

УДК 537.528; 544.726; 678.021

**В.В. Гончарук, А.О. Самсоны-Тодоров,  
В.А. Яременко, О.А. Савченко,  
И.А. Выговская, А.В. Мамаенко**

## **АЭРОЗОЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ ВОДЫ**

Институт коллоидной химии и химии воды  
им. А.В.Думанского НАН Украины, г. Киев  
samsoni-@ukr.net

*Определены перспективы применения озонгидроксильных аэрозольных смесей для обработки воды путем комплексного воздействия электроплазменных разрядов и УФ-облучения водного объема под слоем воздушной составляющей при импульсном характере регулирования электрического поля в практике проведения дезактивации примесей предложенной установкой. Использование данной методики обработки воды позволяет повысить эффективность ее очистки от микромицетов и трудноокисляемых органических и минеральных загрязняющих веществ без предварительного применения химических реагентов.*

**Ключевые слова:** аэрозоли, микромицеты, озонгидроксильная смесь, ультрафиолетовое облучение, фотофоретическое движение, фотокаталитическое окисление, электроплазменная обработка.

**Введение.** Результаты мониторинга, проводившегося на протяжении последних лет, свидетельствуют о повышении степени загрязнения воды в источниках питьевого водоснабжения различными химическими веществами. Особенно к таковым следует отнести нефтепродукты, ПАВ, галогенированные углеводороды, ароматические соединения, пестициды, гербициды и другие подобные вещества химической промышленности [1–3]. Наряду с этим необходимо также отметить, что традиционные схемы водоподготовки (коагуляция – отстаивание – фильтрование – обеззараживание) в настоящее время не

© В.В. Гончарук, А.О. Самсоны-Тодоров, В.А. Яременко, О.А. Савченко,

И.А. Выговская, А.В. Мамаенко, 2016

ISSN 0204–3556. Химия и технология воды, 2016, т.38, №3

обеспечивают надлежащего уровня очистки (дезактивации) воды от загрязняющих веществ. Также серьезной проблемой в процессах водоподготовки является наличие в воде ядовитых микроскопических грибов (микроспоридий).

Поэтому разработка инновационных, экологичных, безреагентных технологий очистки и обеззараживания воды является актуальной задачей.

В технологической практике обработки воды известны способы ее обеззараживания путем фотокаталитического окисления или воздействия высоковольтными разрядами [4,5]. Например, известно устройство [6] для обработки воды электрическими разрядами, содержащее камеру смешения воды с озono-воздушной смесью, выполненную в виде эжекторного насоса, систему прокачки воды и воздуха, а также высокочастотный генератор, соединенный с камерой синтеза озона. Сравнивая экспериментальные данные с расчетными, следует отметить, что значения показателей, полученных экспериментально, почти на порядок больше расчетных. Очевидно, это вызвано ускоренным разложением озона в результате воздействия электромагнитного облучения. Одним из недостатков устройства [6] может являться селективность синтезированного озона, обусловленная его избирательностью в процессах дезактивации примесей сточных вод.

Анализ закономерностей распределения вкладов различных взаимодействий в однородном электростатическом поле показал, что в замкнутой системе возможны также изменения поляризационного дипольного момента молекул частиц аэрозоля. Особый интерес представляет характер воздействия внешнего электрического поля на молекулы воды в тонких слоях. В [7 – 9] показано, что при определенных значениях параметров электрического поля могут существенно изменяться физико-химические характеристики водных слоев.

В технологии электроразрядных методов обработки воды важное значение имеют показатели ее проводимости, которые способны существенно влиять на процессы инициирования разряда [9, 10]. Быстрое выделение энергии в канале электрического разряда жидкости приводит к ее разогреву и испарению [9 – 11]. Испаряющиеся молекулы жидкости подвергаются диссоциации, а также ионизации, что способствует образованию в канале разряда аэрозольных структур низкотемпературной плазмы. Уже на начальной стадии наблюдается разогрев плазмы до температуры порядка  $10^4\text{K}$ , что вызывает возраста-

ние давления в канале разряда и под действием которого наблюдается его расширение. Благодаря лучистой теплопроводности обеспечивается быстрое выравнивание температуры внутри электроразрядного канала. Это позволяет считать генерируемую плазму в определенной степени однородной. Вследствие высокой плотности частиц разогретая плазма канала разряда является интенсивным источником излучения. Доля энергии, уносимая световым излучением, зависит от температуры канала. При температурах порядка 15000 К и выше длина волны, согласно закону Винна, лежит в ультрафиолетовой области спектра, при котором наблюдается усиленное поглощение светового излучения, а значит, достигается определенный уровень УФ-обеззараживания воды [9, 10].

На межфазной границе между аэрозолями и воздухом (газом) протекает множество химических и физических процессов [4, 12, 13]. В работах [13,14] было изучено поведение аэрозольных частиц в газовом объеме, на который воздействуют электромагнитные волны. Оказалось, что скорость фотофоретического движения аэрозольных частиц в поле излучения во много раз превосходит скорость их движения, обусловленного традиционным механизмом [14, 15]. Вследствие этого представляет интерес возможность ионизации аэрозолей, полученных из водных систем, путем их активации в электрическом поле. Подобная методика позволяет получать электрически заряженные структуры, характеризующиеся повышенным поверхностным натяжением [13]. В результате образуются гидроксильные и супероксидные радикалы, т.е. структуры аэрозолей, обогащенные озонгидроксилами, которыми можно обрабатывать водные суспензии [15, 16].

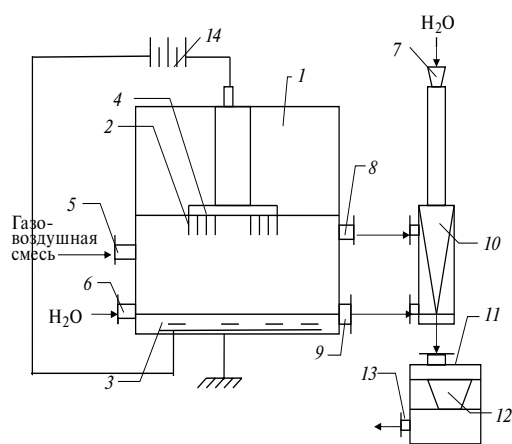
Под воздействием плазмы образуются заряженные частицы, ударные волны, ультразвуковые колебания, радикалы, ультрафиолетовое излучение. А при использовании воздуха или паров воды в производстве плазменного разряда образуется озон, и в результате его трансформации – гидроксильные радикалы. Последние также образуются при непосредственной бомбардировке электронами молекул воды. Результаты экспериментальных работ [9 – 11, 17] свидетельствуют, что образующиеся озон, пероксид водорода, кислород могут непосредственно участвовать в процессах, приводящих к образованию аэрозолей, содержащих озонгидроксильные радикалы. Но основную роль при очистке водных суспензий играют гидроксильные радикалы, характеризующиеся величиной стандартного окислительно-

восстановительного потенциала в пределах 2,8 В, превосходящего этот показатель для озона и уступающего только фтору [18, 19].

В [20, 21] был предложен способ дезактивации микромицетов и устройство для его осуществления. Предполагалось, что эффективная очистка воды от разного рода микромицетов и трудноокисляемых органических и минеральных примесей может быть достигнута путем комплексного воздействия плазменного разряда и УФ-излучения на объем обрабатываемой жидкости и слой газа, расположенного над ней.

**Методика эксперимента.** Предложена методика очистки воды электроплазменной обработкой с УФ-облучением посредством воздействия озонгидроксильных аэрозольных комплексов на очищаемую воду. Очистку воды осуществляли путем первоначального воздействия электрического поля на объем обрабатываемой жидкости и слой газа (воздуха), расположенного над ней. При этом постоянное электрическое поле при импульсном характере изменения плотности тока обуславливает получение озонгидроксильных аэрозольных комплексов, содержащих радикалы [ОН], [НО<sub>2</sub>] и озон [22, 23].

На рис. 1 представлено устройство для очистки воды от микромицетов.



*Рис. 1. Устройство для обработки воды озонгидроксильной аэрозольной смесью: 1 – реакторная зона; 2 – группа верхних электродов; 3 – нижний электрод; 4 – ограничительный экран; 5 – входной патрубок газа; 6 – входной патрубок воды; 7 – входной патрубок эжектора; 8, 9 – выходные патрубки реактора; 10 – эжекторный насос; 11 – смеситель; 12 – УФ-обработка; 13 – выходной патрубок смесителя; 14 – высоковольтный источник питания.*

В реактор (1) через дренажную систему (6) подают воду при условии, чтобы нижние концы верхней группы электродов (2) находились в слое газа (воздуха) над водой. Затем через входной патрубок (5) закачивают воздух. Одновременно с этим на верхнюю группу электродов подают напряжение с высоковольтного источника питания (14). При повышенной напряженности электрического поля (10 – 35,0 кВ/см) на концах электродов генерируются электронные лавины, направленные через прослойку газа, к поверхности жидкости. Возникновение электрического разряда при импульсном характере протекания тока с частотой порядка 90 – 110,0 кГц над поверхностью жидкости в реакторе (1) приводит к образованию в слое газа (воздуха) озонгидроксильной аэрозольной смеси. После чего в эжекторный насос (10) через входной патрубок (7) подают поток обрабатываемой жидкости, что приводит к возникновению принудительного "всасывания" полученной озонгидроксильной смеси из реактора (1) через выходной патрубок (8). В результате поступившая в насос (10) аэрозольная смесь перемешивается с обрабатываемой жидкостью в турбулентном потоке. Затем через выходной патрубок насоса поток направляют в смеситель (11), где проводят дополнительную обработку состава УФ-облучением лампами ДРБ-60 (12) при длине волны 254 нм. Из смесителя (11) через выходной патрубок (13) поток дезактивированной воды направляют на сорбционную очистку путем фильтрования сквозь угольный фильтр с мезопористым активным углем и размером частиц в пределах 0,2 – 0,5 мм.

При проведении экспериментов использовали 10 образцов воды. В качестве микромицетов применяли две разновидности грибов: дрожжеподобные рода *Candida albicans*, которые были получены в Институте эпидемиологии и инфекционных заболеваний им. А.А. Громашевского АМН Украины, и мицелиальные грибы рода *Aspergillus niger*, выделенные из водопроводной воды и идентифицированные согласно [20, 21, 24].

Часть образцов обрабатываемой воды содержала мицелиальные грибы рода *Aspergillus niger*, а часть – дрожжеподобные грибы рода *Candida albican*. Физико-химические характеристики исследуемой воды: бихроматная окисляемость – 270 – 310 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> [25]; коэффициент светопропускания (А,%) – 53 – 56%. При этом прозрачность воды обусловлена содержанием в объеме различных окрашенных и взвешенных органических и минеральных веществ [25]. Степень прозрачности водного объема определяли фотоколориметрически.

Загрязненные водные образцы обрабатывали (очищали) на установке при различных условиях. Продолжительность УФ-обработки изменяли от одной до трех минут; концентрация озонгидроксильной аэрозольной смеси составляла от 0,06 до 0,25 мг/дм<sup>3</sup>.

Степень очистки воды от трудноокисляемых взвешенных органических и минеральных примесей (%) рассчитывали в виде

$$C_{\text{т(ХПК)}} = [(\text{ХПК}_{\text{исх}} - \text{ХПК}_{\text{очищ}}) / \text{ХПК}_{\text{исх}}] \cdot 100. \quad (1)$$

Выживание микроскопических грибов каждого вида определяли по наличию колониобразующих единиц (КОЕ) в 1,0 см<sup>3</sup> при посеве отобранных проб очищенной воды на агаризированную среду Сабуро и культивированию их в течение двух – трех суток при 27°С [26]. Используя модель Чика-Ватсона, определяли степень удаления (СУ) культуры из воды в виде отрицательного логарифма соотношения колоний грибов, выживших после обработки воды, к их исходному количеству [21, 27]:

$$\text{СУ} = -\lg(N_t / N_0), \quad (2)$$

где  $N_t$  – количество КОЕ после обработки воды;  $N_0$  – исходное количество КОЕ в исследуемом объеме воды, см<sup>3</sup>.

В таблице представлены данные по очистке воды от трудноокисляемых примесей и микромицетов.

**Результаты и их обсуждение.** Численную концентрацию озонгидроксильных аэрозолей определяли в диапазоне (1,0 – 100) мкм с помощью лазерного малоуглового измерителя дисперсности Кластер-1 [28, 29]. Полученные данные усредняли по трем измерениям продолжительностью по две минуты. Процентное распределение частиц аэрозолей по диаметрам показано на рис. 2. Установлено, что получаемые частицы озонгидроксильной смеси являются полидисперсными, и в общем объеме аэрозолей преобладают среднedisперсные частицы с размерами (8 – 40) мкм. Общее число частиц составляет 1396 см<sup>-1</sup>.

В образцах очищенной воды определяли бихроматную окисляемость, коэффициент светопропускания, концентрацию микромицетов. Величина бихроматной окисляемости образцов, содержащих мицелиальные грибы рода *Aspergillus niger*, после очистки составляла 28 – 32,0 мгО<sub>2</sub> /дм<sup>3</sup>. Степень очистки достигала 88,1 – 90,1%. Показатель коэффициента светопропускания при этом составлял 91,0 – 93,0% (см. таблицу).

Показатели очистки образцов воды от трудноокисляемых примесей и микроорганизмов различной природы

Номер образца	Исходная вода				Показатели очищенной воды						
	Концентрация микроорганизмов, КОЕ/см <sup>3</sup>		Условия обработки		<i>Aspergillus</i>		<i>Candida</i>		ХПК		А, %
	<i>Aspergillus</i>	<i>Candida</i>	Аэрозольные комплексы, мг/дм <sup>3</sup>	УФ-обработка, мин	Концентрация, КОЕ/см <sup>3</sup>	Степень удаления	Концентрация, КОЕ/см <sup>3</sup>	Степень удаления	мгО/дм <sup>3</sup>	С <sub>т(ХПК)</sub> , %	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	10 <sup>4</sup>	–	0,06	3,0	10 <sup>1,5</sup>	2,5	–	–	71,0	71,1	74,0
2	10 <sup>4</sup>	–	0,08	3,0	10 <sup>0,5</sup>	3,5	–	–	34,0	87,4	91,0
3	10 <sup>4</sup>	–	0,14	2,0	0	4	–	–	32,0	88,1	92,0
4	10 <sup>4</sup>	–	0,20	1,0	0	4	–	–	29,0	89,2	93,0
5	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	0,25	2,0	0	4	–	–	28,0	90,1	93,0
6	–	10 <sup>5</sup>	0,06	3,0	–	–	10 <sup>1,5</sup>	3,5	76,0	75,5	71,0
7	–	10 <sup>5</sup>	0,08	3,0	–	–	10 <sup>1,5</sup>	4,5	30,0	90,3	93,0
8	–	10 <sup>5</sup>	0,14	2,0	–	–	0	5,0	27,0	91,3	94,0
9	–	10 <sup>5</sup>	0,20	1,0	–	–	0	5,0	25,0	91,9	92,0
10	–	10 <sup>5</sup>	0,25	2,0	–	–	0	5,0	25,0	92,0	93,0

Из таблицы видно, что концентрация КОЕ *Aspergillus* и *Candida* в процессе очистки воды предложенным методом снизилась на 2,5 – 5 порядков.

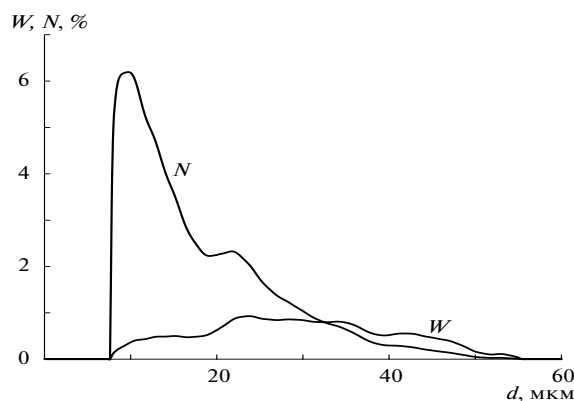


Рис. 2. Процентное распределение частиц аэрозолей по диаметрам (*W* – объемная концентрация частиц (в единицах объема частиц на единицу объема), *N* – отношение числа частиц  $N_i$  диаметра  $d_i$  к общему числу частиц).

Величина бихроматной окисляемости образцов, содержащих до очистки дрожжеподобные грибы рода *Candida albicans*, после очистки от трудноокисляемых взвешенных органических и минеральных примесей составляла 25,0 – 27,0 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. Степень очистки воды достигала 91,9 – 91,3%. Показатель коэффициента светопропускания при этом равнялся 92,0 – 94,0% (см. таблицу).

На основании полученных данных определены оптимальные параметры электрофизического воздействия, обуславливающие перспективность применения предложенных методов обработки водных систем путем использования озонгидроксильных аэрозольных смесей при очистке от трудноудаляемых примесей.

**Выводы.** Определена возможность ионизации состава аэрозолей, получаемых из водных систем, путем их активации в электромагнитном поле, обуславливающим процессы обогащения озонгидроксильными ионами и перспективы применения в очистке водных систем.

Предложена принципиальная форма конструкции установки для обработки воды на основе электроплазменного воздействия и УФ-облучения при импульсном характере изменения плотности электрического поля, позволяющая наработку активного состава озонгидроксильной аэрозольной смеси при дезактивации примесей и обу-



словливающая возможность упрощения технологического влияния за счет устранения, в первую очередь, многоэтапности процесса.

Особенностью предложенной методики обработки водных систем является возможность повышения качества очистки от микромицетов и трудноудаляемых органических и минеральных примесей без использования химических реагентов.

**Резюме.** Визначено перспективи застосування озоногідроксильного складу аерозольної суміші для обробки водних систем шляхом комплексного впливу електроплазмових розрядів і УФ-опромінення водного об'єму під шаром повітряної складової при імпульсному характері регулювання параметрів електрополя в практиці проведення дезактивації домішок запропонованою формою конструкції установки. Використання даної методики обробки води дозволяє підвищити ефективність її очищення від мікроміцетів і важкоокислюваних органічних і мінеральних забруднювачів без попереднього застосування хімічних реагентів.

*V.V. Goncharuk, A.O. Samsoni-Todorov, V.A. Yaremenko,  
O.A. Savchenko, I.A. Vygovskaya, A.V. Mamaenko*

## **AEROSOL COMPLEX IN PROCESSING OF WATER**

### Summary

The prospects of application ozone hydroxyl aerosol formulations for the treatment of water systems through integrated impact electric plasma discharges and UV-irradiation of water volume under a layer of air component under pulsed nature of controlling the density of electric fields in the practice decontamination impurities form the proposed design of the facility. Using this method of water treatment can improve the efficiency of its cleaning micromycetes and difficult-organic and mineral contaminants without the use of chemical reagents.

### Список использованной литературы

- [1] *Гончарук В.В.* Наука о воде. – К.: Наук. думка, 2010. – 511 с.
- [2] *Перспективы* развития фундаментальных и прикладных исследований в области физики, химии и биологии воды / Под ред. В.В. Гончарука. – К.: Наук. думка, 2011. – 407 с.

- [3] Антонченко В.Я., Давыдов А.С., Ильин В.С. Основы физики воды. – К.: Наук. думка, 1991. – 669 с.
- [4] Goncharuk V.V., Samsoni-Todorov A.O., Yaremenko V.A. et al. // J. Water Chem. and Technol. – 2014. – **36**, N 1. – P. 1 – 10.
- [5] Shvadchina Yu.O., Vakulenko V.F., Levitskaya E.E., Goncharuk V.V. // Ibid. – 2012. – **34**, N 5. – P. 370 – 385.
- [6] Пат. 2126771 РФ, МПК СО 2F 1/46 / А.П. Ильин, В.Р. Миненков, В.Н. Грампильцев. – Оpubл. 27.02.1999, Бюл. №4.
- [7] Ширяева С.О. // Журн. техн. физики. – 2000. – **70**, №6. – С. 20 – 26.
- [8] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 620 с.
- [9] Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. – М.: Наука, 1971. – 154 с.
- [10] Дробышевский Э.М., Дунаев Ю.А., Розов С.Н. // Журн. техн. физики. – 1973. – **43**, №6. – С. 1217 – 1221.
- [11] Кучинский Г.С., Морозов У.А. // Там же. – 1982. – **8**, №24. – С. 37 – 46.
- [12] Goncharuk V.V., Samsoni-Todorov A.O., Savchenko O.A. et al. // J. Water Chem. and Technol. – 2015. – **37**, N 1. – P. 10 – 22.
- [13] Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию / Пер. с англ. – М.: Мир. 1987. – 280 с.
- [14] Ролдугин В.И. // Коллоид. журн. – 1987. – **49**, №6. – С. 1125 – 1129.
- [15] Атутов С.Н., Подъячев С.П., Шалагин А.М. // Журн. эксперим.-теор. физики. – 1986. – **91**, №2. – С. 416 – 420.
- [16] Ролдугин В.И. // Коллоид. журн. – 1986. – **51**, №1. – С. 92 – 94.
- [17] Горячев В.Л., Рутберг Ф.Г., Уфимцев А.А. // Письма в Журн. техн. физики. – 1998. – **24**, №3. – С. 91 – 95.
- [18] Пат. 2352529 РФ, МПК СО 2F 9/04, СО 2F 1/50 / Н.А. Аристова, Ю.В. Воронец, И.М. Пискарев. – Оpubл. 20.04.2009, Бюл. №8.
- [19] Правилев А.М. Фотопроцессы в молекулярных газах. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 350 с.
- [20] Saprykina M.N., Samsoni-Todorov A.O., Goncharuk V.V. // J. Water Chem. and Technol. – 2009. – **31**, N 5. – С. 575 – 582.
- [21] Saprykina M.N. // Ibid. – 2012. – **34**, N 5. – P. 407 – 417.
- [22] Пат. 2251533 РФ, МПК СО 2F 1/467 / Н.А. Аристова, Н.А. Беркутов, С.А. Корчаков. – Оpubл. 10.05.2005, Бюл. №9.
- [23] Пат. 105117 Украина, МПК СО 2F 1/72, 1/36, 1/32 / В.В. Гончарук, О.О. Самсоні-Тодоров, В.О. Яременко, І.А. Виговська. – Оpubл. 10.04.2014, Бюл. №7.

- [24] *Саттон Д., Фотергилл Ф., Ринальди М.* Определитель патогенных и условно-патогенных грибов. – М.: Мир, 2001. – 468 с.
- [25] *Лурье Ю.Ю.* Унифицированные методы анализа вод. – М.: Химия, 1972. – С. 261 – 263.
- [26] *Cho M., Chung H., Yoon J.* // *Ozone Sci. Eng.* – 2002. – **24**. – P. 145 – 150.
- [27] *Пат. 92088 Україна, МПК C12 Q 1/04 / В.В. Гончарук, А.В. Руденко, О.С. Савлук, М.М. Саприкіна та ін.* – Опубл. 27.09.2010, Бюл. №18.
- [28] *Goncharuk V.V., Lapshin V.B., Samsoni-Todorov A.O. et al.* // *J. Water Chem. and Technol.* – 2013. – **35**, N 3. – P. 128 – 132.
- [29] *Goncharuk V.V., Lapshin V.B., Chichaeva M.A., Matveeva I.S., Samsoni-Todorov A.O., Taranov V.V., Syroezhkin A.V.* // *Ibid.* – 2012. – **34**, N 1. – P. 1 – 10.

Поступила в редакцию 23.10.2015 г.