

Н.И. Бойко, А.В. Макогон

## МИКРО- И НАНОСЕКУНДНЫЕ РАЗРЯДЫ В ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЯХ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ И ОЧИСТКИ ВОДЫ

*Мета. Порівняння електричних кіл експериментальних установок для одержання мікро- та наносекундних розрядів в газових бульках у воді і порівняння одержаних експериментальних результатів знезараження води за допомогою таких розрядів. Методика. Для отримання високовольтних імпульсів на навантаженні у вигляді бульок газу і шару води з частотою більше 2000 імпульсів за секунду запропоновано спосіб генерації мікро- та наносекундних імпульсів з використанням генераторів імпульсів високої напруги на основі імпульсного трансформатора за схемою Тесла з транзисторним розмикаючим перемикачем IGBT в низьковольтній частині кола. Резистор, що обмежує струм, з опором  $R_{cl} = 24$  кОм використовується для захисту транзисторного перемикача при міросекундних розрядах. При наносекундних розрядах багатозарний іскровий розрядник використовується для загострення фронту імпульсів високої напруги. Ми використовували смісний діляник напруги з коефіцієнтом ділення  $K_d = 7653$  для вимірювання імпульсів напруги, шунт з опором  $R_s = 2,5$  Ом – для вимірювання імпульсів струму. В якості записуючого пристрою використовувався цифровий осцилограф RIGOL DS1102E зі смугою пропускання 100 МГц. Результати. Експериментально досліджено вплив мікро- і наносекундних розрядів в газових бульках на мікроорганізми. Вдалося зменшити біохімічне споживання кисню водою при міросекундних розрядах, знизити мутність води, покращити органолептичні показники. Енергія, що виділяється в одному імпульсі при міросекундних розрядах, складає  $W_\mu \approx 17$  мДж, а при наносекундних розрядах –  $W_n \approx 7,95$  мДж. При наносекундних розрядах досягнуто повної інактивациі бактерій *E.coli*. Знезаражуюча і очищуюча дія наносекундних імпульсів краща порівняно з міросекундними імпульсами із-за збільшення амплітуди імпульсної напруги до 30 кВ, а імпульсного струму до 35 А. Наукова новизна. Експериментально показана можливість ефективного мікробіологічного знезараження води за допомогою наносекундних розрядів в газових бульках при малих питомих витратах енергії. Практична значущість. Одержані експериментальні результати щодо знезараження води за допомогою мікро- і наносекундних розрядів відкривають перспективу промислового застосування установок з використанням таких розрядів для знезараження і очистки стічних вод, басейнів та доочистки водопровідної води. Бібл. 9, рис. 3.*

*Ключові слова: високовольтний генератор, мікро- і наносекундні імпульси, розряд в газових бульках у воді, знезараження та очистка води розрядами, інактивациія мікроорганізмів.*

*Цель. Сравнение электрических схем экспериментальных установок для получения микро- и наносекундных разрядов в газовых пузырях в воде и сравнение полученных экспериментальных результатов обеззараживания воды при помощи таких разрядов. Методика. Для получения высоковольтных импульсов на нагрузке в виде пузырьков газа и слоя воды с частотой более 2000 импульсов в секунду предложен способ генерации микро- и наносекундных импульсов с использованием генераторов импульсов высокого напряжения на основе импульсного трансформатора по схеме Тесла с транзисторным размыкающим переключателем IGBT в низковольтной части цепи. Токоограничивающий резистор с сопротивлением  $R_{cl} = 24$  кОм используется для защиты транзисторного переключателя при микросекундных разрядах. При наносекундных разрядах многозарный искровой разрядник используется для обострения фронта импульсов высокого напряжения. Мы использовали емкостный делитель напряжения с коэффициентом деления  $K_d = 7653$  для измерения импульсов напряжения, шунт с сопротивлением  $R_s = 2,5$  Ом – для измерения импульсов тока. В качестве записывающего устройства использовался цифровой осциллограф RIGOL DS1102E с полосой пропускания 100 МГц. Результаты. Экспериментально исследовано влияние микро- и наносекундных разрядов в газовых пузырях на микроорганизмы. Удалось уменьшить биохимическое потребление кислорода воды при микросекундных разрядах, снизить мутность воды, улучшить органолептические показатели. Энергия, выделяемая в одном импульсе при микросекундных разрядах, составляет  $W_\mu \approx 17$  мДж, а при наносекундных разрядах –  $W_n \approx 7,95$  мДж. При наносекундных разрядах достигнута полная инактивация бактерий *E.coli*. Обеззараживающее и очищающее действие наносекундных импульсов лучше по сравнению с микросекундными импульсами из-за увеличения амплитуды импульсного напряжения до 30 кВ, а импульсного тока до 35 А. Научная новизна. Экспериментально показана возможность эффективного микробиологического обеззараживания воды при помощи наносекундных разрядов в газовых пузырях при малых удельных затратах энергии. Практическая значимость. Полученные экспериментальные результаты по обеззараживанию воды при помощи микро- и наносекундных разрядов открывают перспективу промышленного применения установок с использованием таких разрядов для обеззараживания и очистки сточных вод, бассейнов и доочистки водопроводной воды. Библ. 9, рис. 3.*

*Ключевые слова: высоковольтный генератор, микро- и наносекундные импульсы, разряд в газовых пузырях в воде, обеззараживание и очистка воды разрядами, инактивациія микроорганизмов.*

**Введение.** В современном мире постоянно ведутся поиски новых энергосберегающих технологий для обеззараживания и очистки воды. Одна из перспективных и актуальных технологий этого направления – технология обработка воды при помощи микро- и наносекундных разрядов в газовых пузырях [1-3].

Применение коротких электрических импульсов напряжения (тока) для обработки воды позволяет избежать больших омических потерь из-за ее нагрева, увеличить электрическую прочность разрядного про-

межутка, способствуя тем самым получению сильных электрических полей с напряженностью  $E \geq 30$  кВ/см в нагрузке в виде газового пузыря и слоя воды. Сильные электрические поля инактивируют микроорганизмы в воде, вызывая при этом необратимое порообразование в мембранах клеток микроорганизмов, а также воздействуют на внутриклеточное содержимое, включая воздействие на их РНК и ДНК [4].

© Н.И. Бойко, А.В. Макогон

Импульсный электрический разряд является также источником широкополосного излучения. Из работ [5, 6] следует, что такое излучение оказывает повреждающие действия на бактерии, приводя к их деградации и разрушению, и, тем самым, повышая эффективность микробиологического обеззараживания воды.

Микро- и наносекундные разряды в газовых пузырях внутри обрабатываемого объема воды вызывают образование активных микрочастиц с высоким значением окислительного потенциала, измеряемого в вольтах. Наибольшее значение окислительного потенциала для озона ( $O_3$ ) составляет 2,07 В, для атомарного кислорода ( $O$ ) – 2,42 В, для гидроксила ( $OH$ ) – 2,85 В и для пероксида водорода ( $H_2O_2$ ) – 1,77 В [7].

Озонирование широко применяется для обеззараживания питьевой воды, а также воды в бассейнах. Однако, гидроксилы  $OH$ , которые образуются в разрядах в присутствии воды, имеют более высокий окислительный потенциал и способны разрушать стойкие химические соединения, в отличие от озона

[8]. Использование  $OH$  может повысить эффективность обеззараживания и химической очистки воды. Время жизни частиц  $OH$  в воздухе составляет сотни микросекунд. Поэтому радикалы должны создаваться в непосредственной близости от поверхности раздела воды и газовых пузырей в ней [1, 9].

Установки с применением такого типа разряда могут найти широкое применение для очистки сточных вод, бассейнов и доочистки водопроводной воды.

**Цель работы** – сравнение электрических схем экспериментальных установок для получения микро- и наносекундных разрядов в газовых пузырях в воде, а также сравнение полученных экспериментальных результатов обеззараживания воды при помощи таких разрядов.

**Электрические схемы экспериментальных установок.** На рис. 1, а, б представлены электрические схемы экспериментальных установок для обработки воды при помощи микро- и наносекундных разрядов в газовых пузырях [2, 3].

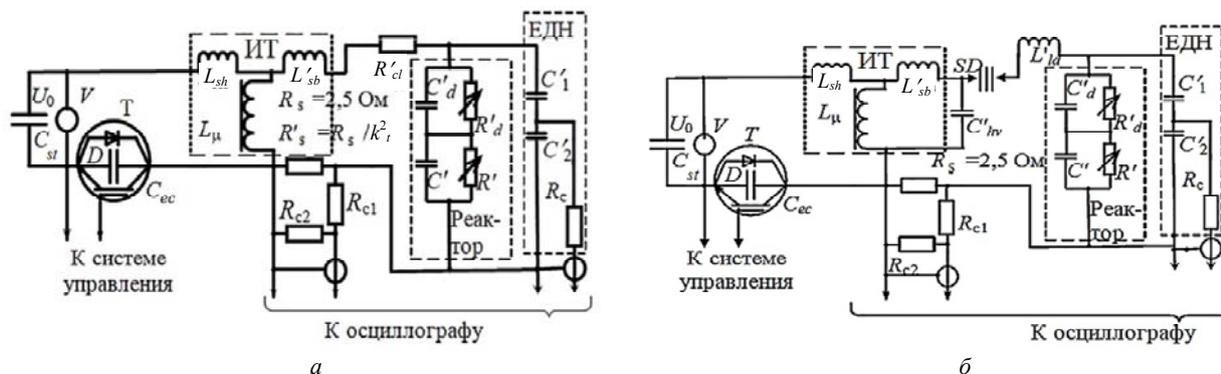


Рис. 1. Электрические схемы экспериментальных установок для обработки воды при помощи разрядов в газовых пузырях: а – микросекундных; б – наносекундных

На рис. 1, а, б емкость  $C_{st}$  заряжается от сети (220 В, 50 Гц) до напряжения  $U_0$ .  $T$  – транзисторный ключ из IGBT – транзисторов типа IRG4PH50UD, работающий как размыкатель. Импульсный трансформатор (ИТ) по схеме Тесла представлен в виде схемы замещения, где  $L_{\mu}$  – индуктивность намагничивания;  $L_{sh}$ ,  $L'_{sb}$  – индуктивности рассеяния первичной и приведенная индуктивность рассеяния вторичной обмотки;  $D$  – встроенные в транзисторы обратные диоды IGBT-ключа;  $C_{ec} \geq 1$  нФ – емкость «эмиттер–коллектор» IGBT-ключа;  $C'_d < C_{ec} < C_{st}$ ;  $R'_s$  – приведенное сопротивление измерительного шунта в высоковольтном контуре генератора;  $R_{c1} = 300$  Ом,  $R_{c2} = 60$  Ом – согласующие сопротивления шунта  $R_s = 2,5$  Ом;  $C'_1$ ,  $C'_2$  – приведенные емкости высоковольтного и низковольтного плеч емкостного делителя напряжения (ЕДН) с согласующим сопротивлением  $R_c$ . При этом не приведенные (т.е. реальные) значения емкостей составляли  $C_1 \approx 2,7 \cdot 10^{-12}$  Ф,  $C_2 = 20,4 \cdot 10^{-9}$  Ф, а коэффициент деления ЕДН –  $K_d \approx 7650$ . В электрической схема реактора  $C_d$ ,  $R_d$  – емкость и нелинейное активное сопротивление разрядного промежутка (РП), а  $C$ ,  $R$  – емкость и нелинейное активное сопротивление слоя воды между РП и низковольтным (заземленным) электродом ( $C'_d$ ,  $R'_d$ ,  $C'$ ,  $R''$  – приведенные к первичной обмотке ИТ значения этих величин) соответственно.

**Принципиальные отличия электрических схем экспериментальных установок.** В схеме на рис. 1, а использован токоограничивающий резистор с сопротивлением  $R'_{cl} = 24$  кОм для защиты транзисторного ключа по току. Выделение активной мощности на резисторе приводит к дополнительным омическим потерям.  $C_{st} = 940$  мкФ (2 конденсатора TAMIACON 470 мкФ параллельно),  $T$  – транзисторный ключ состоит из 2 включённых в параллель транзисторов. В схеме на рис. 1, б  $C_{st} = 4230$  мкФ (9 конденсаторов TAMIACON 470 мкФ, параллельно), транзисторный ключ  $T$  состоит из четырех параллельно включенных транзисторов. Длительность импульса, фронт и форма определяются разрядным контуром  $C_{hv} - SD - L_{ld} - (R_d \text{ в параллель с } C_d) - (R \text{ в параллель с } C) - R_{sh} - C_{hv}$ . Обострение фронта импульсов происходит при срабатывании многоканального многозазорного искрового разрядника  $SD$ . Расстояние между зазорами 1 мм, есть возможность регулировки, число  $n$  зазоров  $1 \leq n \leq 5$ . Длительность импульсов определяется наличием в разрядном контуре малоиндуктивного емкостного накопителя энергии  $C_{hv} = 150$  пФ, собранного из шести конденсаторов КВИ-2 емкостью 100 пФ каждый, рассчитанных на напряжение 20 кВ (две последовательные цепочки по три конденсатора в параллель). Все напряжение с  $C_{hv}$  прикладывается к

последовательно соединенным разряднику  $SD$  и разрядному промежутку РП в реакторе – газовому пузырю в воде. Индуктивность  $L_{id}$  нагрузочного разрядного контура составляет  $L_{id} \approx 0,5$  мкГн.

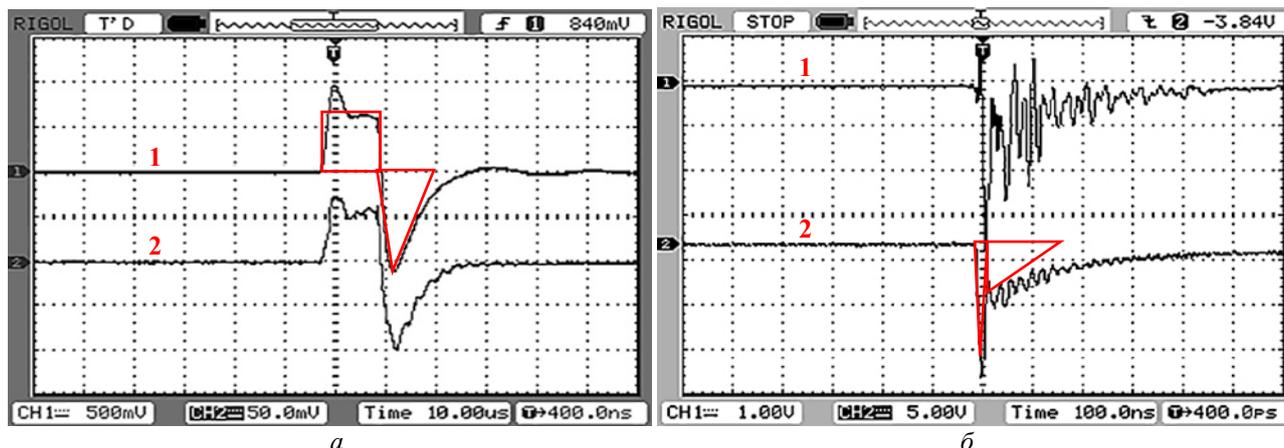


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения (кривые 1) и тока (кривые 2):  
 а – при микросекундных разрядах; б – при наносекундных разрядах

При микросекундных разрядах (см. рис. 2,а) амплитуда напряжения достигает 8 кВ, а амплитуда тока составляет 0,2 А при частоте следования импульсов  $f \approx 2200$  Гц. Цена деления по оси процесса для осциллограмм напряжения составляет 4 кВ/дел, а для осциллограмм тока – 0,1 А/дел. Осциллограммы напряжения и тока в нагрузке (в виде рабочей камеры с водой, обрабатываемой микросекундными разрядами) имеют форму биполярных импульсов.

При наносекундных разрядах амплитуда (см. рис. 2,б) напряжение на нагрузке достигает 30 кВ, а амплитуда тока составляет 35 А при частоте следования импульсов  $f \approx 2200$  Гц. Цена деления по оси процесса для осциллограмм напряжения составляет 7,9 кВ/дел, а для осциллограмм тока – 11,7 А/дел. При наносекундных разрядах форма импульсов напряжения и тока в нагрузке близка к затухающей экспоненте с крутым фронтом и с наложенными колебаниями. Для регистрации импульсов напряжения использовали ёмкостный делитель напряжения с коэффициентом деления  $K_d = 7653$ , а для регистрации импульсов тока – шунт с сопротивлением  $R_s = 2,5$  Ом ( $R_{c1} = 300$  Ом,  $R_{c2} = 60$  Ом – согласующие сопротивления шунта). В качестве регистрирующего устройства использовался цифровой осциллограф RIGOL DS1102E с полосой пропускания 100 МГц.

Ток и напряжение на осциллограммах рис. 2,а,б близки по форме и практически не сдвинуты друг относительно друга по времени. В первом приближении можно считать, что нагрузка имеет активный характер и вся энергия  $W$  выделяется в рабочей камере. Рассчитаем энергию  $W$ , исходя из соотношения вида

$$W = \int_0^t U(t) \cdot i(t) dt.$$

Для оценочного расчета энергии положительную часть импульсов на рис. 2,а представим в виде двух прямоугольных областей со сторонами по оси времени  $t_1 \approx 10$  мкс, а отрицательную – в виде двух треугольных областей с тем же размером основания по

**Экспериментальные результаты.** На рис. 2,а,б приведены осциллограммы импульсов напряжения (тока), полученные при обеззараживающей обработке воды при помощи микро- и наносекундных разрядов.

оси времени  $t_2 \approx 10$  мкс. Тогда энергию  $W_\mu$  импульса определим как сумму площадей выбранных областей  $W_\mu \approx U \cdot I \cdot t_1 + 0,5 \cdot U \cdot I \cdot t_2 \approx 6000 \text{ В} \cdot 0,15 \text{ А} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{ с} + 0,5 \cdot 8000 \text{ В} \cdot 0,2 \text{ А} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{ с} \approx (0,009 + 0,008) \text{ Дж} \approx 17 \text{ мДж}$ .

Осциллограммы рис. 2,б с наносекундными импульсами для оценочного расчета энергии импульса разобьем на треугольные области. Первые две треугольные области выберем на фронте, когда ток и напряжение на нагрузку достигают максимальных значений за время  $t_1 \approx 10$  нс. Для учета энергии импульса, выделяемой в нагрузке на пологой части спада импульса, выберем вторые две треугольные области с длительностью по оси времени  $t_2 \approx 150$  нс, где амплитуды напряжения и тока достигают значений  $U_2 \approx 6$  кВ,  $I_2 \approx 6$  А соответственно. Энергию  $W_n$ , выделяемую в каждом наносекундном импульсе, определим как сумму площадей выбранных областей  $W_n \approx 0,5 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot t_1 + 0,5 \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot t_2 \approx (0,5 \cdot 30000 \cdot 35 \cdot 10 \cdot 10^{-9} + 0,5 \cdot 6000 \cdot 6 \cdot 150 \cdot 10^{-9}) \approx (0,00525 + 0,0027) \text{ Дж} \approx 7,95 \text{ мДж}$ .

Отношение энергии  $W_\mu$ , выделяемой в нагрузке при каждом микросекундном импульсе, к энергии  $W_n$ , выделяемой в нагрузке при каждом наносекундном импульсе, в данной работе равно  $W_\mu/W_n \approx 17/7,95 \approx 2,1$ .

За счет увеличения электрической прочности разрядного промежутка в газовых пузырях при наносекундных импульсах удалось получить на нагрузке импульсные напряжения с амплитудой 30 кВ. Работа схемы без защитного сопротивления, увеличение электрической прочности промежутка и уменьшение емкостного сопротивления воды при наносекундных импульсах позволили, по сравнению с микросекундными импульсами, увеличить амплитуду тока в 175 раз и достичь ее значения в 35 А. Поэтому обеззараживающее и очищающее действие наносекундных импульсов лучше по сравнению с микросекундными импульсами. И это достигается при существенно меньшей энергии в наносекундном импульсе. В микросекундных импульсах большая часть энергии расходуется менее эффективно: степень обеззараживания воды меньше, а нежелательный нагрев воды больше.

На рис. 3,а,б показано свечение при наносекундных и микросекундных разрядах в газовых пузырях в воде. Установлено, что интенсивность свечения при



а



б

Рис. 3. Разряды в газовом пузыре: а – наносекундные импульсы; б – микросекундные импульсы

Проведено ряд экспериментов по микробиологическому обеззараживанию и очистке воды при помощи микро- и наносекундных разрядов в газовых пузырях. При очистке воды (забор образца производился из реки Харьков в объеме 3 л) при помощи микросекундных разрядов в газовых пузырях (см. рис. 2,а) время обработки составляло 10 минут, обрабатываемый объем 1,5 л (три порции по 0,5 л). Обработанную воду фильтровали бумажным фильтром перед отправкой в лабораторию (КП «Санэпидсервис», г. Харьков). Биохимическое потребление кислорода уменьшилось с 3,84 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> (в контрольном образце) до 3,67 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> (в обработанных образцах), при норме ≤6 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, т.е. удалось доочистить исходно достаточно чистую воду. Снизилась мутность воды, улучшились органолептические свойства воды. При обработке температура воды повышалась на 17-20 °С.

При обработке водопроводной воды, обсемененной бактериями *E.coli* с разведением 10<sup>8</sup> в 3 л воды (в КП «Санэпидсервис», г. Харьков), при помощи наносекундных разрядов (см. рис. 2,б) в газовых пузырях, время обработки составило 7 минут, объем обрабатываемого материала 1,5 л (три порции по 0,5 л), достигнута полная (100 %-ная) инактивация бактерий. Температура обработанной воды повышалась на 7-8 °С.

Оценочная энергия, выделяемая в нагрузку при обработке воды с помощью разрядов в газовых пузырях в случае использования наносекундных разрядов, была примерно в 2,1 раза меньше, чем при использовании микросекундных разрядов. Поэтому и нагрев воды при наносекундных разрядах оказывается также меньше. Частота следования импульсов была одинакова для обоих режимов обработки, включающих соответственно нано- и микросекундные разряды.

**Выводы.** Результаты проведенных экспериментов по обеззараживанию и очистке воды при помощи микро- и наносекундных разрядов в газовых пузырях показали перспективность дальнейшего изучения и практического применения данных типов разрядов. Более перспективными для промышленного применения представляются наносекундные разряды. При использовании наносекундных разрядов достигнута полная инактивации бактерий *E.coli*, нагрев воды не-

значителен, а интенсивность широкополосного излучения при таких разрядах, по сравнению с микросекундными разрядами, выше вследствие больших амплитуд импульсных токов и амплитуд напряженностей импульсного электрического поля. Энергия в импульсе при наносекундных разрядах в 2,1 раза меньше, чем при микросекундных разрядах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gershman S., Mozhgina O., Belkind A., Becker K., Kunhardt E. Pulsed Electrical Discharge in Bubbled Water // Contributions to Plasma Physics. – 2007. – vol.47. – no. 1-2. – pp. 19-25. doi: 10.1002/ctpp.200710004.
2. Boyko N.I., Makogon A.V. Experimental plant for water purification with the help of discharges in gas bubbles // Technical Electrodynamics. – 2017. – no.5. – pp. 89-95. doi: 10.15407/techned2017.05.089.
3. Boyko N.I., Makogon A.V. Generator of high-voltage nanosecond pulses with repetition rate more than 2000 pulses per second for water purification by the discharges in gas bubbles // Technical Electrodynamics. – 2018. – no.4. – pp. 37-40. doi: 10.15407/techned2018.04.037.
4. Boyko M.I., Makogon A.V., Marynin A.I. Energy efficiency of the disinfection treatment of liquid foodstuffs by high-voltage pulse effects // Electrical engineering & electromechanics. – 2018. – no.3. – pp. 53-60. doi: 10.20998/2074-272X.2018.3.07.
5. Трофимова С.В., Иванова И.П., Бугрова М.Л. Анализ структурных изменений прокариотических и эукариотических клеток под действием излучения плазмы искрового разряда // Фундаментальные исследования. – 2013. – №4(часть 1). – С. 130-133.
6. Иванова И.П., Трофимова С.В., Пискарев И.М., Бурхина О.Е., Сысоева В.А., Карпель Вель Лейтнер Н. Исследование механизмов биоцидного действия излучения плазмы искрового разряда // Современные технологии в медицине. – 2012. – №3. – С. 12-18.
7. [http://www.chem.msu.su/rus/handbook/redox/elem\\_dat/o.html](http://www.chem.msu.su/rus/handbook/redox/elem_dat/o.html).
8. Nazarenko O.B., Shubin E.G. Investigation of Electric Discharge Treatment of Water for Ammonium Nitrogen Removal // Proceedings of the 2nd Environmental Physics Conference. – 18-22 Feb. 2006, Alexandria, Egypt. – pp. 85-90.
9. Яворовский Н.А., Корнев Я.И., Прейс С.В., Пельцман С.С., Хаскельберг М.Б., Чен Б.Н. Импульсный барьерный разряд как метод обработки воды: активные частицы-окислители в водо-воздушном потоке // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т.309. – №2. – С. 108-113.

## REFERENCES

1. Gershman S., Mozgina O., Belkind A., Becker K., Kunhardt E. Pulsed Electrical Discharge in Bubbled Water. *Contributions to Plasma Physics*, 2007, vol.47, no. 1-2, pp. 19-25. doi: [10.1002/ctpp.200710004](https://doi.org/10.1002/ctpp.200710004).
2. Boyko N.I., Makogon A.V. Experimental plant for water purification with the help of discharges in gas bubbles. *Technical Electrodynamics*, 2017, no.5, pp. 89-95. doi: [10.15407/techned2017.05.089](https://doi.org/10.15407/techned2017.05.089).
3. Boyko N.I., Makogon A.V. Generator of high-voltage nanosecond pulses with repetition rate more than 2000 pulses per second for water purification by the discharges in gas bubbles. *Technical Electrodynamics*, 2018, no.4, pp. 37-40. doi: [10.15407/techned2018.04.037](https://doi.org/10.15407/techned2018.04.037).
4. Boyko M.I., Makogon A.V., Marynin A.I. Energy efficiency of the disinfection treatment of liquid foodstuffs by high-voltage pulse effects. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.3, pp. 53-60. doi: [10.20998/2074-272X.2018.3.07](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.3.07).
5. Trofimova S.V., Ivanova I.P., Bugrova M.L. The analysis of structural changes of prokaryotic and eukaryotic cell under the influence of plasma spark radiation. *Fundamental research*, 2013, no.4(part 1), pp. 130-133. (Rus).
6. Ivanova I.P., Trofimova S.V., Piskaryov I.M., Burkhina O.E., Sysoeva V.A., Karpel Vel Leitner N. The Study of Bircidal Mechanisms of Spark Discharge Plasma Radiation. *Modern Technologies in Medicine*, 2012, no.3, pp. 12-18. (Rus).
7. Available at: [http://www.chem.msu.su/rus/handbook/redox/elem\\_dat/o.html](http://www.chem.msu.su/rus/handbook/redox/elem_dat/o.html) (accessed 13 June 2018). (Rus).
8. Nazarenko O.B., Shubin E.G. Investigation of Electric Discharge Treatment of Water for Ammonium Nitrogen Removal. *Proceedings of the 2nd Environmental Physics Conference*, 18-22 Feb. 2006, Alexandria, Egypt, pp. 85-90.
9. Iavorovskii N.A., Kornev Ya.I., Preis S.V., Pel'tsman S.S., Khaskel'berg M.B., Chen B.N. Pulsed barrier discharge as a method of water treatment: active particles-oxidizing agents in the water-air flow. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol.309, no.2, pp. 108-113. (Rus).

Поступила (received) 27.02.2019

Бойко Николай Иванович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Макогон Артём Витальевич<sup>1</sup>, аспирант,

<sup>1</sup> Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,  
тел/phone +380 57 7076245, e-mail: qnaboyg@gmail.com

M.I. Boyko<sup>1</sup>, A.V. Makogon<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

**The micro- and nanosecond discharges in gas bubbles for water disinfection and purification.**

**Purpose.** Comparison of electrical circuits of experimental plants for obtaining micro- and nanosecond discharges in gas bubbles in water and comparing the experimental results obtained for disinfecting water using such discharges. **Methodology.** To obtain high-voltage pulses on the load in the form of a gas bubbles and a layer of water with a frequency of more than 2000 pulses per second, a method of generating micro- and nanosecond pulses using high-voltage pulse generators based on a pulse transformer (PT) according to Tesla, with a transistor opening switch IGBT in the low-voltage part of the circuit. A current-limiting resistor with a resistance  $R_{cl} = 24 \text{ k}\Omega$  is used to protect the transistor switch at microsecond discharges. At nanosecond discharges, a multi-gap spark gap is used to sharpen the front of high-voltage pulses. We used a capacitive voltage divider with a division factor of  $K_d = 7653$  to measure voltage pulses, a shunt with a resistance of  $R_s = 2.5 \text{ }\Omega$  for measuring current pulses. RIGOL DS1102E digital oscilloscope with a 100 MHz bandwidth was used as a recording device. **Results.** The effect of micro- and nanosecond discharges in gas bubbles on microorganisms was experimentally investigated. It was possible to reduce the biochemical oxygen consumption of water during microsecond discharges, reduce the turbidity of water, and improve its organoleptic qualities. The energy released in a single pulse with microsecond discharges  $W_u \approx 17 \text{ mJ}$ , with nanosecond discharges  $W_n \approx 7.95 \text{ mJ}$ . At nanosecond discharges, complete inactivation of *E.coli* bacteria was achieved. The disinfecting and purifying action of nanosecond pulses is better compared to microsecond pulses due to an increase in the amplitude of the pulsed voltage up to 30 kV, and a pulsed current of up to 35 A. **Originality.** The possibility of effective microbiological disinfection of water using nanosecond discharges in gas bubbles at low specific energy consumption has been experimentally shown. **Practical value.** The obtained experimental results on water disinfection using micro- and nanosecond discharges offer the prospect of industrial application of installations using such discharges for disinfecting and purification wastewater, swimming pools, and post-treatment of tap water. References 9, figures 3.

**Key words:** high-voltage generator, micro- and nanosecond pulses, discharge in gas bubbles in water, disinfection and water purification by discharges, inactivation of microorganisms.