-ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ  
ФЕРРОСУЛЬФАТНОГО ДОЗИМЕТРА**

© 2022 г. В. А. Харламов<sup>а</sup>, И. В. Полякова<sup>а</sup>, С. А. Горбатов<sup>а,\*</sup>,  
И. М. Меджидов<sup>а</sup>, Д. И. Петрухина<sup>а</sup>, Д. В. Басырова<sup>а</sup>, Н. В. Глущенко<sup>а</sup>,  
И. А. Иванов<sup>а</sup>, В. Н. Тихонов<sup>а</sup>, А. В. Тихонов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии  
Россия, 249032, Обнинск Калужской обл., Киевское шоссе, 109-й км*

*\*e-mail: gorbatovsa004@gmail.com*

Поступила в редакцию 17.03.2022 г.

После доработки 25.04.2022 г.

Принята к публикации 12.06.2022 г.

Рассмотрены окислительные эффекты нетермальной аргоновой плазмы атмосферного давления, представляющей собой вырабатываемый под действием СВЧ ионизированный газ. Изучена применимость ферросульфатного дозиметра (дозиметра Фрикке) для измерения окислительных свойств нетермальной плазмы. Показано, что под воздействием нетермальной плазмы в пробе ферросульфатного дозиметра образуются окислители, определяемые по переходу железа из двухвалентного в трехвалентное (пик поглощения при длине волны 304 нм). Это позволяет сделать вывод, что ферросульфатный дозиметр может применяться для количественной оценки окислительного потенциала нетермальной плазмы.

DOI: 10.31857/S0032816222060064

**ВВЕДЕНИЕ**

Нетермальная аргоновая СВЧ-плазма представляет собой вырабатываемый под действием СВЧ ионизированный газ. Нетермальность означает, что температура тяжелой компоненты (ионы, нейтральные частицы) такой плазмы, как правило, не превышает нескольких сотен градусов Цельсия, а иногда близка и к комнатной температуре [1–3]. В данной работе рассматриваются окислительные эффекты атмосферной нетермальной плазмы (АНТП).

Одним из преимуществ плазменной обработки является то, что глубина плазменного воздействия не превышает несколько микрометров, поэтому не изменяет объемные свойства материала [1, 4]. Применение нетермальной плазмы в различных технологических процессах находится в стадии первоначального бурного развития, и перспективы здесь открываются весьма обширные [3, 5, 6].

Сочетание низкой газовой температуры с высокой химической активностью делает плазму перспективным инструментом для обработки жидкостей и модификации нетермостойких химических материалов [7–9], а также для воздействия на биообъекты в основном с целью бакте-

рицидной обработки [4, 6, 10, 11]. В процессе генерирования плазмы образуются химически активные частицы, вызывающие окислительные повреждения мембран и ДНК микроорганизмов [12–14]. При этом плазменная обработка не обладает выраженным повреждающим действием на ткани растений и животных [4, 15, 16].

Актуальным представляется количественное описание окислительных процессов, происходящих при плазменной обработке. Экспериментальные результаты, полученные разными авторами на одних и тех же объектах, часто различаются в зависимости от используемого типа разряда и от применяемой установки для генерирования плазмы. Чаще всего используемые в работах плазмы сравнить невозможно, поскольку в статьях не приводятся ни характеристики плазмы, ни даже тип разряда, с помощью которого она получена, указано только время обработки продукта. Также часто в исследованиях используется собственная, обычно экспериментальная (существующая в единственном экземпляре) установка-плазматрон [16]. Знания времени обработки и расстояния от источника плазмы недостаточно для определения эффективности установки, потому что источники и параметры плазмы различаются у разных исследовательских групп [17, 18].

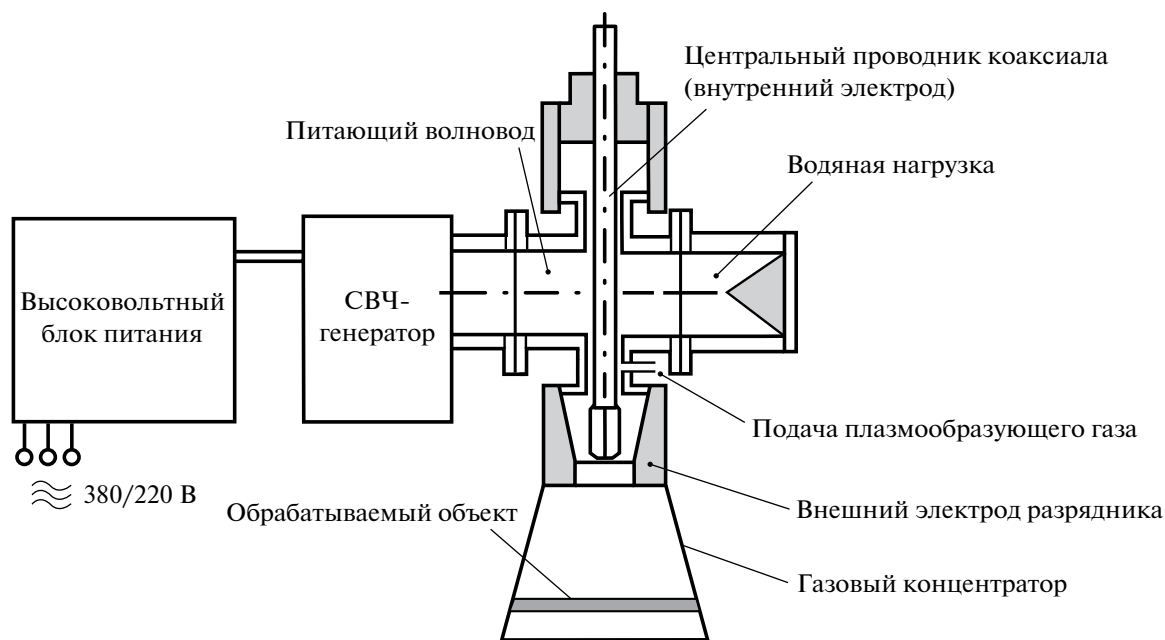


Рис. 1. Источник аргоновой нетермальной СВЧ-плазмы атмосферного давления, ВНИИРАЭ (г. Обнинск).

Цель данной работы — изучить применимость ферросульфатного дозиметра (дозиметра Фрикке) для измерения окислительных свойств нетермальной плазмы.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

### Источник АНТП

Источник нетермальной плазмы атмосферного давления разработан в ФГБНУ ВНИИРАЭ (Обнинск), его схема приведена на рис. 1.

Основу представляемого аппаратного комплекса составляет малобюджетный магнетронный СВЧ-генератор диапазона 2.45 ГГц. Разработанные схмотехнические и инженерные решения позволяют получать до 3 кВт непрерывной СВЧ-мощности от магнетронов для бытовых микроволновых печей с номинальной мощностью 1 кВт. Использована конструкция восьмигранного наконечника разрядника [19, 20].

Для снижения температуры потока и сохранения концентрации ионизации/активации на внешнюю сторону разрядника плазменного источника устанавливается газовый концентратор, выполненный из листа (толщина 0.4 мм) нержавеющей стали AISI 304. Концентратор представляет собой тонкостенную кольцевую расширительную камеру в виде усеченного конуса, при этом площадь кольцевого сечения входа в расширительную камеру больше площади выходного сечения сопла при соотношении примерно 1:2. Диаметры оснований конуса 60 и 110 мм, высота 170 мм (см. рис. 1).

### Определение окислительных свойств АНТП

Метод основан на использовании процессов окисления ионов металлов переменной валентности Fe(II)/Fe(III).

В качестве объекта использовали ферросульфатный дозиметр (дозиметр Фрикке) [21]: водный раствор соли Мора 0.392 г/л (0.001 М), в который добавляли 26.8 мл/л концентрированной серной кислоты (0.4 М) и 0.06 г/л NaCl. Аликвоту объемом 30 мл наливали в полистероловые чашки Петри диаметром 85 мм и высотой 13 мм, высота столба жидкости составляла 5 мм. Обработку пробы нетермальной плазмой проводили при размещении источника на расстоянии 160 мм от поверхности жидкости в течение от 1 до 10 мин с шагом 1 мин. Расход плазмообразующего газа аргона составлял 4.5 л/мин. Пробу ферросульфатного дозиметра обрабатывали нетермальной плазмой с помощью конусовидного концентратора (рис. 2а) и без концентратора (рис. 2б) для сравнения. Температура газа на выходе из концентратора была около 25°C и за время эксперимента не превышала 40°C.

После обработки пробу переливали в полипропиленовые контейнеры емкостью 50 мл и герметично закрывали крышкой. Концентрацию Fe<sup>3+</sup> определяли в тот же день после обработки, измеряя оптическую плотность при длине волны 304 нм спектрофотометром СФ-2000 (ЗАО «ОКБ СПЕКТР», Санкт-Петербург, Россия) относительно необработанного плазмой раствора. Измерения повторяли не менее трех раз.

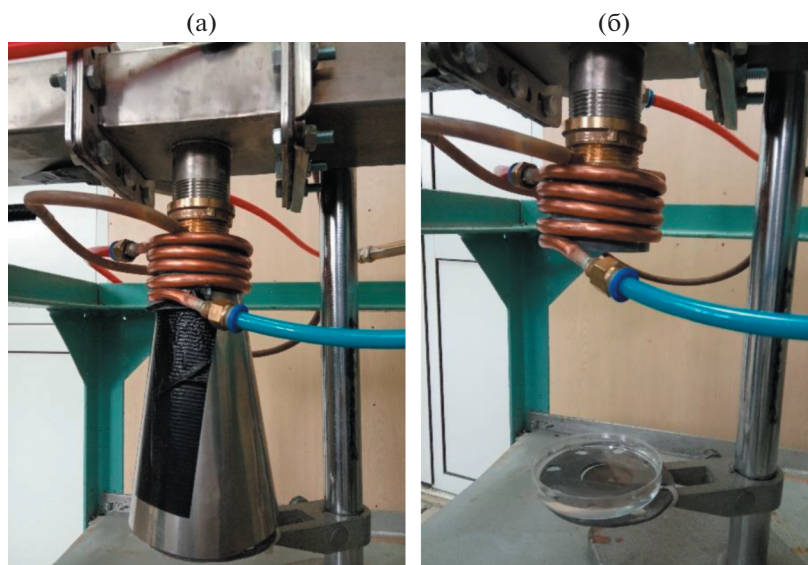


Рис. 2. Обработка нетермальной плазмой пробы ферросульфатного дозиметра: а – с использованием концентратора, б – без концентратора.

Полученные результаты измерений обрабатывали в программе Microsoft Excel 2019.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Спектры АНТП*

Были получены спектры аргоновой СВЧ-плазмы на спектрометре AvaSpec-2048. Спектр генерируемой плазмы затем был сопоставлен со спектром аргона (Ar) по литературным данным из открытого источника [22].

Согласно рис. 3, световое излучение плазмы полностью соответствует спектру излучения атомарного аргона при отсутствии значимых количеств других примесей газов. Это соответствует литературным данным, указывающим на низкую степень ионизации неравновесной плазмы [1, 2].

### *Окислительные свойства АНТП*

Для изучения окислительных эффектов нетермальной плазмы обрабатывали в качестве модели пробу ферросульфатного дозиметра [21]. Метод основан на окислении иона  $Fe^{2+}$  под действием плазмы и последующем измерении концентрации образовавшихся в растворе ионов  $Fe^{3+}$ .

Результаты эксперимента по определению концентрации ионов  $Fe^{3+}$  представлены на рис. 4.

Установлено, что в пробах ферросульфатного дозиметра, обработанных излучением нетермальной плазмы, возрастает концентрация окислителей, определяемая по изменению концентрации ионов  $Fe^{3+}$ . При этом облучение образца с помощью конусовидного концентратора повышало

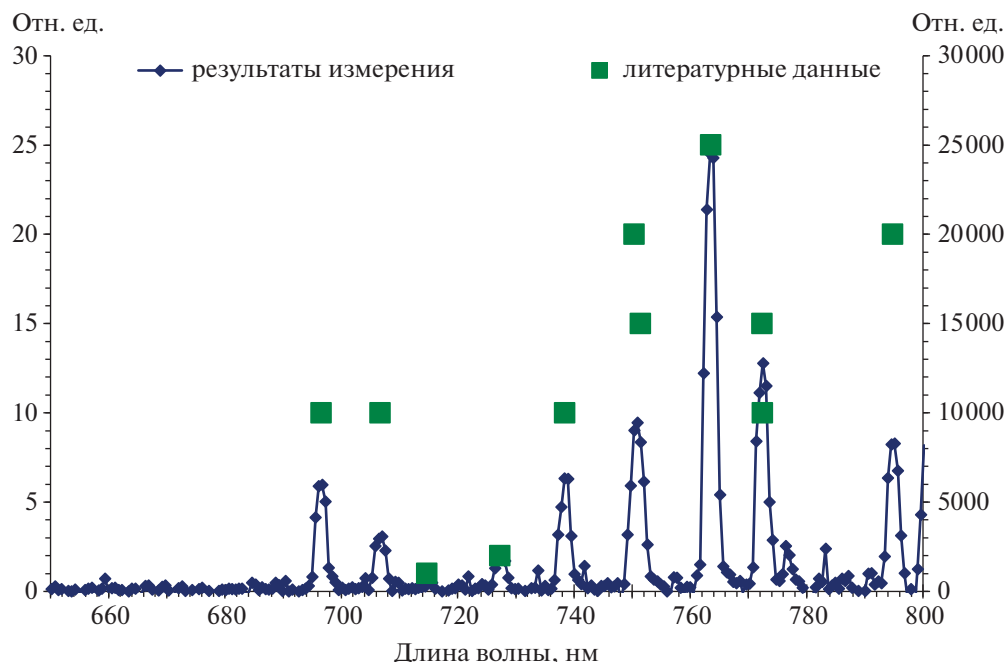
концентрацию окислителей в 7 раз (см. рис. 4):  $4.64 \cdot 10^{-5} Fe^{3+}$  моль/л – с использованием конусовидного концентратора и  $6.76 \cdot 10^{-6} Fe^{3+}$  моль/л – без концентратора – в течение 600 с обработки.

## ОБСУЖДЕНИЕ

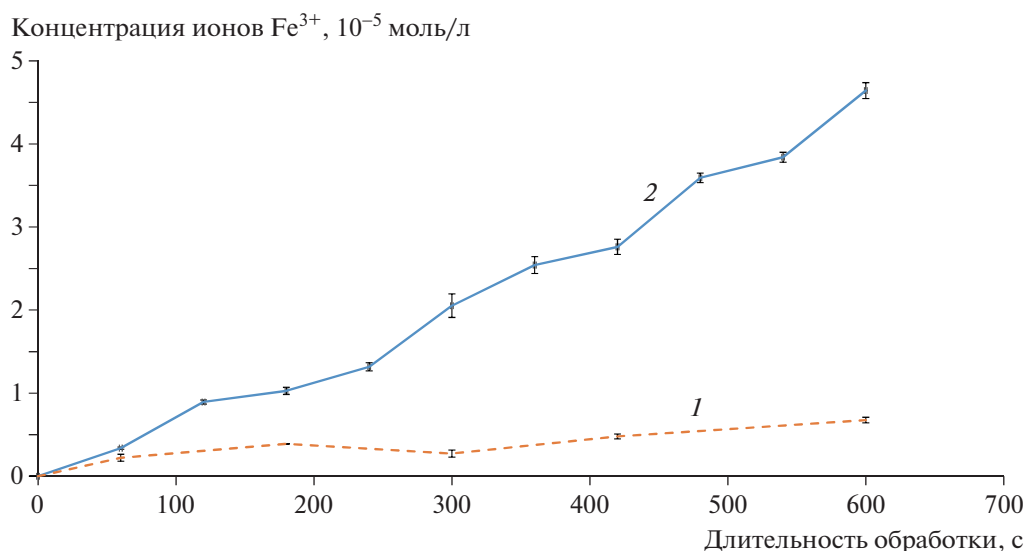
Продукты, образующиеся под действием излучения плазмы, обнаружены химическими и спектрофотометрическими методами в водных растворах органических и неорганических соединений, а также непосредственно в воде [23–25]. Эти активные частицы вызывают химические превращения (окислительные эффекты).

Любые эффекты взаимодействия нетермальной плазмы с обрабатываемой поверхностью формируются под действием потоков на эту поверхность активных частиц плазмы. Чтобы делать прогнозы относительно результатов воздействия плазмы на самые разные термочувствительные материалы, в том числе биологические ткани, а также подбирать приемлемые условия проведения этих процессов, необходимо измерять количественно это воздействие [8].

Так, для измерения окислительных свойств нетермальной плазмы может быть использован ферросульфатный дозиметр. Под воздействием нетермальной плазмы в пробе ферросульфатного дозиметра образуются окислители, определяемые по переходу железа из двухвалентного в трехвалентное (пик поглощения при длине волны 304 нм), что позволяет применять его для количественной оценки окислительного потенциала нетермальной плазмы.



**Рис. 3.** Интенсивность излучения аргоновой СВЧ-плазмы в сравнении с излучением Ag из литературных данных [22]: левая вертикальная ось соответствует экспериментальным данным, правая ось — литературным данным.



**Рис. 4.** Концентрация трехвалентного железа, образовавшегося в результате окисления двухвалентного железа, в пробе (ферросульфатный дозиметр), обработанной нетермальной плазмой: 1 — без использования конусовидного концентратора, 2 — с конусовидным концентратором.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Low Temperature Plasmas: Fundamentals, Technologies, and Techniques / Ed. by R. Hippler Berlin, Germany, Weinheim: Wiley-VCH, 2008.
2. Roth J.R. Industrial Plasma Engineering. Volume 1: Principles. UK, Bristol Institute of Physics Publishing, 1995.
3. Акишев Ю.С. // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2019. Т. 62. № 8. С. 26.  
<https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196208.5908>
4. Fridman G. // Plasma Processes and Polymers. 2008. V. 5. № 6. P. 503.  
<https://doi.org/10.1002/ppap.200700154>

5. Non-equilibrium air plasmas at atmospheric pressure / Ed. by *K.H. Becker, U. Kogelschatz, K.H. Schoenbach, R.J. Barker*. Institute of Physics Publishing, 2005.
6. *Scholtz V., Pazlarova J., Souskova H., Khun J., Julak J.* // *Biotechnology Advances*. 2015. V. 33. № 6. Part 2. P. 1108.  
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.01.002>
7. *Шуаибов А.К., Чучман М.П., Месарош Л.В.* // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. Вып. 6. С. 60.
8. *Ефремов А.М., Светцов В.И., Рыбкин В.В.* Вакуумно-плазменные процессы и технологии. Учебное пособие. Иваново: ГОУВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2006.
9. *Ключарев А.Н., Мишаков В.Г., Тимофеев Н.А.* Введение в физику низкотемпературной плазмы. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2008.
10. *Niemira V.A.* // *Annual Review of Food Science and Technology*. 2012. V. 3. № 1. P. 125.  
<https://doi.org/10.1146/annurev-food-022811-101132>
11. *Гомбоева С.В., Бадмаева И.И., Балданов Б.Б., Ранжуров Ц.В., Николаев Э.О.* // Техника и технология пищевых производств. 2017. Т. 46. № 3. С. 129.
12. *Архипова Е.В., Иванова И.П.* // Современные технологии в медицине. 2017. Т. 9. № 3. С. 55.
13. *Трофимова С.В., Иванова И.П., Бугрова М.Л.* // Медицинский альманах. 2013. Т. 27. № 3. С. 87.
14. *Иванова И.П., Трофимова С.В., Аристова Н.А., Архипова Е.В., Бурхина О.Е., Сысоева В.А., Пискарев И.М.* // Современные технологии в медицине. 2012. № 2. С. 20.
15. *Ито М., Oh J.S., Ohta T., Shiratani M., Hori M.* // *Plasma Processes and Polymers*. 2017. V. 15. P. 1700073.  
<https://doi.org/10.1002/ppap.201700073>
16. Cold plasma in food and agriculture: fundamentals and applications / Ed. by *N.N. Misra, O. Schluter, P.J. Cullen*. Academic Press is an imprint of Elsevier, 2016.
17. *Петрухина Д.И., Карпенко Е.И., Шишко В.И., Помясова М.Г.* // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. 2019. № 4. С. 38.
18. *Fridman A., Lin A., Miller V., Bekeschus S., Wende K., Weltmann K.D.* // *Plasma Med*. 2018. V. 8. P. 195.  
<https://doi.org/10.1615/PlasmaMed.2018026881>
19. *Tikhonov V., Gorbatov S., Ivanov I., Tikhonov A.* // 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). Tomsk, Russia. 2020. P. 596.  
<https://doi.org/10.1109/EFRE47760.2020.9242089>
20. *Ivanov I.A., Tikhonov V.N., Tikhonov A.V.* // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1393. № 1. P. 012042.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1393/1/012042>
21. *Fricke H., Morse S.* // *American Journal of Roentgenology, Radium Therapy, and Nuclear Medicine*. 1927. V. 18. P. 430.
22. *Kazakov V.V., Kazakov V.G., Kovalev V.S., Meshkov O.I., Yatsenko A.S.* // *Physica Scripta*. 2017. V. 92. Issue 10. P. 105002.  
<https://doi.org/10.1088/1402-4896/aa822e>
23. *Пискарев И.М., Астафьева К.А., Иванова И.П.* // Современные технологии в медицине. 2018. Т. 10. № 2. С. 90.  
<https://doi.org/10.17691/stm2018.10.2.10>
24. *Фитасова К.А., Иванова И.П., Пискарев И.М.* // Тез. докл. 72-й Всероссийской с международным участием школы-конференции молодых ученых "Биосистемы: организация, поведение, управление". (Нижний Новгород, 23–26 апреля 2019 г.) Н. Новгород: Университет Лобачевского, 2019. С. 231.
25. *Иванова И.П., Пискарев И.М.* // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2019. № 3. С. 1930401-1.