

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 537.528+632.08

УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2019 г. С. В. Коротков^{а,*}, М. Ю. Андрианова^б, А. К. Козлов^а,
Д. А. Коротков^а, Г. Л. Спичкин^с

^а Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

^б Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

^с ООО «НПО «Фитотехнология»
Россия, 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 27 литер А

*e-mail: korotkov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 30.11.2018 г.

После доработки 12.12.2018 г.

Принята к публикации 20.12.2018 г.

Рассмотрено высоковольтное устройство, предназначенное для генерации низкотемпературной плазмы в воде, насыщенной пузырьками воздуха. Оно содержит разрядную камеру и генератор импульсов напряжения с амплитудой ~30 кВ и фронтом нарастания ~5 мкс, способный на частоте в сотни герц формировать искровые разряды с энергией ~1 Дж. Описаны электрическая схема генератора разрядов в воде, обеспечивающая его высокую эффективность, и конструкция разрядной камеры, позволяющая формировать параллельные потоки воздуха через заполненный водой межэлектродный промежуток. Приведены результаты исследований электроразрядных процессов и результаты химического анализа проб воды, обогащенной продуктами плазмохимических реакций. Показана возможность ускоренного развития растений при поливе водой, прошедшей плазменную обработку.

DOI: 10.1134/S0032816219030212

Электроразрядная обработка воды в течение более 40 лет используется для ее обеззараживания [1–4 и др.]. В последние годы в России и за рубежом были проведены исследования [5–8 и др.], показывающие, что вода, прошедшая обработку низкотемпературной газоразрядной плазмой, может быть использована также и для ускорения роста растений. В описанных экспериментах продукты плазмохимических реакций создавались коронными или барьерными разрядами в атмосферном воздухе, а затем вводились в воду. Такая технология представляется технически сложной и недостаточно производительной из-за сравнительно малой мощности разрядов такого типа. Можно предположить, что более эффективными будут мощные искровые разряды, созданные непосредственно в водно-воздушной среде.

В данной статье приведены результаты исследования процессов обогащения воды продуктами плазмохимических реакций, генерируемыми непосредственно в воде путем создания мощных искровых разрядов в пузырьковых кластерах, образованных потоками воздуха.

Для проведения экспериментов применялась разрядная камера объемом ~1 л (рис. 1).

Камера заполнялась водопроводной водой 4. Прозрачные стенки 1 из оргстекла позволяли наблюдать развитие разрядов. Импульсы высокого напряжения прикладывались к расположенным в воде электродам 3 и 5. Высоковольтный электрод 3 был изготовлен из молибдена в виде диска Ø24 мм. Заземленный электрод был выполнен из нержавеющей стали. Он состоял из диска 6 и шести тонкостенных трубочек 5 с наружным диаметром 3 мм, которые были равномерно распределены по периметру диска 6.

Атмосферный воздух пропусклся под давлением через патрубок 7 и вводился в воду через трубочки 5. При этом в воде формировались потоки пузырьков воздуха 2. Расход воздуха мог варьироваться и выбирался таким образом, чтобы пузырьки были отделены друг от друга прослойками воды. Образующиеся пузырьковые кластеры пробивались при приложении импульса высокого напряжения. В результате в межэлектродном промежутке развивались искровые разряды.

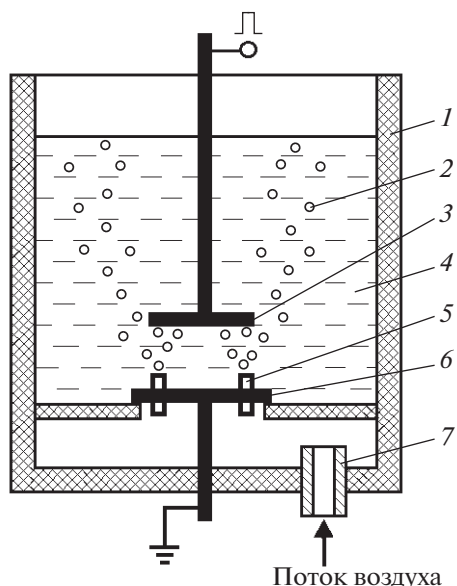


Рис. 1. Эскиз разрядной камеры. 1 — стенки из оргстекла; 2 — пузырьки воздуха; 3 — высоковольтный электрод; 4 — вода; 5 — трубчатые заземленные электроды; 6 — заземленный электрод в виде диска; 7 — патрубок.

В экспериментах разряды формировались с частотой до 500 Гц. При этом в камере визуально наблюдалось свечение между трубчатыми электродами 5 и электродом 6 с примерно одинаковой интенсивностью (см. рис. 2), что свидетельствует о равномерном вкладе энергии в разряд в каждом кластере. Обработанная разрядами вода активно перемешивалась в камере при воздействии ударных волн, обусловленных вводом энергии в каналы искровых разрядов.

Формирование электрических разрядов осуществлялось с помощью высоковольтного транзисторного генератора (размер $450 \times 750 \times 270$ мм), который был разработан на основе [9], но имел более высокий к.п.д. благодаря оптимизации выходной цепи и рекуперации энергии, остающейся в цепи транзисторов при изменении электрических характеристик разрядной камеры. Электрическая схема генератора приведена на рис. 3.

Генератор работает следующим образом. В исходном состоянии накопительный конденсатор C_2 разряжен через резистор R_4 и исходно замкнутые контакты $2P$ реле P . После приложения сетевого напряжения ~ 220 В осуществляется зарядка C_2 через резисторы R_2, R_3 (R_2 и $R_3 \ll R_4$), которые ограничивают зарядный ток на уровне, безопасном для диодов выпрямителя D_2 . С помощью R_1C_1 -цепи обеспечивается задержка срабатывания реле P , время которой превышает время зарядки C_2 до рабочего напряжения (~ 300 В). При включении реле P происходит размыкание кон-

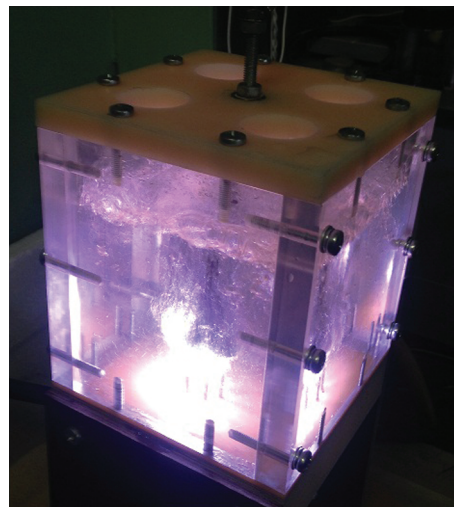


Рис. 2. Фотография разрядов в разрядной камере.

тактов $2P$ и замыкание контактов $1P, 4P$. В результате в рабочем режиме исключаются потери энергии в резисторах R_2-R_4 .

При включении блока транзисторов T_1 осуществляется импульсная зарядка конденсатора C_3 . Зарядный ток протекает через первичную обмотку w_1 повышающего трансформатора $Tr2$ и обеспечивает перемагничивание его сердечника до рабочего состояния. Диодный блок D_4 препятствует разряду C_3 через индуктивность L_1 после окончания процесса зарядки.

Напряжение зарядки конденсатора C_3 регулируется путем изменения момента выключения блока T_1 и достигает максимального значения (~ 600 В), если выключение T_1 происходит после прекращения тока в цепи индуктивности L_1 . Если T_1 выключается раньше, то протекающий через индуктивность L_1 ток коммутируется в цепь диода D_3 . При этом передача энергии из C_2 в C_3 прекращается, и конденсатор C_3 заряжается до меньшего напряжения.

После зарядки конденсатора C_3 включается блок транзисторов T_2 . При этом C_3 быстро (~ 5 мкс) разряжается через повышающий трансформатор $Tr2$, что обеспечивает зарядку конденсатора C_4 до высокого напряжения. В процессе зарядки это напряжение прикладывается к разрядной камере PK и инициирует пробой воды, насыщенной пузырьками воздуха. Напряжение пробоя зависит от межэлектродного расстояния и от плотности пузырьков воздуха.

Если пробой не успевает развиваться к моменту зарядки C_4 до максимального напряжения, то диодный блок D_7 исключает возможность его разряда через обмотку w_2 . При этом конденсатор C_4

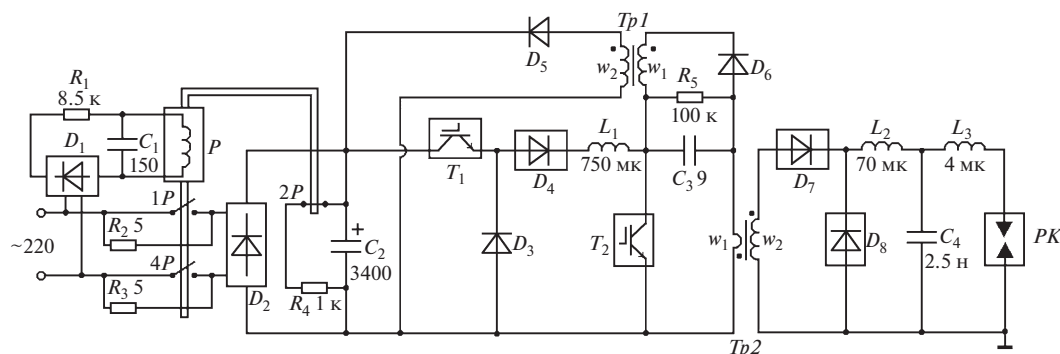


Рис. 3. Электрическая схема генератора импульсов высокого напряжения. *PK* – разрядная камера, *P* – реле ESB24-22; *T*₁ – IRGPS50B120RL (2 параллельно), *T*₂ – IRGPS50B120RL (6 параллельно); *D*₁ – KBPS1010, *D*₂ – KBPS3506, *D*₃, *D*₅, *D*₆ – 80APF12, *D*₄ – 80APF12 (2 параллельно), *D*₇ – HER508 (50 последовательно), *D*₈ – 80APS12 (40 последовательно); *Tr1* – феррит N87 фирмы Epcos, $K41.8 \times 26.2 \times 25$ мм, $w_1 = 7$, $w_2 = 70$, *Tr2* – сплав 9КСП, $K180 \times 60 \times 40$ мм, $w_1 = 1$, $w_2 = 60$.

сравнительно медленно разряжается через камеру *PK*, которая до пробоя межэлектродного промежутка имеет достаточно большое сопротивление.

Если *PK* пробивается раньше момента окончания процесса зарядки *C*₄, то конденсатор *C*₃ к моменту пробоя разряжается не полностью. Оставшаяся в нем энергия рекупируется в конденсатор *C*₂. Рекуперация осуществляется следующим образом. Так как после пробоя электрическое сопротивление *PK* очень мало, то *C*₃ быстро перезаряжается до обратного напряжения, которое прикладывается к первичной обмотке повышающего трансформатора *Tr1*. При этом напряжение на вторичной обмотке *Tr1* становится больше напряжения зарядки конденсатора *C*₂ и через диод *D*₅ протекает ток рекуперации. Большой коэффициент трансформации в *Tr1* обеспечивает коммутацию в *C*₂ фактически всей энергии обратного перезаряда конденсатора *C*₃.

После пробоя межэлектродного промежутка в камеру *PK* очень быстро (за доли микросекунды) коммутируется мощный (до 500 А) ток разряда конденсатора *C*₄. Его амплитуда и скорость нарастания ограничиваются сопротивлением *PK* и величиной индуктивности *L*₃ (индуктивность монтажных проводов). Так как сопротивление *PK* после пробоя очень мало, то конденсатор *C*₄ многократно перезаряжается по цепи *L*₃–*PK*. При этом практически вся запасенная в нем энергия рассеивается в камере *PK*. При зарядке используемого конденсатора *C*₄ = 2.5 нФ до рабочего напряжения 30 кВ величина коммутируемой в разряд энергии составляет ~1 Дж.

Диодный блок *D*₈ шунтирует трансформатор *Tr2* при возникновении на *C*₄ обратного напряжения. В результате устраняется возможность коммутации энергии в цепь его первичной обмотки.

Индуктивность *L*₂ (*L*₂ ≫ *L*₃) ограничивает амплитуду и скорость нарастания тока через блок *D*₈.

На рис. 4 приведены типичные осциллограммы тока и напряжения на *PK* в режиме работы генератора, когда в момент пробоя межэлектродного промежутка высокое напряжение не успевает достичь до максимального значения.

Нами были проведены исследования влияния обогащенной продуктами разрядов “плазменной” воды на развитие корневой системы семян гороха и тыквы. Семена гороха (сорт “Никитка”) были приобретены в ООО “Группа компаний “Гавриш”. Семена тыквы (сорт “Витаминная”) были получены из спелого плода и высушены в естественных условиях.

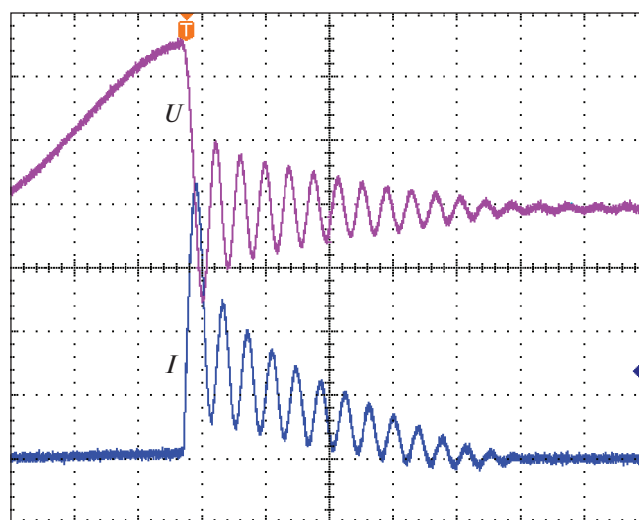


Рис. 4. Осциллограммы тока *I* и напряжения *U* на разрядной камере. Масштабы: по вертикали – тока 100 А/деление, напряжения 10 кВ/деление, по горизонтали – 1 мкс/деление.

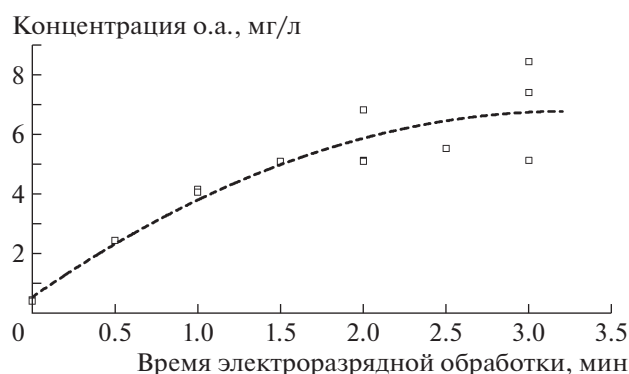


Рис. 5. График зависимости концентрации общего азота от времени электроразрядной обработки водопроводной воды.

При проведении сравнительных экспериментов по проращиванию семян гороха их замачивали в отстоянной водопроводной воде и в такой же воде, но прошедшей 3-минутную обработку в разрядной камере, т.е. в “плазменной” воде. Семена раскладывали в чашки Петри на слой ткани, пропитанной водопроводной или “плазменной” водой. Ежедневно в чашки Петри доливалось по 20 мл соответствующей воды.

В результате исследований было установлено, что наиболее быстро всходят и развиваются семена гороха, замачиваемые в “плазменной” воде. Данные о соотношении количества проросших семян к общему количеству семян для различных режимов замачивания:

Режим замачивания:	3-й день	4-й день	5-й день
в “плазменной” воде	0%	71%	96%
в водопроводной воде	0%	8%	67%

Интересными представляются результаты экспериментов с семенами тыквы, которые замачивались в тех же условиях, что и семена гороха. Отличие состояло в том, что до замачивания часть семян на 3 мин опускалась в разрядную камеру вблизи зоны с разрядом. На пятый день замачивания проросли только семена тыквы, предварительно обработанные в разрядной камере, а на семенах, замоченных в водопроводной воде, появились темные пятна плесени.

Хорошее состояние семян тыквы, предварительно обработанных в разрядной камере, свидетельствует о том, что в процессе обработки они подвергались эффективному обеззараживанию под воздействием ультрафиолетового излучения, ударных волн и сильных электрических полей. Более быстрое проращивание может быть обусловлено тем, что в результате обработки происходит модификация оболочки семян, ускоряющая поглощение воды и выход ростков.

Для оценки факторов влияния “плазменной” воды на развитие растений был проведен химический анализ проб водопроводной воды до и после плазменной обработки. Воду отбирали из водопровода в здании в бутылки объемом 5–10 л после ее предварительного слива из сети в течение 5 мин для того, чтобы не захватить в емкость продукты коррозии стенок труб (в застойных участках водопровода они могут повышать содержание железа общего до 1/4 мг/л [10]). Затем воду отстаивали в течение ночи в открытой емкости. Обработку воды в разрядной камере проводили 6 раз длительностью от 0.5 до 3 мин. Отобранные пробы обработанной воды и воды до обработки хранили при комнатной температуре и анализировали в течение одного дня после эксперимента.

В пробах определяли удельную электропроводность (э.п.) на кондуктометре HI 8733 (HANNA Instruments, Австрия), водородный показатель на pH-метре-иономере I-500 (“Аквион”, Россия), концентрации: общего азота (о.а.) на анализаторе TOC-Lcpn с приставкой TNM-L (Shimadzu, Япония), главных ионов воды на системе капиллярного электрофореза Капель103P (“Люмекс”, Россия – по методикам М 01-31-2011 и ПНД Ф 14.1:2.4.157-99) и железа общего (по методике ГОСТ 4011-72).

Химический анализ показал, что в течение 3 мин электроразрядной обработки э.п. водопроводной воды практически линейно увеличивалась с 110 до 260 мкСм/см, а pH снижался с 6.6 до 3.6. Также было обнаружено возрастание концентрации общего железа (до 5 мг/л) – вероятно из-за коррозии электродов. Большая часть железа содержалась в частицах, 60% из которых оседали в столбе воды 10 см в течение 30 мин и более 90% – в течение ночи.

Изменения концентраций ионов натрия, калия, магния, кальция, хлоридов, сульфатов были в пределах погрешности методик или близки к ним, так что увеличение э.п. воды можно объяснить образованием азотсодержащих кислот.

О.а. был представлен нитратами и нитритами, что, по нашему мнению, является одним из факторов, способствующих развитию растений. Концентрация о.а. возросла от 0.5 до 8.4 мг/л и слабо изменялась в конце процесса электроразрядного воздействия (см. рис. 5).

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что рассмотренное достаточно простое высоковольтное устройство осуществляет обогащение воды продуктами плазмохимических реакций. При использовании обогащенной воды для полива растений обеспечивается их ускоренный рост и развитие.

Достигнутая большая допустимая частота следования электрических разрядов (500 Гц) позволяет осуществлять эффективную плазменную об-

работку проточной воды, что создает определенные перспективы для применения разработанного устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жук Е.Г. // Микробиология, эпидемиология и иммунология. 1971. № 1. Т. 48. С. 99.
2. Schoenbach K.H., Peterkin F.E., Kildew R.W., Beebe S.J. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. № 2. P. 284.
3. Efremov N.M., Adamiak B.Yu., Blochin V.I., Dadeshev S.Je., Dmitriev K.I., Semjonov K.N., Levachov V.F., Jusbashev V.F. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. V. 28. № 1. P. 224.
4. Коликов В.А., Курочкин В.Е., Панина Л.К., Рутберг А.Ф., Рутберг Ф.Г., Снетов В.Н., Стогов А.Ю. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 2. С. 118.
5. Park D.P., Davis K., Gilani S., Alonzo C.-A., Dobrynin D., Friedman Gary, Fridman A., Rabinovich A., Fridman G. // Current Appl. Phys. 2013. V. 13. P. 19.
6. Preis S., Panorel I., Llauger Coll, S., Kornev I. // Ozone Science and Engineering. 2014. V. 36 (1). P. 94.
7. Peethambaran B., Han J., Kermalli K., Jiaying J., Fridman G. // Plasma Medicine. 2015. V. 5 (2–4). P. 87.
8. Галиуллин Р.Р., Шарифуллин Ф.С., Нагмутдинова А.И., Вознесенский Э.Ф. // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 22. С. 154.
9. Коротков С.В., Аристов Ю.В., Козлов А.К., Коротков Д.А., Рольник И.А. // ПТЭ. 2011. № 2. С. 47.
10. Andrianova M.Ju., Molodkina L.M., Chusov A.N. // Appl. Mechanics and Materials. 2014. V. 587–589. P. 573.