

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ПРИ ПОМОЩИ РАЗРЯДОВ В ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЯХ

**Н.И. Бойко**, докт. техн. наук, **А.В. Макогон**  
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
ул. Кирпичева, 2, Харьков, 61002, Украина,  
e-mail: [qnaboyg@gmail.com](mailto:qnaboyg@gmail.com); [boyko@kpi.kharkov.ua](mailto:boyko@kpi.kharkov.ua)

*Экспериментально исследованы зависимости тока и напряжения от времени в разрядах в газовых пузырях в воде, используемых для ее очистки. Показано, что на фронте импульсов тока при разрядах в пузырях есть излом, после которого скорость нарастания тока резко возрастает. Достигнута частота следования разрядов в пузырях 10000 имп/с при амплитуде напряжения 8 кВ на реакторе – нагрузке генератора экспериментальной установки и токах 0,2 А в высоковольтном разрядном контуре с разрядами в газовых пузырях. Достигнута высокая степень очистки воды, использованной в коксовом производстве, от фенолов и роданидов. Показана возможность улучшения органолептических показателей воды и уменьшения биохимического потребления кислорода ею. Библ. 12, табл. 1, рис. 5.*

**Ключевые слова:** разряд в газовых пузырях в воде, экспериментальная установка, генератор, реактор, импульсный трансформатор, очистка воды разрядами.

**Введение.** В современных электротехнологиях широко используются коронный и барьерный разряды [1, 2, 11, 12]. Разряды непосредственно в воде, имеющей относительную диэлектрическую проницаемость 81, достаточно высокую удельную электропроводность и электрическую прочность, энергетически не выгодны [7, 10]. Достижимая частота следования разрядов в воде существенно меньше, чем в газах. Также существует возможность нежелательного электрогидравлического эффекта. Привлекательным представляется разряд в газовых пузырях (с характерным линейным размером 1–4 см, например) внутри воды. При этом в газовом пузыре возникают активные микрочастицы (электроны, атомарный кислород, гидроксилы ОН, озон и др.), а также широкополосное излучение, непосредственно воздействующие на окружающую воду, что позволяет ожидать уменьшения удельных энергозатрат на очистку, обеззараживание воды по сравнению с традиционными методами очистки. Возможность получения такого разряда показана в [3].

**Целью данной работы** является экспериментальное исследование характеристик разрядов в газовых пузырях в воде, используемых для ее очистки.

**Экспериментальная установка.** Установка содержит компактный генератор высоковольтных импульсов (ГВИ) [4], реактор, где осуществляется очистка воды при помощи разрядов в газовых пузырях в ней, компрессор, насос, шланги, бак с водой, подлежащей очистке. ГВИ включает в себя генератор исходных импульсов, импульсный трансформатор (ИТ) по схеме Тесла с ферромагнитным магнитопроводом, а его нагрузкой служит реактор с прокачиваемой водой, в которой расположена электродная система с острым высоковольтным электродом и кольцевым заземленным электродом. Использовались острия двух типов: заостренная медная полоска толщиной 50 мкм и «метелка» из посеребренных медных проволок с диаметром каждой проволоки 450 мкм. В рабочий объем реактора подается воздух, образующий пузыри внутри воды, в которых генерируются разряды с частотой следования от нескольких сотен до 10000 имп/с и более. Нагрузкой генератора является последовательное соединение канала(ов) разряда и слоя воды между основанием канала и низковольтным (заземленным) электродом, соединенным с одним из выводов высоковольтной обмотки ИТ.

На рис. 1 показаны блок-схема экспериментальной установки (рис. 1, а) и ее электрическая схема замещения (рис. 1, б).

Насос со скоростью 60 л/ч (расход воды) перекачивает воду из реактора, в который вода подается из бака (рис. 1, а). Процесс перекачки может быть замкнут. Тогда насос перекачивает воду обратно в реактор, а клапан бака закрыт. Компрессор обеспечивает образование в реакторе газовых пузырей с регулируемой скоростью 5–50 л/ч. Пузыри после выхода из рабочей зоны поднимаются в водном объеме к поверхности воды в реакторе.

На рис. 1, б емкость  $C_H=940$  мкФ (2 конденсатора TAMIСON 470 мкФ, 450 В параллельно) заряжается от сети (220 В, 50 Гц) через диодный мост (не показан) до напряжения  $U_0$ ;  $V$  – вольтметр.

Коммутатором служит транзисторный ключ  $T$ , состоящий из двух параллельно включенных IGBT-транзисторов типа IRG4PH50UD. ИТ на ферритовом магнитопроводе представлен индуктивностью намагничивания  $L_\mu$  и индуктивностями  $L_{sh}, L'_{sb}$  – соответственно индуктивность рассеяния первичной и приведенная индуктивность рассеяния вторичной (высоковольтной) обмоток ИТ;  $D$  – встроенные в транзисторы обратные диоды IGBT-ключа;  $C_{эк} \geq 1$  нФ – емкость “эмиттер–коллектор” IGBT-

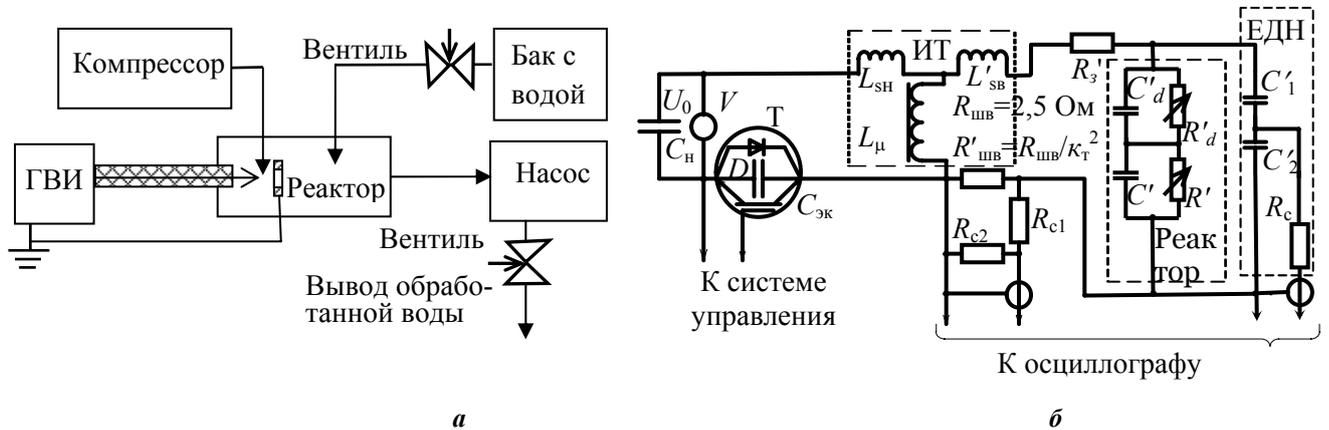


Рис. 1

ключа,  $C'_d < C_{эк} \ll C_H$ ;  $R'_{шв}$  – приведенное сопротивление измерительного шунта в высоковольтном контуре генератора;  $R_{c1}=300$  Ом,  $R_{c2}=60$  Ом – согласующие сопротивления шунта  $R_{шв}=2,5$  Ом;  $C'_1, C'_2$  – приведенные емкости высоковольтного и низковольтного плеч емкостного делителя напряжения ЕДН (не приведенные, т.е. реальные емкости  $C_1 \approx 2,7 \cdot 10^{-12}$  Ф, а  $C_2=20,4 \cdot 10^{-9}$  Ф, коэффициент деления  $K_d \approx 7650$ ) с согласующим сопротивлением  $R_c$  [5]. В электрической схеме реактора  $C_d, R_d$  – емкость и нелинейное активное сопротивление разрядного промежутка, 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). Коэффициент трансформации ИТ  $\kappa_T=100$ . В первичной обмотке ИТ  $w_1=3$  витка, а во вторичной  $w_2=300$  витков. В отличие от [4] схема на рис. 2 содержит токоограничивающий резистор с сопротивлением  $R_3=24$  кОм, (приведенное значение  $R'_3=R_3/\kappa_T^2=2,4$  Ом). При возможном переходе в режим искрового разряда в реакторе этот резистор ограничивает ток в цепи, защищает по току транзисторный ключ. Величина зазора  $h$  в газовом пузыре между острым высоковольтным электродом внутри пузыря и поверхностью газового пузыря в воде  $h \approx 7$  мм. В процессе продувки форма газовых пузырей меняется, вызывая изменение величины  $h$ .

Емкость  $C_d$  разрядного промежутка (РП) – это емкость между острым высоковольтным электродом внутри газового пузыря и поверхностью раздела газового пузыря и воды ( $C_d \leq 10^{-12}$  Ф). Сопротивление  $R_d$  РП до начала разряда весьма велико, превышает 1 МОм, поэтому все напряжение с выхода высоковольтной обмотки ИТ прикладывается к нему. После начала разряда  $R_d$  уменьшается, и в случае перехода разряда в канальную стадию искрового разряда может оказаться существенно меньше 1 Ом. Однако при наличии достаточно толстого (в несколько см) слоя воды между основанием канала разряда и низковольтным электродом этого не происходит, и можно предположить, что  $R_d$  уменьшается до  $\sim 1$  кОм. При оценке сопротивления воды  $R$  в экспериментах конусная форма растекания тока в воде заменена на эквивалентную цилиндрическую с площадью поперечного сечения цилиндра  $s=10^{-4}$  м<sup>2</sup> и длиной цилиндра  $l=3 \cdot 10^{-2}$  м. Сопротивление оценивалось по формуле  $R=\rho/l/s=3$  кОм, где  $\rho$  – удельное объемное активное сопротивление воды.

Емкость слоя воды  $C$  оценивалась по формуле  $C=\epsilon\epsilon_0s/l \approx 2,4 \cdot 10^{-12}$  Ф, где  $\epsilon=81$  – относительная диэлектрическая проницаемость воды,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная.

Постоянная времени разряда  $\tau$  емкости  $C$  на активное сопротивление  $R$   $\tau=R \cdot C \approx 7,2 \cdot 10^{-9}$  с.

На рис. 2 показан эскиз реактора: 1 – провод в изоляции, подключенный к острейному электроду; 2 – острейный электрод; 3 – заземленная металлическая втулка; 4 – диэлектрический цилиндр-конус; 5 – поверхность цилиндра 4, по которой стекает обрабатываемая вода; 6 – полость, где образуются газовые пузыри,  $l$  – толщина слоя воды между основанием канала разряда и втулкой 3.

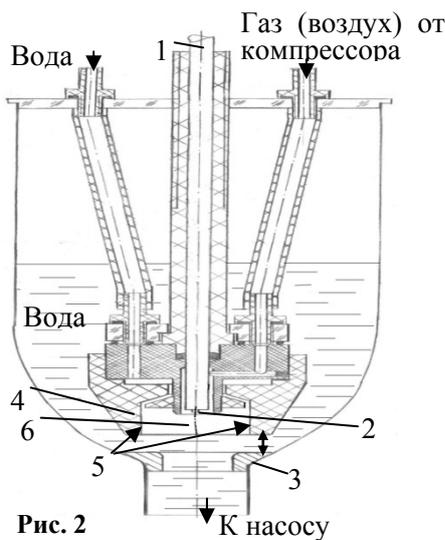


Рис. 2

Результаты исследований. На рис. 3 и рис. 4 показаны полученные в результате исследования процессов в схеме (рис. 1, б) осциллограммы импульсов напряжения (кривые 1) и тока (кривые 2). Амплитуда напряжения достигает 8 кВ, а амплитуда тока – 0,2 А. На фронтовой части импульсов тока есть начальный «пологий» участок, после которого имеется излом, соответствующий началу фазы коммутации – процесса быстрого уменьшения импеданса разрядного промежутка, после которого (излома) скорость нарастания тока резко возрастает. Скорость нарастания тока после излома имеет разброс от импульса к импульсу и может достигать величин, обеспечивающих наличие наносекундных («крутых») участков на фронте импульсов тока.

На рис. 3 показаны осциллограммы импульсов напряжения на выходе ИТ и тока в контуре его высоковольтной обмотки – (а, в, з), а также осциллограммы импульсов напряжения на РП и тока в контуре высоковольтной обмотки ИТ – (б); а, б – 50 мкс/дел, в – 10 мкс/дел – импульсы в целом, з – 1 мкс/дел – фронтовая часть импульсов (наложено 5 импульсов напряжения и 5 импульсов тока, им соответствующих). Частота  $f_{\text{сл}}$  следования импульсов при проведении экспериментов в основном составляла  $f_{\text{сл}}=1/T=1/(1,6 \cdot 10^{-4} \text{ с})=6250$  имп/с,  $T$  – период следования (повторения) импульсов (см. рис. 3). Влияние полярности на острейном электроде на ток и напряжение в разрядном промежутке иллюстрируют осциллограммы на рис. 4. Разряд в газовом пузыре является как источником факторов очистки воды, так и обострителем фронта импульсов тока (а в некоторых случаях и напряжения) в реакторе (рис. 4): а, б – 10 мкс/дел, в, з, д – 1 мкс/дел, е – 10 нс/дел. Импульсы напряжения и тока от ГВИ в реакторе имеют биполярную форму. На рис. 4 б, в, д, е показаны типичные осциллограммы импульсов напряжения и тока в реакторе при отрицательной исходной полярности на острейном электроде. На рис. 4, е более подробно (точно) представлен наносекундный всплеск с рис. 4, в. Ширина полосы частот осциллографа – 100 МГц.

Из рис. 4 следует, что реактор для ГВИ является резистивной нагрузкой (в отличие от реактора с коронным разрядом и емкостью  $C_p \approx 27$  пФ, когда реактор является емкостной нагрузкой с активными

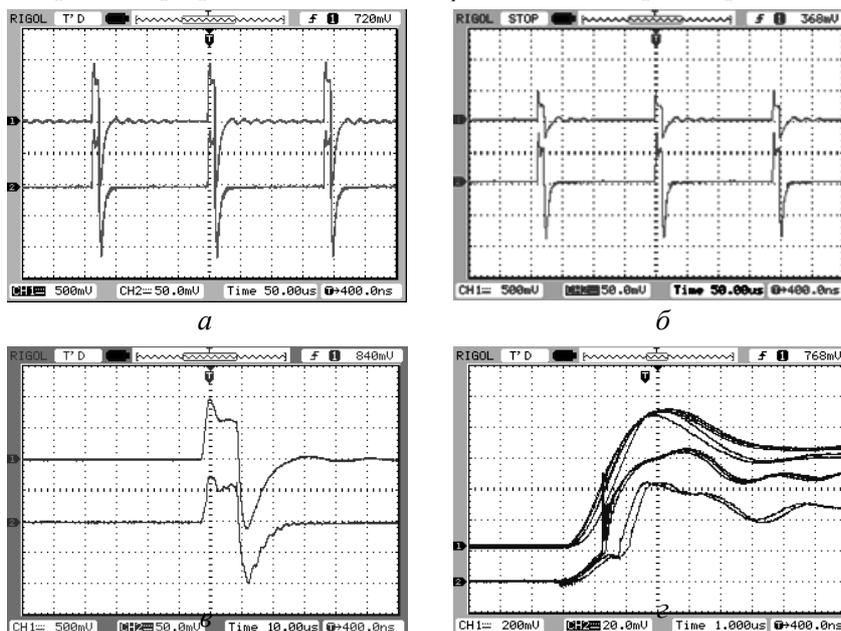


Рис. 3

потерями [4]), поскольку формы импульсов напряжения и тока подобны, их фронты не сдвинуты по времени друг относительно друга. Поэтому вся энергия каждого импульса выделяется в реакторе. Изменение сопротивления в РП происходит по-разному при исходной положительной и отрицательной полярностях высоковольтного электрода внутри пузыря. При исходной отрицательной полярности наносекундные выбросы тока в реакторе после замыкания IGBT-ключа и медленного (порядка 1 мкс) нарастания тока на фронте ближе к вершине импульса больше по амплитуде. А вот величина

тока на полке импульса после фронта меньше, чем в случае исходной положительной полярности.

При подаче прямоугольного управляющего импульса IGBT-ключ замыкается (открывается), и в рабочем объеме реактора формируются импульсы напряжения и тока. Оценим емкость  $C_d$  РП по формуле для емкости между прямолинейным проводом конечной длины, перпендикулярным проводящей плоскости, и этой плоскостью [6]:  $C_d \approx 2\pi\epsilon l_d / [\ln(l_d/a) - D_2]$ , где  $h$  – расстояние от торца провода до плоскости,  $l_d$  – длина провода,  $a$  – радиус провода: коэффициент  $D_2$  при  $h/l_d \ll 1$  определяется формулой

$$D_2 = 1 + h/l_d \ln(4h/l_d) + (1 + h/l_d) \ln(1 - h/l_d) - (1 + 2h/l_d) \ln(1 + 2h/l_d).$$

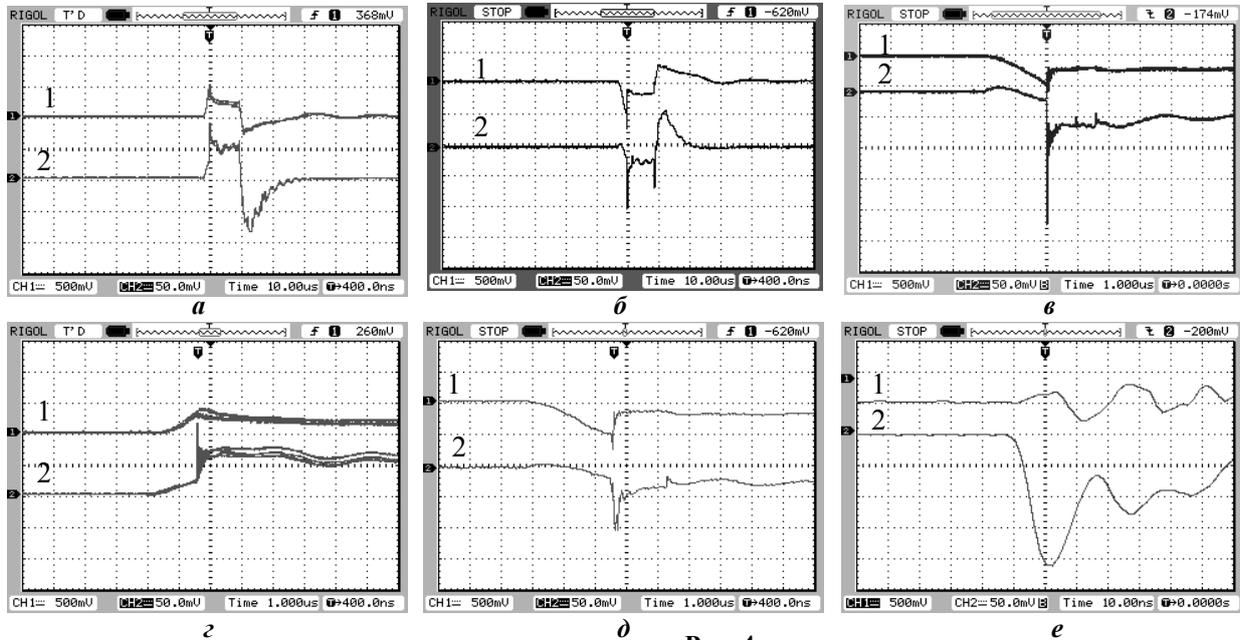


Рис. 4

Пусть  $h=0,007$  м,  $h/l_d=0,1$ , тогда  $l=0,07$  м;  $\epsilon=8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $a=5 \cdot 10^{-5}$  м; при  $h/l=0,1 D_2=0,795$ . Отсюда  $C_d \approx 2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,07 / [\ln(0,07/(5 \cdot 10^{-5})) - 0,928] \approx 3,89 \cdot 10^{-12} / [7,244 - 0,928] \approx 6,32 \cdot 10^{-13}$  (Ф).

При этом емкость слоя воды  $C$  остается незаряженной. После возникновения разряда в РП на фронте медленно (в течение 1–2 мкс) нарастающего тока происходит излом и запускается процесс коммутации, в течение которого  $R_d$  уменьшается, а ток в РП и во всем разрядном контуре (открытый IGBT -  $C_H - L_S - L'_{SB} - R'_3$  – рабочий объем реактора -  $R'_{шв} - C_{ЭК}$  - открытый IGBT) быстро (в нс диапазоне) возрастает. На участке наносекундного нарастания тока возможна увеличенная погрешность токового шунта из-за увеличения паразитной составляющей падения напряжения на нем  $L_{ш} di/dt$ , где  $L_{ш}$  – паразитная индуктивность шунта,  $di/dt$  – скорость нарастания тока в разрядном контуре. В результате заряжается емкость  $C$  слоя воды в рабочем объеме реактора. Чем короче время заряда  $C$ , тем до большей величины может вырасти напряжение на этой емкости. Сверху величина возможной амплитуды напряжения на  $C$  ограничена величиной  $2U_0$  с учетом операции приведения в ИТ.

После окончания управляющего импульса на IGBT-ключе и его размыкания наблюдается спад тока по абсолютной величине в реакторе за время менее 1 мкс и смена его (тока) полярности при любой исходной полярности острейного электрода в газовом пузыре. Но перед спадом в случае отрицательной исходной полярности острейного электрода наблюдается наносекундный скачок – увеличение тока. Это объясняется тем, что за счет имеющейся в индуктивностях рассеивания  $L_S$  и  $L'_{SB}$  энергии в течение наносекундного отрезка времени увеличивается ток в «быстром» контуре  $C_{ЭК} - C_H - L_S - L'_{SB} - R'_3$  – рабочий объем реактора -  $R'_{шв} - C_{ЭК}$  при размыкании IGBT-ключа. При этом емкости  $C_d$  и  $C$  разряжаются через каналы разряда в газовом пузыре с сопротивлением  $R_d$  и через сопротивление слоя воды  $R$ , а по указанному «быстрому» контуру заряжается емкость  $C_{ЭК}$ , незаряженная при открытом IGBT-ключе. Затем за счет энергии, запасенной в индуктивности  $L_{\mu}$  намагничивания ИТ, ток и напряжение в реакторе меняют знак и нарастают с полярностью, измененной на противоположную. Ток протекает в «медленном» разрядном контуре  $L_{\mu} - L'_{SB} - R'_3$  – рабочий объем реактора -  $R'_{шв} - L_{\mu}$  (см. рис. 1, б). При исходной отрицательной полярности острейного электрода после размыкания

IGBT-ключа активное сопротивление разряда в реакторе сначала уменьшается за счет указанных выше процессов в «быстром» разрядном контуре, а затем возрастает. При исходной положительной полярности высоковольтного электрода такого не происходит. Вероятно, этот эффект имеет место из-за того, что после размыкания IGBT-ключа при исходной отрицательной полярности высоковольтного электрода носители заряда медленнее устраниаются из зоны разряда (за счет диффузии, рекомбинации), чем при его (электрода) исходной положительной полярности.

Наличие указанных изломов позволяет установить некоторое соответствие между исследуемым вариантом разряда и классическим барьерным разрядом, в котором также наблюдается подобный излом при возникновении разряда в газовом промежутке [9]. Однако между этими видами разрядов есть существенные отличия. В барьерном разряде барьер – твердый диэлектрик, а электрическое поле в электродной системе кусочно-однородное. В данной работе в электродной системе поле резконеоднородное, а слой воды между газовым пузырьем и заземленным металлическим электродом имеет достаточно высокую удельную электропроводность.

На рис. 5 показаны фото разрядов, полученных в воздушных пузырях в реакторе экспериментальной установки. Фото на рис. 5 а, б получены при использовании в схеме (рис. 1, б) защитного сопротивления  $R_3=24$  кОм и острейного электрода в виде медной полоски. Фотография на рис. 5, в получена при использовании острейного электрода в виде «метелки» из посеребренных медных проволочек и без  $R_3$ . В последнем варианте роль сопротивления, ограничивающего ток в цепи высоковольтной обмотки ИТ, играет сопротивление слоя воды  $R$ . В промышленных установках по очистке воды ток следует ограничивать другими способами. Отсутствие ограничения тока может привести к нежелательному увеличению удельных энергозатрат на очистку воды, ускорению износа электродов, появлению неприятных запахов, привкусов, аварийным режимам. Из рис. 5 следует, что разряды имеют канальную стадию. Основания каналов разрядов перемещаются по поверхности воды на границе раздела газового пузыря и воды. В цветном варианте на рис. 5 а, б каналы разряда сиреневого («холодного») цвета, а на рис. 5, в каналов больше (исходят из торцов медных проволочек), они более яркие (ток в них больше), бело-сиреневого («теплого») цвета.

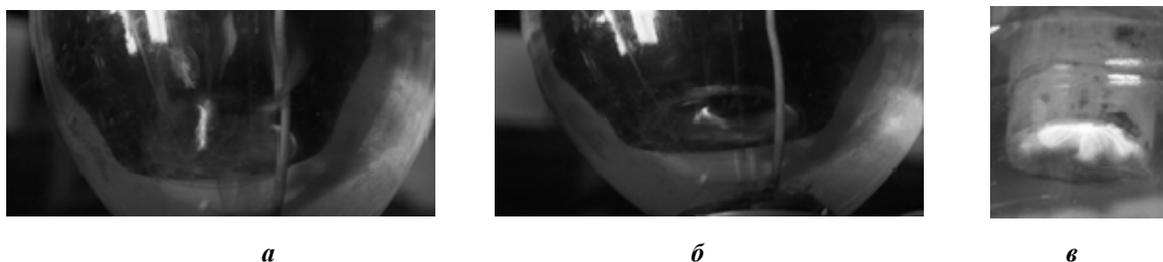


Рис. 5

На слой воды между основаниями каналов разрядов и низковольтным (заземленным) металлическим электродом в рабочем объеме реактора действует сильное электрическое поле, напряженность которого  $E_0$  при расстоянии между электродами 0,03 м и радиусе кривизны острой кромки острейного электрода  $2,5 \cdot 10^{-5}$  м достигает, согласно [2], величины  $2,6 \cdot 10^7$  В/м.

	рН	Фенолы, мг/л	Роданиды, мг/л
Характеристики исходной воды	7,5	358 (100 %)	536 (100 %)
Характеристики воды после обработки	3,8	143 (39,7 %) Уменьшение на 60,3 %	32 (6 %) Уменьшение на 94 %

Результаты обработки воды, используемой в коксовом производстве, с целью ее очистки от фенолов и роданидов при помощи разрядов в воздушных пузырях внутри воды представлены в таблице (по данным лаборатории Харьковского коксового завода). Очистка воды, применяемой в коксовом производстве, проводилась при использова-

нии в качестве высоковольтного электрода в виде «метелки» из медных проволочек диаметром 450 мкм каждая без использования токоограничивающего резистора. Процесс перекачки воды был зациклен. Остальные экспериментальные условия указаны выше: частота следования высоковольтных импульсов – примерно 6250 имп/с, амплитуда импульсов напряжения на разряде в пузыре и слое воды под ним – примерно 8 кВ и т.д. Для определения концентрации фенолов в воде использовался броматометрический метод. Концентрация роданидов в воде определялась методом фотометрии. При

концентрации более  $0,25 \text{ мг/дм}^3$  анализируемую пробу разбавляют, но не более, чем в 10 раз. Удельные энергозатраты на очистку от фенолов и роданидов воды из реального коксового производства были повышенными по сравнению с таковыми на очистку воды поверхностных водоемов ( $\approx 5 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$ ) и составили  $\approx 10 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$ .

При обработке воды поверхностных водоемов показатель кислотности воды pH не уменьшался (как в таблице), а увеличивался с 6,9 до 7,9, оставаясь в пределах нормы (от 6,5 до 8,5). Обнаружено, что разряды в газовых пузырях в воде эффективно устраняют нежелательные запахи, осветляют и делают более прозрачной воду. При очистке воды поверхностных водоемов по схеме рис. 1, б как с  $R_3=24 \text{ кОм}$ , так и с  $R_3=0$  биохимическое потребление кислорода (БПК) уменьшилось с  $3,84 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$  (в контрольном образце) до  $3,67 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$  (в обработанных образцах) при норме, согласно нормативной документации,  $\leq 6 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ , т.е. исходный (контрольный) образец воды был достаточно чистым. При этом разрядами в газовых пузырях в воде его удалось доочистить. БПК определялось методом, изложенным в КНД 211.1.4.030-95, БПК5 (без учета инкубации). БПК5 (пятисуточное БПК) рекомендуется как стандартный метод.

После обработки воды разрядами в газовых пузырях в ней всегда проводилась ее фильтрация.

**Выводы.** Экспериментально получены разряды в газовых пузырях с характерным размером 1–4 см в воде, имеющие канальную стадию. Частота следования разрядов достигала 10000 имп/с при амплитуде импульсов напряжения на реакторе 8 кВ и токах в разрядном контуре примерно 0,2 А (без учета наносекундных всплесков). Фронт импульсов тока имеет два участка: «пологий» с микросекундным нарастанием, а затем «крутой», длительность которого может составлять десятки наносекунд и менее. Разряд в газовом пузыре является обострителем фронта импульсов тока (а в некоторых случаях и напряжения), что усиливает воздействие на очищаемую воду. Импульсы тока и напряжения в газовых пузырях при исходной положительной и отрицательной полярностях потенциала на высоковольтном электроде отличаются друг от друга. Предварительные исследования по очистке воды, использованной при производстве кокса, а также воды поверхностных водоемов показали, что при помощи разрядов в газовых пузырях в ней вода эффективно очищается от фенолов (уменьшение на 60,3 %), роданидов (уменьшение на 94 %). Вода осветляется и делается более прозрачной, устраняются нежелательные запахи, уменьшается биохимическое потребление кислорода ею. Для минимизации удельных энергозатрат при очистке воды разрядами в газовых пузырях в ней необходимы дальнейшие исследования, выбор наиболее рациональных режимов обработки.

1. Блага О.В., Божко И.В., Зозульов В.І., Кобильчак В.В. Удосконалення джерела живлення для збільшення енергоефективності імпульсного бар'єрного розряду // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 6. – С. 76–80.
2. Божко И.В., Кобильчак В.В. Джерело живлення для імпульсних електророзрядних технологій обробки води // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 3. – С. 76 – 80.
3. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Иванов В.М. Комплексный электрофизический метод очистки воды с органическими загрязнителями после производственного цикла // Матеріали 11-ої Міжн. науково-техніч. конф. «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів». – Кременчук, 2012. – С. 205–206.
4. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Иванов В.М. Компактный генератор высоковольтных импульсов с размыкающим транзисторным коммутатором и высокой частотой следования импульсов // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 4. – С. 73 – 82.
5. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Иванов В.М., Христенко О.А. Компактный ёмкостный делитель напряжения на 70 кВ с экранированным промежуточным электродом // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 6. – С. 41–46.
6. Иосель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1981. – 288 с.
7. Маринин С.А., Осокин Г.Е., Корнев Я.И. Электрические характеристики импульсного коронного разряда в водовоздушном потоке // Сб. науч. трудов II Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов "Высокие технологии в современной науке и технике". – Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 93–98.
8. Русин Ю.С. Расчет электромагнитных систем. – Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1968. – 132 с.
9. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 176 с.
10. Locke Bruce R. Environmental Applications of Electrical Discharge Plasma with Liquid Water // International Journal of Plasma Environmental Science & Technology. – 2012. – Vol. 6. – No 3. – Pp. 194–203.
11. Preis S., Panorel I.C., Kornev I., Hatakka H. and Kallas J. Pulsed corona discharge: the role of ozone and hydroxyl radical in aqueous pollutants oxidation // Water Science & Technology. – 2013. – 68,(7). – Pp. 1536–1542.
12. Vanraes P., Nikiforov A.Y. and Leys C. Electrical discharge in water treatment technology for micropollutant decomposition. – Plasma science and technology – progress in physical states and chemical reactions. Chapter 15. – 2016. – Pp. 428–478.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗРЯДІВ У ГАЗОВИХ МІХУРАХ**

**М.І. Бойко**, докт.техн.наук, **А.В. Макогон**

**Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»**,

**вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна,**

**e-mail: [boyko@kpi.kharkov.ua](mailto:boyko@kpi.kharkov.ua); [qnaboyg@gmail.com](mailto:qnaboyg@gmail.com); [qnabov@mail.ru](mailto:qnabov@mail.ru)**

*Експериментально досліджено залежності струму і напруги від часу в розрядах у газових міхурах у воді, які використовуються для її очищення. Показано, що на фронті імпульсів струму при розрядах у міхурах є злам, після якого швидкість наростання струму різко зростає. Досягнуто частоти проходження розрядів у міхурах 10000 імп/с при амплітуді напруги 8 кВ на реакторі – навантаженні генератора експериментальної установки і струмах 0,2 А у високовольтному розрядному контурі з розрядами в газових міхурах. Досягнуто високого ступеня очищення води, що використовується в коксовому виробництві, від фенолів і роданидів. Показано можливість покращення органолептичних показників води і зменшення біохімічного споживання кисню нею. Бібл. 12, табл. 1, рис. 5.*

**Ключові слова:** розряд у газових міхурах у воді, експериментальна установка, генератор, реактор, імпульсний трансформатор, очищення води розрядами.

**EXPERIMENTAL PLANT FOR WATER PURIFICATION WITH THE HELP OF DISCHARGES IN GAS BUBBLES**

**N.I. Boyko, A.V. Makogon**

**National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kyrpychova st, 2, Kharkiv, 61002, Ukraine,**

**e-mail: [boyko@kpi.kharkov.ua](mailto:boyko@kpi.kharkov.ua); [qnaboyg@gmail.com](mailto:qnaboyg@gmail.com); [qnabov@mail.ru](mailto:qnabov@mail.ru)**

*The dependence of the current and voltage on time in discharges in gas bubbles in water used for its purification is studied experimentally. It is shown that at the front of the current pulses with discharges in bubbles there is a kink, after which the rate of current increase sharply increases. The frequency of discharges in bubbles is 10,000 pulses / s at a voltage amplitude of 8 kV on the reactor - the load of the experimental setup generator and currents of 0.2 A in a high-voltage discharge circuit with discharges in gas bubbles. A high degree of purification of water used in coke production was obtained from phenols and thiocyanates. The possibility of improving the organoleptic parameters of water and reducing the biochemical oxygen consumption by it is shown. References 12, table 1, figures 5.*

**Key words:** discharge in gas bubbles in water, experimental plant, generator, reactor, pulse transformer, water purification by discharges.

1. Blaha O.V., Bozhko I.V., Zozul'ov V.I., Kobylchak V.V. Perfection of power source for energy efficiency magnification of pulsed barrier discharge // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2014. – No 6. – Pp. 76–80. (Ukr)
2. Bozhko I.V., Kobylchak V.V. Power source for pulse electrodischarge technologies of water purification // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2014. – No 3. – Pp. 76 – 80. (Ukr)
3. Boyko N.I., Evdoshenko L.S., Ivanov V.M. Complex electrophysical method of water purification with organic pollutants after the production cycle // 11 Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Fizychni protsesy ta polia tekhnichnykh i biolohichnykh ob'ektiv». – Kremenchuk, 2012. – Pp. 205–206. (Rus)
4. Boyko N.I., Evdoshenko L.S., Ivanov V.M. A compact high-voltage pulse generator with a disconnecting transistor switch and a high repetition rate // *Pribory i tekhnika eksperimenta*. – 2014. – No 4. – Pp. 73–82. (Rus)
5. Boyko N.I., Evdoshenko L.S., Ivanov V.M., Khristenko O.A. Compact capacitive voltage divider at 70 kV with shielded intermediate electrode // *Electrical engineering & Electromechanics*. – 2012. – No 6. – Pp. 41–46. (Rus)
6. Iossel Yu.Ya., Kochanov E.S., Strunskii M.H. Calculation of electrical capacity. – Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1981. – 288 p. (Rus)
7. Marinin S.A., Osokin H.E., Kornev Ya.I. Electrical characteristics of pulse corona discharge in water-air stream // *Sbornik nauchnykh trudov II Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov "Vysokie tekhnologii v sovremennoi nauke i tekhnike"*. – Tom 1. – Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2013. – Pp. 93–98. (Rus)
8. Rusin Yu.S. Calculation of electromagnetic systems. – Leningrad: Energiia. Leningradskoe otdelenie, 1968. – 132 p. (Rus)
9. Samoilovich V.H., Hibalov V.I., Kozlov K.V. Physical chemistry of barrier discharge. – Moskva: Izdatelstvo Moskovskogo Gosudarstvennogo Universiteta, 1989. – 176 p. (Rus)
10. Locke Bruce R. Environmental Applications of Electrical Discharge Plasma with Liquid Water // *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*. – 2012. – Vol. 6. – No 3. – Pp. 194–203.
11. Preis S., Panorel I.C., Kornev I., Hatacka H. and Kallas J. Pulsed corona discharge: the role of ozone and hydroxyl radical in aqueous pollutants oxidation // *Water Science & Technology*. – 2013. – 68,(7). – Pp. 1536–1542.
12. Vanraes P., Nikiforov A.Y. and Leys C. Electrical discharge in water treatment technology for micropollutant decomposition. *Plasma science and technology – progress in physical states and chemical reactions*. Chapter 15. – 2016. – Pp. 428–478.

Надійшла 23.03.2017  
Остаточний варіант 23.06.2017