

DOI 10.15589/jnn20150515
УДК 621.319.5
Б73

UNIT FOR WATER DISINFECTION
WITH HIGH-FREQUENCY STREAMER DISCHARGE
УСТАНОВКА ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ СТРИМЕРНЫМ РАЗРЯДОМ

L. Z. Boguslavskyi
dpes@iippt.com.ua
ORCID: 0000-0001-6738-1889

M. S. Yaroshynskyi
kabalo@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-5884-5917

Л. З. Богуславский,
канд. техн. наук, доц.¹

Н. С. Ярошинский,
мл. науч. сотр.²

¹ *Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

² *Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, Mykolaiv*

¹ *Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

² *Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев*

Abstract. The article describes the design of the unit and shows the results of raw river water disinfection using high voltage high-frequency streamer discharges. The electrical diagram of the generator of high-voltage high-frequency streamer discharge based on the high-voltage pulse transformer is developed. The generator consists of two main parts: a pulse-width controller of input voltage (the chopper) and the power generator of high-voltage pulses with a nanosecond front rise and a pulse repetition frequency of 10 kHz. The power section of the pulse generator is a single generator with a transistor IGBT-key switched on in parallel, which contains a powerful built-in antiparallel diode. The main metering element is a pulse capacitor of high capacity connected in series with the primary winding of the high-frequency transformer. The streamer corona discharge ignites at the multi-apex electrode system. The laboratory unit is manufactured for water disinfection using a high-voltage high-frequency streamer discharge ignited over the surface of the treated water in a flow-through mode and with bubbling of the treated water with ozone, which is produced in the process of discharge ignition. The impact of streamer discharges on living microorganisms is considered. The results of the disinfection experiment show that the treatment by a high-voltage high-frequency streamer discharge without the use of chemicals allows achieving a high level disinfection of raw river water.

Keywords: streamer discharge; water disinfection; streamer discharge generator.

Аннотация. Описана конструкция установки и представлены выводы по обеззараживанию необработанной речной воды с помощью высоковольтных высокочастотных стримерных разрядов. Описан процесс воздействия стримерных разрядов на живые микроорганизмы. Вода обрабатывалась в стоячем и проточном режимах. Полученные результаты показывают эффективность воздействия стримерного высокочастотного разряда для обеззараживания воды.

Ключевые слова: стримерный разряд; обеззараживание воды; генератор стримерного разряда.

Анотація. Описано конструкцію установки й подано висновки зі знезараження необробленої річкової води за допомогою високовольтних високочастотних стримерних розрядів. Досліджено процес впливу стримерних розрядів на живі мікроорганізми. Вода оброблялася в стоячому і проточному режимах. Отримані результати показують ефективність впливу стримерного високочастотного розряду для знезараження води.

Ключові слова: стримерний розряд; знезараження води; генератор стримерного розряду.

REFERENCES

- [1] Bogomaz A. A. *O effektivnosti impulsnogo elektricheskogo razryada pri obezzarazhivanii vody* [On the efficiency of the pulse electrical discharge at water disinfection]. *Pisma v Zhurn. tekhn. fiziki — Letters to the Journal of technical physics*, 1991, no. 17, vol. 12, pp. 65–68.
- [2] Bohuslavskyi L., Kazarian Y., Diordiichuk V., Yaroshynskyi M. *Modeliuvannia vplyvu vlasnykh parametriv heneratora vysokovoltnykh impulsiv na rozriadni kharakterystyky dlia zapalennia strymernykh rozriadiv*

- [Modelling the influence of the high-frequency pulse generator parameters on the discharge characteristics for filling the streamer discharge]. DOI: <http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140509>.
- [3] Boguslavskiy L. Z., Kazarian Yu. H., Struk Ya. P., Kunizhenkov V. V., Yaroshynskiy M. S. *Ustanovka dlia znezarazhennia vody* [Water disinfection unit]. Patent UA, № 99276, 2015.
- [4] Boguslavskiy L. Z., Miroshnichenko L. N., Kazaryan Yu. G., Diordiyuchuk V. V. *Issledovaniya elektrofizicheskikh protsessov zazhiganiya obemnogo razryada v aerolnom potoke pri izmenenii chastoty sledovaniya impulsiv* [Study of the electrophysical processes of space discharge ignition in aerosol flow when changing the pulse frequency]. *Tezisy mezhdunarodnoy nauchoy konferentsii «Fizika impulsnykh razryadov v kondensirovannykh sredakh»*. Nikolaev, 2011, pp. 54–57.
- [5] Grin N., Staut U., Teylor D. *Biologiya* [Biology]. In 3 Vol., Moscow, Mir Publ., 2004.
- [6] Rayzer Yu. P. *Fizika gazovogo razryada* [Physics of gas discharge]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 592 p.
- [7] Ryazanov N. D., Derevyazkina Ye. N. *Vozdeystviya obezzarazhivayushchikh faktorov impulsnogo elektricheskogo razryada* [Impact of the disinfecting factors of the pulse electrical discharge] *Elektron. obrab. materialov — Electronic processing of materials*, 1984, issue 2, pp. 43–45.
- [8] Sandzhay Maniktala. *Impulsnye istochniki pitaniya ot A do Z* [Pulse power sources from A to Z]. Saint Petersburg, KORONA-VYeK Publ., 2008. 256 p.
- [9] Lukeš P., Doležalová E., Sisrová I., Člupek M. Aqueous-phase chemistry and bactericidal effects from gaseous plasmas in contact with water. *Proceedings of XXXI ICPIG Granada 2013*. Granada, Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA — CSIC), 2013.
- [10] Nicholas P. Cheremisinoff. *An Overview of Water and Wastewater Treatment*. Handbook of water and wastewater treatment technologies. Butterworth-Heinemann. 649 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Обеззараживание воды от разнообразных болезнетворных бактерий и паразитов является очень важным этапом ее подготовки к употреблению населением. Недостаточная степень водоочистки приводит к массовым болезням и часто к эпидемиям. Болезнетворные организмы могут вызывать такие заболевания, как холера, чума, легионеллез и подобные [5, 10].

Современное состояние обеззараживающих фильтров для воды в Украине требует неотложных мер по приведению нормативных экологических показателей в соответствие с требованиями ЕС. Физические методы прямо или косвенно связаны с преобразованием электрической энергии (озонирование, ультрафиолетовое облучение, электронный пучок и др.), в связи с этим актуальной задачей становится поиск таких методов и режимов воздействия, которые требуют минимум потребляемой энергии, а в конструктивном плане обладают простотой и надежностью. Среди электрофизических методов обеззараживания особое место занимает обработка жидкости электрическим разрядом в воде, бактерицидное действие которого известно с 60-х годов. Разработанные к настоящему времени опытные образцы технологических установок основаны на использовании подводного искрового разряда с характерными для данного вида электровзрыва недостатками (низкий ресурс электродной системы, высокие ударные и акустические нагрузки и т. д.) [7]. Вместе с тем, исследования последних лет показали, что эффективный объем жидкости, который подвержен непо-

средственному влиянию, прилегает к плазменному каналу и связан с его размерами [1]. Очевидно, что для наибольшего эффекта обработки весь поток жидкости необходимо пропустить близко к контактной поверхности «плазма-жидкость». В этой связи производительность данного способа не очень высока.

Одним из перспективных по эффективности воздействия и потенциально безопасных способов очистки воды от болезнетворных организмов является применение стримерного высоковольтного высокочастотного разряда.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Механизм стримерного обеззараживания связан с одним из наиболее характерных свойств белковых веществ — их способности к денатурации, то есть к изменению конфигурации цепей, групп и радикалов белка при разрыве слабых связей, удерживающих их в первоначальном состоянии. Белок подвергается денатурации от разных факторов воздействия: лучевой энергии, механического давления, фильтрации, электрического тока, кислот, щелочей, солей, от действия таких индифферентных веществ, как спирт, бензол, мочевины и др. Сильное нагревание также может привести к денатурации многих белков, в результате чего прекращает функционирование живая система [9].

Стримерный высоковольтный высокочастотный разряд формируется над поверхностью воды. Этот тип разряда, будучи сложным явлением, оказывает влияние разной природы на объект обработки.

Под действием высокочастотного высоковольтного импульсного напряжения межэлектродный промежуток над поверхностью воды заполняется стримерным объёмным разрядом. Стримерная плазма порождает свечение с длиной волны менее 380 нм. Электроны, вылетающие из головки стримеров по направлению к воде, вызывают появление свободных радикалов кислорода и водорода, а также образование озона [2, 4]. Кроме того, электрический разряд сопровождается ионизационными процессами в воде. Ионизационные процессы делятся на две группы — непосредственного и побочного влияния. Ионизирующее излучение непосредственного влияния — это высокоэнергетические электроны с энергией выше 20 эВ, вылетающие с головки стримера, которые взаимодействуют с молекулами H_2O , а также проходящий при этом через воду электрический ток. К побочному эффекту можно отнести ультрафиолетовое излучение.

В результате генерирования стримерного разряда в межэлектродном промежутке образуется резко неравновесная плазма, т. е. плазма, в которой температура электронов значительно больше температуры ионов. В неравновесных плазмохимических системах осуществляются различные преобразования — преобразования энергии, заряженных частиц, атомно-молекулярные превращения. Последовательность преобразований, которые претерпевают исходные вещества и электрическая энергия до их преобразования в продукты и тепловую энергию, называют механизмом плазмохимического процесса [6].

Исходя из вышеизложенного, создание установки, генерирующей высокочастотные стримерные разряды для обеззараживания воды, является актуальной задачей.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — создание экспериментальной установки и выполнение исследований по обеззараживанию воды с помощью высокочастотного стримерного разряда.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Описание генератора стримерных разрядов.

Для проведения экспериментов по воздействию стримерных высокочастотных разрядов была разработана лабораторная установка для обеззараживания воды, которая состоит из реакционной колбы 1, и генератора низковольтных высокочастотных импульсов 2 и высоковольтного высококочастотного импульсного трансформатора 3 (рис. 1).

Для генерации стримерного разряда применяются высокочастотные высоковольтные импульсы с длительностью импульса менее 10 мкс с наносекундным фронтом и частотой следования импульсов до 10 кГц (рис. 3).

При достижении амплитуды импульса положительной полярности на электродной системе 48 кВ на остриях электродов загорается стримерная корона (рис. 2) в виде светящихся факелов синего цвета, разряд при этом сопровождается обильным выделением озона. При рабочем напряжении от 50 до 60 кВ факела распространяются к поверхности воды. С увеличением напряжения яркость свечения короны усиливается.

Генератор высоковольтных импульсов состоит из двух главных частей — широтно-импульсного регулятора входного напряжения — чоппера и силового генератора импульсов высокого напряжения и частоты с наносекундным фронтом нарастания.

Чопперный регулятор (buck-стабилизатор) напряжения собран по традиционной схеме [8], содержащей три основных силовых элемента — высокочастотный ключ IGBT, мощный высокочастотный диод с малым временем обратного восстановления и выходной дроссель. Применение ВЧ стабилизатора постоянного напряжения питания генератора импульсов с обратной связью по напряжению дало возможность расширить диапазон выходных напряжений высоковольтных импульсов (см. рис. 3).



Рис. 1. Установка для очистки воды высоковольтным высокочастотным стримерным разрядом

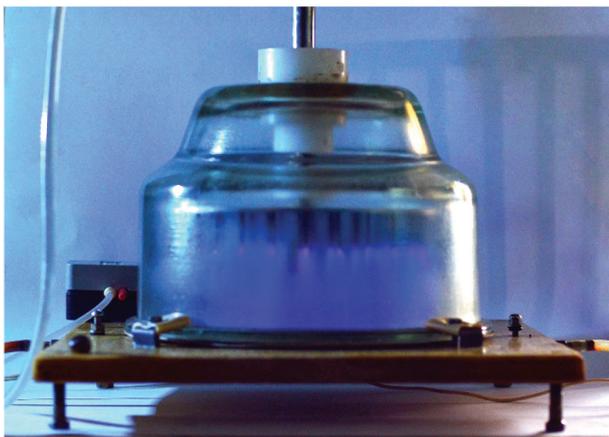


Рис. 2. Стримерный разряд в реакционной колбе

Такое решение добавляет ряд дополнительных преимуществ, таких как независимость от скачков напряжения сети питания и расширенный диапазон выходных напряжений.

Силовая часть генератора импульсов с коротким фронтом представляет собой однокантный генератор с параллельным включением транзисторного IGBT ключа $Tr1$, который содержит встроенный мощный антипараллельный диод (рис. 4). Основным дозирующим элементом является импульсный конденсатор $C1$ большой емкости, включенный последовательно с первичной обмоткой высокочастотного импульсного трансформатора ITI .

Работа схемы состоит из двух фаз: в фазе 1, при которой ключ разомкнут, происходит накачка энергии из источника питания в емкостный накопитель $C1$ по цепи $Tr1-C1-L1$. В фазе 2 — разряд емкостного накопителя $C1$ на $Tr1$ ключом IGBT1. При этом разрядный ток имеет синусоидальную форму; первая полуволна тока протекает через ключ, а вторая протекает через антипараллельный диод IGBT ключа $Tr1$, размагничивая при этом магнитопровод $Tr1$.

В результате передачи энергии через импульсный трансформатор и обостряющую ёмкость $C2$ на электродную систему подаются импульсы высокого напряжения с наносекундным фронтом, которые генерируют в объеме стримерный коронный разряд.

Детальное описание конструкции генератора приведено в патенте [3].

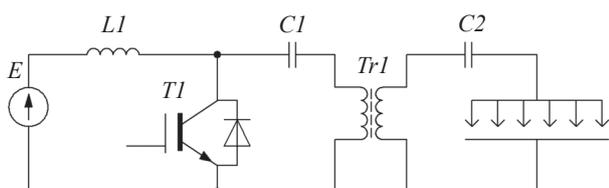


Рис. 4. Силовая часть генератора импульсов высокого напряжения с наносекундным фронтом нарастания

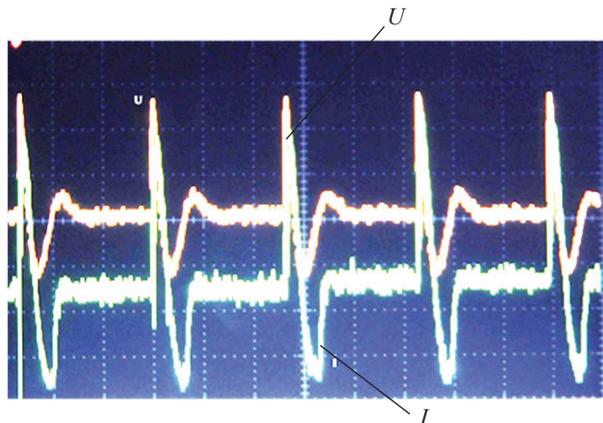


Рис. 3. Осциллограмма тока и напряжения высокочастотного стримерного разряда. Развертка 250 мкс/дел.

Методика исследования влияния электроразрядных процессов на речную воду. Все эксперименты проводились в двух режимах:

- 1) без протока, когда заданный объём жидкости находится в стационарном состоянии в разрядной камере и разряд во время обработки зажигается непосредственно над поверхностью воды;
- 2) проточном, когда жидкость с определенной скоростью протока подвергается обработке разрядами.

Для организации протока воды в лабораторных условиях была разработана специальная система стока с регулированием скорости протока. Схематично система для работы на устройстве с коронным разрядом приведена на рис. 5. Расстояние между пластинами электродной системы составляло 110 мм.

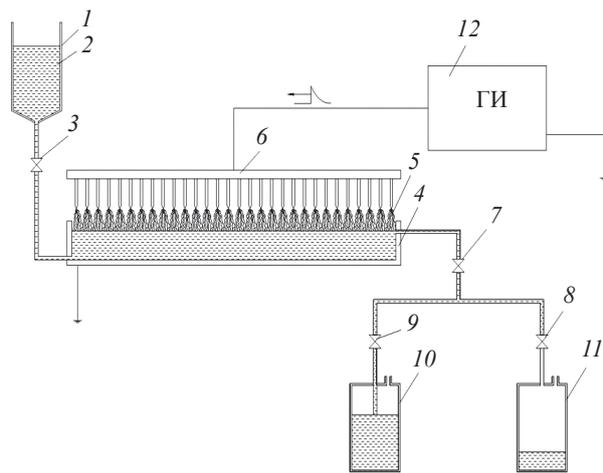


Рис. 5. Схема установки для обеззараживания воды с использованием стримерного разряда:

1 — бак с водой; 2 — очищенная вода; 3 — вентиль 1; 4 — резервуар для очистки воды; 5 — стримерный коронный разряд; 6 — электроды; 7 — вентиль 2; 8 — вентиль 3; 9 — вентиль 3; 10, 11 — баки с очищенной водой; 12 — генератор

Таблиця 1. Обработка воды в режиме без протока

Тип воды	Необработанная вода	Время обработки — 15 с	Время обработки — 30 с
Colli-индекс	1000	360	60
Микробное число	200	120	28

Таблиця 2. Обработка воды в проточном режиме на системе с коронным разрядом

Тип воды	Без обработки	Скорость потока, 1 л/мин	Скорость потока, 0,3 л/мин
Colli-индекс	1000	390	< 50
Микробное число	200	140	< 20

В баке 1 помещается необработанная вода 2. Открываются вентили 3, 7, 8, положения которых были предварительно откалиброваны на нужную скорость потока воды. Необработанная вода стекает в бак 11. Запускается генератор 12, на электродах 6 генерируется стримерный коронный разряд 5, вода под действием стримерного разряда обеззараживается. Открываем вентиль 9 и закрываем вентиль 8, обработанная вода стекает в бак 10.

Характеристики воды и результаты обработки. Эксперименты по обработке воды стримерным коронным разрядом проводились на пробах воды, взятых непосредственно из реки Ингул. Вода не проходила очистных сооружений. Все пробы имели среднюю прозрачность и содержали неорганические и органические примеси.

Необработанная и обработанная вода подвергалась микробиологическим исследованиям на ГКП «Николаевводоканал». Были определены распределения Colli-индекса и выделены некоторые представители патогенной флоры, присутствующие в воде. Результаты анализов сведены в табл. 1 и 2.

В табл. 1 приведены результаты обработки речной воды в стационарном режиме. Как показали эксперименты, при времени обработки в 15 с Colli-индекс уменьшается более чем в 2,7 раза, а микробное число более чем в 1,6. При обработке за время

30 с Colli-индекс и микробное число падают более чем в 16,6 и 7,1 раза соответственно.

При обработке воды в проточном режиме (табл. 2) при скорости потока 1 л в мин Colli-индекс и микробное число уменьшаются приблизительно в 2,56 и 1,4 раза. И при скорости потока 0,3 л/мин Colli-индекс и микробное число сокращаются до менее чем 50 и 20 единиц, что является пределом измерения лаборатории ГКП «Николаевводоканал».

При обработке стримерным разрядом воды в межэлектродном промежутке образуется озон в значительных концентрациях. Очевидно, использование образующегося озона для барботирования обрабатываемой воды может привести к повышению степени очистки от вредных микроорганизмов.

ВЫВОДЫ. Разработана электротехническая схема генератора высоковольтных высокочастотных стримерных разрядов для обеззараживания необработанной речной воды. Создана лабораторная установка для обеззараживания с помощью высокочастотного высоковольтного стримерного разряда необработанной воды. Полученные результаты эксперимента по обеззараживанию показывают, что при обработке высоковольтным высокочастотным стримерным разрядом без применения химических реагентов достигается высокая степень дезинфекции необработанной речной воды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Богомаз, А. А. О эффективности импульсного электрического разряда при обеззараживании воды / А. А. Богомаз // Письма в Журн. техн. физики. — 1991. — № 17 — Вып. 12. — С. 65–68.
- [2] Богуславський, Л. Моделювання впливу власних параметрів генератора високовольтних імпульсів на розрядні характеристики для запалення стримерних розрядів / Л. Богуславський, Ю. Казарян, В. Діордійчук, М. Ярошинський. — Режим доступу: DOI: <http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140509>.
- [3] Пат. 99276 Україна. Установка для знезараження води / Л. З. Богуславський, Ю. Г. Казарян, Я. П. Струк, В. В. Куніженков, М. С. Ярошинський (Україна), 25.05.2015, Бюл. № 10.
- [4] Богуславський, Л. З. Исследования электрофизических процессов зажигания объёмного разряда в аэрозольном потоке при изменении частоты следования импульсов / Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко, Ю. Г. Казарян, В. В. Диордийчук // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах : тез. международной научной конференции. — Николаев, 2011. — С. 54–57.
- [5] Грин, Н. Биология : в 3 т. // Н. Грин, У. Стаут, Д. Тейлор. — 3 изд. — М. : Мир, 2004.
- [6] Райзер, Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. — М. : Наука, 1987. — 592 с.
- [7] Рязанов, Н. Д. Воздействия обеззараживающих факторов импульсного электрического разряда / Н. Д. Рязанов, Е. Н. Деревязкина // Электрон. обраб. материалов. — 1984. — № 2. — С. 43–45.

- [8] **Санджай Маниктала.** Импульсные источники питания от А до Z / М. Санджай. — СПб. : КОРОНА-БЕК, 2008. — 256 с.
- [9] **Lukeš P., Doležalová E., Sisrová I., Člupek M.:** Aqueous-phase chemistry and bactericidal effects from gaseous plasmas in contact with water. Proceedings of XXXI ICPIG Granada 2013. Granada : Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA — CSIC), 2013.
- [10] **Nicholas P. Cheremisinoff.** An Overview of Water and Wastewater Treatment. Handbook of water and wastewater treatment technologies. — Butterworth-Heinemann. — 649 p.

© Л. З. Богуславський, М. С. Ярошинський
 Надійшла до редколегії 15.09.2015
 Статтю рекомендує до друку
 д-р техн. наук, проф. *Н. І. Кускова*