

СКОЛЬЗЯЩИЙ ПО ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ РАЗРЯД, КАК ИСТОЧНИК УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ И ГИДРОКСИЛЬНЫХ РАДИКАЛОВ В ЖИДКОСТИ

© 2023 г. А. М. Анпилов^a, Э. М. Бархударов^a, Ю. Н. Козлов^{b,c},
И. В. Моряков^{a,*}, С. М. Темчин^a, И. М. Тактакишвили^a

^a Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

^b ФИЦ химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН, Москва, Россия

^c Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия

*e-mail: igor_miw@mail.ru

Поступила в редакцию 28.04.2023 г.

После доработки 31.05.2023 г.

Принята к публикации 31.05.2023 г.

Исследовался высоковольтный импульсно-периодический поверхностный искровой разряд, распространяющийся вдоль границы вода–газ, когда в качестве газовой среды использовался Аг. В экспериментах использовался генератор с энергией накопительного конденсатора до 1.6 Дж, напряжением до 20 кВ, длительностью импульса 2–3 мкс. Проведены измерения энергетических характеристик разряда в зависимости от его длины от 40 до 140 мм. Измерена интенсивность УФ-излучения методом актинометрии в диапазоне длин волн от 200 нм до 380 нм. Установлено, что выход излучения УФ по длине разряда постоянен, практически не зависит от его длины и прямо пропорционален вкладываемой в разряд энергии. Энергетическая стоимость кванта излучения составила 150 эВ. Проведены количественные оценки наработки гидроксильных радикалов в зависимости от длины плазменного канала и вкладываемой в разряд энергии.

Ключевые слова: искровой разряд, скользящий поверхностный разряд, УФ-излучение, обработка воды

DOI: 10.31857/S0367292123600401, **EDN:** HGAYL

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время активно проводятся прикладные и фундаментальные исследования в такой обширной междисциплинарной области, как плазменно-жидкостное взаимодействие [1–4]. Известно, что плазма в жидкости и в контакте с ней является источником сильных окислителей, таких как гидроксил (ОН), атомарный кислород (О), перекись водорода (H₂O₂). При этом также возможна наработка наночастиц и окислов азота. Подобные плазменно-активированные жидкости могут быть использованы в экологических целях, в материаловедении, а также в сельском хозяйстве и медицине [1, 5–9].

Различают объемную жидкость и межфазовую область. Именно в межфазовой области проходят самые существенные физические и химические процессы. Особый интерес представляет интенсификация данных процессов.

На сегодняшний день для решения задачи плазможидкостного взаимодействия применяют разрядные системы, которые можно разделить на

три типа: разряд организуется непосредственно в жидкой среде, разряд формируется на поверхности жидкости (сюда же можно отнести системы, в которых одним из электродов является жидкость) и многофазные системы, где разряд инициируется в пузырях газа, газовых струях в жидкости, аэрозолях и пенообразующих жидкостях [10–13].

Взаимодействие жидкости с плазмой позволяет получать плазменно-активированные растворы с различными концентрациями пероксида водорода, нитрит-ионов, нитрат-ионов и гидроксильных радикалов. В силу сложности и многообразия протекающих плазмохимических процессов, наличия заряженных частиц, возникают трудности при их детальном моделировании. В этой связи особую значимость приобретают экспериментальные исследования, которые позволяют измерить концентрации активных веществ в плазменно-активированных жидкостях в зависимости от параметров разряда, его излучения, режима работы источника плазмы, геометрии разрядной камеры.

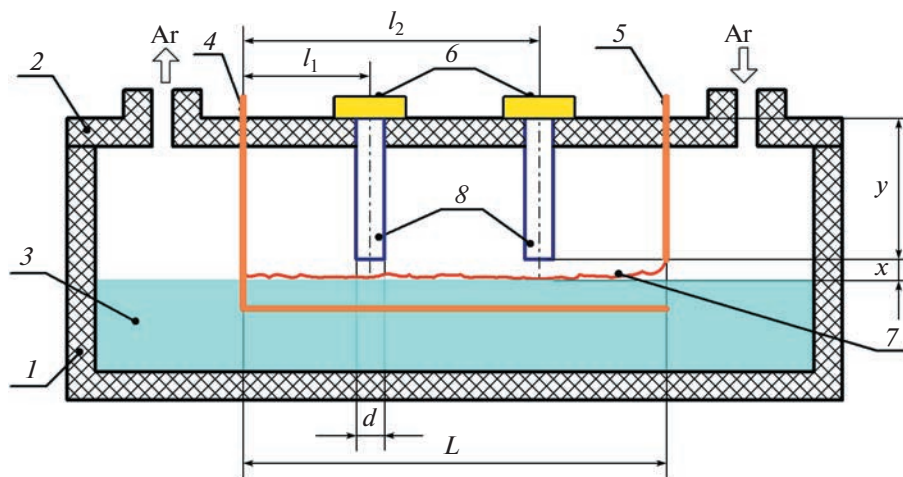


Рис. 1. Схема измерения интенсивности УФ-излучения СПР в точках l_1 и l_2 от входа земляного электрода в кювету ($l_1 = 20$ мм и $l_2 = 80$ мм). 1 — кювета из оргстекла, 2 — крышка кюветы из оргстекла, 3 — дистиллированная вода, 4 — земляной электрод, 5 — высоковольтный электрод, 6 — кварцевая кювета для актинометрических измерений, 7 — разрядный канал, 8 — кварцевые цилиндры для регистрации интенсивности излучения.

В данной работе для плазменной активации жидкости применялся скользящий поверхностный разряд (СПР) на поверхности дистиллированной воды. В образующемся разрядном канале происходит диссоциация молекул газа и паров воды, генерация УФ-излучения и наработка активных частиц [14]. Преимуществами предлагаемой разрядной системы являются получение достаточно протяженных разрядных каналов, возможность менять параметры разряда в зависимости от проводимости воды при достаточно высоких энергетических нагрузках. В [15–17] в условиях, близких к экспериментам, представляемыми в предлагаемой работе, исследовались характеристики поверхностного разряда при атмосферном давлении в воздухе и аргоне. Использовались конструкция с протяженным подводным электродом, генератор с энергией накопительного конденсатора 1.6 Дж, напряжением 20 кВ, длительностью импульса 2–3 мкс.

Целью данной работы являются количественные измерения интенсивности ультрафиолетового излучения (УФ-излучения) СПР на поверхности дистиллированной воды в аргоне при атмосферном давлении с применением метода актинометрии [18], а также количественные измерения наработки гидроксильных радикалов в результате возбуждения разряда в воде.

Следует отметить, что регистрация полного потока УФ-излучения представляет определенные трудности, в особенности, для разрядных систем, обладающих протяженной геометрической формой. Ранее актинометрическая методика была нами использована в ряде работ, например [19, 20].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 1 приведена схема реактора. Его конструкция позволяла работать как в замкнутом объеме, так и с прокачкой газа.

Камера из оргстекла 1 объемом 300 см³ с крышкой 2 заполнялась дистиллированной водой 3 (объем воды $V = 160$ мл). В крышке закреплялись земляной (4) и высоковольтный 5 электроды. Электрод 4 имел надводную и подводную части (подводная часть имела длину 14 см при глубине погружения 0.5...1 см). В качестве материала электродов использовалась медь. Высоковольтный электрод 5 был заострен и располагался над водой на расстоянии $x = 7$ мм от ее поверхности. В кварцевую кювету 6 заливалась актинометрическая жидкость. Параметры измерительной схема были подобраны таким образом, чтобы УФ-излучение, поступающее из разрядного канала 7 через цилиндры 8 (внутренний диаметр $d = 8$ мм и длина $y = 35$ мм), фактически, соответствовало излучению части разряда длиной d , расположенной на расстоянии l_1 от входа земляного электрода 4. Испускаемое разрядом излучение имело телесный угол $\pi d^2 / 4(x + y)^2$. Последнее верно, если внутренняя поверхность цилиндра 8 целиком поглощает падающее на нее излучение. Приближение к этому условию достигалось путем чернения поверхности цилиндров. В рассматриваемой схеме параметры составляли соотношение $x \approx d \ll y$. Конструкция разрядной системы позволяла также регулировать длину плазменного канала L от 20 мм до 140 мм.

Электрическое питание разряда осуществлялось импульсным генератором (напряжение

$U_n \leq 20$ кВ) с накопительной емкостью $C = 10^{-8}$ Ф с тиратронной схемой запуска. Энергия накопительного конденсатора составляла $E_n \leq 1.6$ Дж. Частота следования импульсов ≤ 100 Гц. Для регистрации тока и напряжения использовались трансформатор тока типа “пояса Роговского” 1 : 10 (Stangenes Industries) и делитель напряжения 1 : 1000 (Tektronix P6015A) соответственно. Сигналы подавались на вход двухлучевого осциллографа (Tektronix TDS 1002B). При измерении проводимости воды использовался кондуктометр HANNA DIST-5 HI 98312.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В экспериментах измерялись энергетические характеристики СПР и проводились количественные измерения УФ-излучения разряда, наработка гидроксильных радикалов в жидкости.

3.1. Энергетические характеристики разряда

На рис. 2 представлены осциллограммы тока и напряжения, а также рассчитанная по ним мощность для двух случаев: а) — для длины плазменного канала $L = 20$ мм и б) — для $L = 140$ мм. Видно, что с увеличением длины СПР возрастает длительность предпробойной стадии — 1, в результате этого уменьшается доля энергии в канальной стадии (2). При этом основная энергия в разряд вкладывается именно в стадии — 2.

На рис. 2в приведена зависимость вложенной в разряд энергии от длины разрядного канала. Видно, что энерговклад линейно нарастает с длиной плазменного канала. При этом при длине разряда $L \geq 120$ мм значительная часть энергии импульса расходуется на предпробойную стадию разряда. В экспериментах проводимость воды не превышала 80 мкСм/см.

3.2. Количественные измерения УФ-излучения разряда

Измерения УФ-излучения проводились при помощи ферриоксалатового актинометра, подробно описанного в [21] по схеме, представленной на рис. 1.

Известно, что ферриоксалат калия в растворе, поглощая излучение в УФ и видимой областях спектра, восстанавливается в результате фотопереноса электрона от оксалатной группы на ион железа Fe^{3+} , и в растворе образуется ион железа Fe^{2+} [21]. Квантовый выход фотовосстановления ферриоксалата слабо изменяется в области длин волн 200–400 нм (уменьшается от 1.2 до 1.0) и остается значительным в видимой области спектра, например, при длине волны излучения

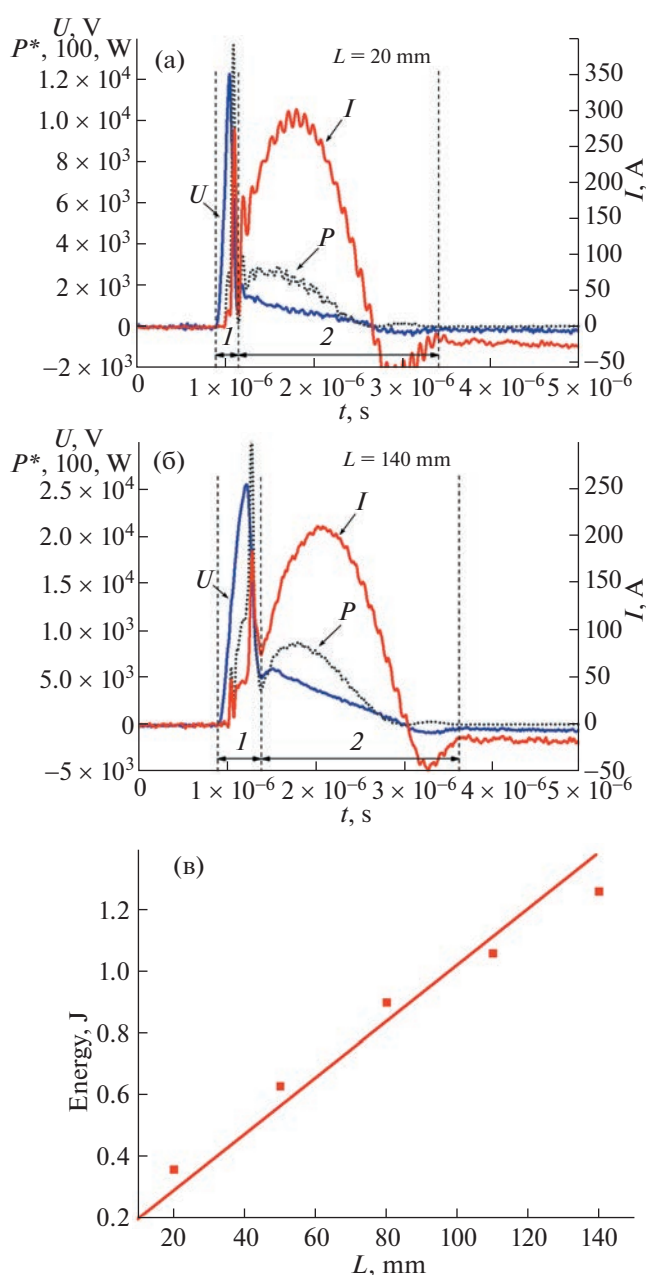


Рис. 2. а), б) — Осциллограммы тока, напряжения и рассчитанная по ним мощность для длины плазменного канала $L = 20$ мм и $L = 140$ мм соответственно. 1 — предпробойная стадия, 2 — искровая стадия; в) — вложенная в разряд энергия в зависимости от длины разрядного канала.

509 нм он равен 0.86 [18]. Эффективность поглощения излучения изменяется в зависимости от длины волны гораздо сильнее, чем квантовый выход фотовосстановления ферриоксалата. Так раствор ферриоксалата поглощает 99% света при длине волны 400 нм и 61% при 436 нм. В этой связи при измерении интенсивности УФ-излучения с помощью ферриоксалата калия необходимо

Таблица 1. Выход излучения при облучении образцов актинометрической жидкости в течение 30 мин. в атмосфере аргона при его расходе 1 л/мин, при $U = 20$ кВ, $f = 15$ имп с^{-1}

	Длина СПР L , мм				
	140		110		80
	$l_1 = 20$ мм	$L_2 = 80$ мм	$l_1 = 20$ мм	$L_2 = 80$ мм	$l_1 = 20$ мм
$10^{-17} N$, квантов	1.6	2.0	1.9	2.6	1.3

учитывать влияние на результаты видимой части спектра излучения разрядника. В работе [22] было показано, что не менее 80% регистрируемого излучения разряда обусловлено ультрафиолетом. Аналогичная ситуация имеет место и в случае нашего разряда, т.е. разряд излучает преимущественно в УФ-области оптического спектра.

Результаты измерения УФ-излучения СПР с использованием ферриоксалата калия в качестве актинометрической жидкости, помещённой в кварцевую кювету, расположенную в точках $l_1 = 20$ мм и $l_2 = 80$ мм при различных длинах L плазменного канала, выполненными по схеме рис. 1, приведены в табл. 1 (излучение, зафиксировано в точках l_1 и l_2 СПР при различных длинах L плазменного канала).

Результаты этих измерений показывают, что интенсивность излучения разряда вдоль его длины изменяется слабо. Также слабо она меняется и при изменении длины разрядного канала L . В изученных условиях, излучение единицы длины разряда постоянно вдоль его длины и слабо зависит от длины разряда L .

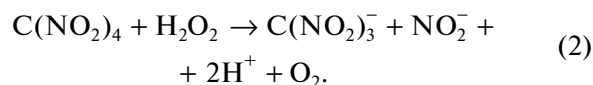
Используя данные табл. 1, оценим энергетический выход излучения СПР. Пусть N_0 излучение выделенного элемента d , рассматриваемого как точечный источник относительно b , в телесный угол 4π , а N — излучение регистрируемое кюветой b . Тогда получаем, что

$$4\pi N / (\pi d^2 / 4(x + y)^2) = N_0 \quad (1)$$

Подставив значения d , x , y и среднее значение N из приведенных в таблице (1.9×10^{17}), получим $N_0 = 0.84 \times 10^{20}$. Полное излучение разряда длиной 110 мм, для которого вложенная в импульсе энергия равна 1 Дж, при этом за 30 минут при частоте посылок импульсов 15 Гц, будет зарегистрировано УФ-квантов $0.84 \times 10^{20} \times 110/8 = 1.1 \times 10^{21}$. Следовательно, каждому импульсу вложенной в разряд энергии будет соответствовать излучение около 4×10^{16} УФ-квантов. Таким образом, на квант излучения затрачивается в среднем энергия около 150 эВ.

3.3. Количественные измерения наработки гидроксильных радикалов

Для оценки скорости генерации гидроксильных радикалов в воде использовались добавки нитроформа. Причиной выбора этого соединения являлись следующие обстоятельства. Во-первых, известно, что нитроформ эффективно взаимодействует с гидроксильными радикалами. Во-вторых, в растворе он существует в виде иона нитроформа — $\text{C}(\text{NO}_2)_3^-$. И поэтому за его химические превращения отвечают исключительно химические реакции в жидкой фазе. В-третьих, ион $\text{C}(\text{NO}_2)_3^-$ легко детектировать спектрофотометрически, поскольку он интенсивно поглощает свет на длине волны 350 нм ($\epsilon_{350} = 14500 \text{ см}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{л}^{-1}$ [23]), в то время как продукты его окисления не поглощают свет в этой спектральной области. Поэтому окисление иона $\text{C}(\text{NO}_2)_3^-$ (регистрируется по обесцвечиванию раствора в области длины волны 350 нм) свидетельствует о возникновении окислительных частиц в растворе под действием разряда. Водный раствор, содержащий ионы $\text{C}(\text{NO}_2)_3^-$, получали восстановлением $\text{C}(\text{NO}_2)_4$ пероксидом водорода в результате реакции



Данные, полученные при окислении радикала $\text{C}(\text{NO}_2)_3^-$ приведены на рис. 3. Из них следует, что, во-первых, количество окисленного в растворе $\text{C}(\text{NO}_2)_3^-$ пропорционально времени обработки раствора (см. точки 1, 2 и точку 7, соответствующие $t = 5$ мин при $L = 110$ мм). Во-вторых, количество $\text{C}(\text{NO}_2)_3^-$ пропорционально энергии конденсатора ($CU^2/2$) (см. точки 3, 4 и точку 6 при $U = 20$ кВ и $L = 80$ мм). В-третьих, количество окисленного $\text{C}(\text{NO}_2)_3^-$ уменьшается, если в растворе присутствуют добавки этанола $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (точка 5 и соответствующие точки на сплошной линии в отсутствие добавок $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ при $L = 80$ мм). Поскольку этанол известен как акцеп-

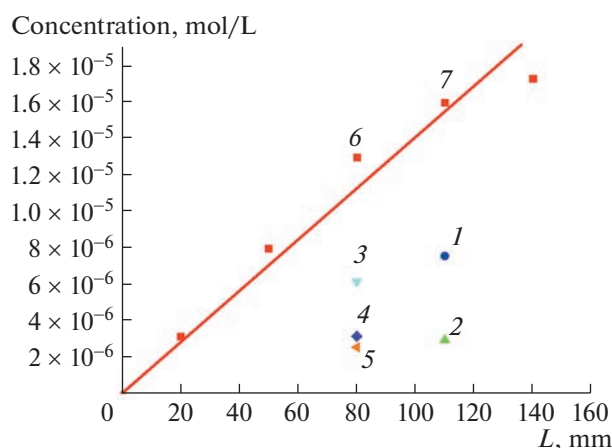


Рис. 3. Зависимость концентрации окисленного $C(NO_2)_3^-$ при обработке 160 мл водного раствора $C(NO_2)_3^-$ с начальной концентрацией $N_0 = 3.1 \times 10^{-5}$ моль/л СПР при $f = 25$ имп. s^{-1} в атмосфере аргона ($W = 1$ л/мин) от длины плазменного канала L при $t = 5$ мин, $U = 10$ кВ. Точки 1 и 2 – $t = 2.5$ мин и $t = 1$ мин соответственно, при $U = 20$ кВ и $L = 110$ мм. Точки 3 и 4 – $U = 15$ кВ и $U = 20$ кВ соответственно, при $L = 80$ мм и $t = 5$ мин. Точка 5 – влияние добавки $[C_2H_5OH] = 0.5$ моль/л на обесцвечивание $C(NO_2)_3^-$ при $U = 20$ кВ и $L = 80$ мм.

тор радикалов $OH^\cdot$, то этот результат означает, что окисление $C(NO_2)_3^-$ отражает факт продуцирования радикалов $OH^\cdot$ в растворе под действием скользящего поверхностного разряда (СПР). И, наконец, количество окисленного в растворе $C(NO_2)_3^-$ практически линейно возрастает при увеличении расстояния L между высоковольтным и земляным электродами в диапазоне $L = 0–110$ мм. Это соответствует линейному увеличению количества гидроксильных радикалов, продуцированных разрядом в растворе в указанном диапазоне.

Выход обесцвечивания $C(NO_2)_3^-$, линейно возрастает с увеличением длины плазменного канала L , что коррелирует с энергией, вложенной в разряд (рис. 2).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован скользящий поверхностный разряд, характерной особенностью которого является генерация плазмы в газе у границы раздела жидкость–газ. В ходе экспериментов были проведены измерения энергетических характеристик СПР и количественные измерения УФ-излучения разряда, оценка наработки гидроксильных радикалов в жидкости.

Было установлено, что энерговыход линейно нарастает с длиной плазменного канала. При этом при расстоянии $L \geq 120$ мм значительная часть энергии расходуется на предпробойную стадию разряда. Оценена энергетическая стоимость кванта УФ-излучения, которая составила величину около 150 эВ.

Количественные измерения показали, что выход УФ-излучения по длине разряда практически постоянен. При этом поток УФ-излучения с единицы длины разряда слабо зависит от длины плазменного канала.

Было показано, что количество продуцируемых разрядом гидроксильных радикалов $OH^\cdot$ примерно пропорционально энергии, вложенной в разряд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Samukawa S., Hori M., Rauf S., Tachibana K., Bruggeman P., Kroesen G., Whitehead J.C., Murphy A.B., Gutso A.F., Starikovskaia S., Kortshagen U., Boeuf J.-P., Sommerer T.J., Kushner M.J., Czarnetzki U., Mason N. // Journal of Physics D: Appl. Phys. 2012. 45. 253001. P. 1–37. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/25/253001>
2. Bruggeman P., Leys C. // Journal of Physics D: Appl. Phys. 2009. 42. 053001. P. 1–28. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/5/053001>
3. Bruggeman P.J., Kushner M.J., Locke B.R., Gardeniers J.G.E., Graham W.G., Graves D.B., Hofman-Carris R.C.H.M., Maric D., Reid J.P., Ceriani E., Fernandez Rivas D., Foster J.E., Garrick S.C., Gorbanev Y., Hamaguchi S., Iza F., Jablonowski H., Klimova E., Kolb J., Krema F., Lukes P., Machala Z., Marinov I., Mariotti D., Mededovic Thagard S., Minakata D., Neyts E.C., Pawlat J., Lj Petrovic Z., Pflieger R., Reuter S., Schram D.C., Schröter S., Shiraiwa M., Tarabová B., Tsai P.A., Verlet J.R.R., von Woedtke T., Wilson K.R., Yasui K., Zvereva G. // Plasma Sources Science and Technology. 2016. 053002. P. 1–59. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002>
4. Foster J.E., Sommers B.S., Gucker S.N., Blankson I.M., Adamovsky G. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2012. V. 40. Issue. 5. P. 1311–23. <https://doi.org/10.1109/TPS.2011.2180028>
5. Takaki K., Takahashi K., Hayashi N., Wang D., Ohshima T. // Reviews of Modern Plasma Physics. 2021. V. 5. № 12. <https://doi.org/10.1007/s41614-021-00059-9>
6. Naumova I.K., Maksimov A.I., Khlyustova A.V. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2011. V. 47. № 3. P. 263–265. <https://doi.org/10.3103/S1068375511030136>
7. Konchekov E.M., Kolik L.V., Danilejko Y.K., Belov S.V., Artem'ev K.V., Astashev M.E., Pavlik T.I., Lukanin V.I., Kutylev A.I., Smirnov I.G. Gudkov S.V. Plants. 2022. V.11. Is.10. 1373 <https://doi.org/10.3390/plants11101373>

8. *Skvortsova N.N., Stepakhin V.D., Borzosekov V.D., Sorokin A.A., Malakhov D.V., Kachmar V.V., Kolik L.V., Konchekov E.M., Gusein-zade N.G., Akmadullina N.S., Voronova E.V., Shishilov O.N.* Microwave Plasma Imitation Experiments on Deposition of Lunar Dust on Metal Plates // *Plasma Phys. Rep.* 2023. V. 49. № 1. P. 120.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X22601833>
9. *Pavlik T., Gudkova V., Razvolyaeva D., Pavlova M., Kostukova N., Miloykovich L., Kolik L., Konchekov E., Shimanovskii N.* The Role of Autophagy and Apoptosis in the Combined Action of Plasma-Treated Saline, Doxorubicin, and Medroxyprogesterone Acetate on K562 Myeloid Leukaemia Cells // *IJMS.* 2023. V. 24. № 6. P. 5100.
<https://doi.org/10.3390/ijms24065100>
10. *Artem'ev K.V., Bogachev N.N., Gusein-zade N.G., Dolmatov T.V., Kolik L.V., Konchekov E.M., Andreev S.E.* Study of Characteristics of the Cold Atmospheric Plasma Source Based on a Piezo Transformer // *Russian Physics Journal.* Springer. 2020. V. 62. № 11. P. 2073.
<https://doi.org/10.1007/s11182-020-01948-1>
11. *Ashurov M.Kh., Ashurov E.M., Astashev M.E., Baimler I.V., Gudkov S.V., Konchekov E.M., Lednev V.N., Lukina N.A., Matveeva T.A., Markendudis A.G., Onegov A.V., Rashidova D.K., Sarimov R.M., Sergeichev K.F., Sharipov S.T., Simakin A.V., Smirnov I.G., Smolentsev S.Y., Yakubov M.M., Yanykin D.V., Shcherbakov I.A.* Development of an Environmentally Friendly Technology for the Treatment of Aqueous Solutions with High-Purity Plasma for the Cultivation of Cotton, Wheat and Strawberries // *ChemEngineering.* 2022. V. 6. № 6. P. 91.
<https://doi.org/10.3390/chemengineering6060091>
12. *Kuzin A., Solovchenko A., Khort D., Filippov R., Lukina V., Lukina N., Astashev M., Konchekov E.* Effects of Plasma-Activated Water on Leaf and Fruit Biochemical Composition and Scion Growth in Apple // *Plants.* 2023. V. 12. № 2. P. 385.
<https://doi.org/10.3390/plants12020385>
13. *Konchekov E.M., Glinushkin A.P., Kalinitchenko V.P., Artem'ev K.V., Burmistrov D.E., Kozlov V.A., Kolik L.V.* Properties and Use of Water Activated by Plasma of Piezoelectric Direct Discharge // *Frontiers in Physics.* Frontiers Media S.A. 2021. V. 8.
<https://doi.org/10.3389/fphy.2020.616385>
14. *Artem'ev K.V., Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Borzosekov V.D., Gritsinin S.I., Davydov A.M., Kolik L.V., Konchekov E.M., Kossyi I.A., Lebedev Y.A., Moryakov I.V., Petrov A.E., Sarksyian K.A., Stepakhin V.D., Kharchev N.K., Shakhmatov V.A.* Synthesis of Nitrogen Oxides in a Subthreshold Microwave Discharge in Air and in Air Mixtures with Methane // *Plasma Physics Reports.* 2020. V. 46. № 3. P. 311.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X20030010>
15. *Анпилов А.М., Бархударов Э.М., Копьев В.А., Косский И.А., Силаков В.П.* // *Физика плазмы.* 2006. Т. 32. № 11. С. 1048.
16. *Anpilov A.M., Barkhudarov E.M., Kop'ev V.A., Kossyi I.A.* 28 ICPIG, July 15–20, 2007, Prague, Czech Republic.
17. *Anpilov A.M., Barkhudarov E.M., Kozlov Yu.N., Kossyi I.A., Misakyan M.A., Moryakov I.V., Smirnov M.G., Taktakishvili M.I., Temchin S.M.* // *Journal of Physics: Conf. Ser.* 2021. P. 012012.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2055/1/012012>
18. *Калвер Дж., Пумтс Дж.* Фотохимия. М., 1968.
19. *Anpilov A.M., Barkhudarov E.M., Bark Yu.B., Zadira-ka Yu.V., Christofi N., Kozlov Yu.N., Kop'ev V.A., Kossyi I.A., Silakov V.P., Taktakishvili M.I., Temchin S.M.* // *J. Phys. D.: Appl. Phys.* 2001. V. 34. P. 993.
20. *Анпилов А.М., Бархударов Э.М., Двоенко А.В., Козлов Ю.Н., Косский И.А., Моряков И.В., Тактакишвили М.И., Темчин С.М.* // *Успехи прикладной физики.* 2016. Т. 4. № 3. С. 265.
21. *Hatchard C.G., Parker C.A.* // *Proc. Roy. Soc., London.* 1956. V. A235. P. 518–536.
22. *Анпилов А.М., Бархударов Э.М., Козлов Ю.Н., Косский И.А., Мисакян М.А., Моряков И.В., Тактакишвили М.И., Тарасова Н.М., Темчин С.М.* // *Физика плазмы.* 2019. Т. 45. № 3. С. 268.
<https://doi.org/10.1134/S036729211902001X>
23. *Rabani J., Mulac W.A., Matheson M.S.* // *J. Phys. Chem.* 1965. V. 69. 53.