

**В.В. Гончарук, Н.Г. Потапченко, В.Ф. Вакуленко,
О.С. Савлук, В.Н. Косинова, А.Н. Сова**

**ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ ВОДЫ СОВМЕСТНЫМ
ДЕЙСТВИЕМ ОЗОНА И УФ-ОБЛУЧЕНИЯ
В ПРОТОЧНОМ РЕЖИМЕ**

Исследована эффективность обеззараживания и деструкции органических примесей модельной и природной вод отдельно и совместно озоном и УФ-излучением в проточном режиме на лабораторной установке производительностью 0,02 м³/ч. Согласованы параметры озонирования и О₃/УФ-обработки днепровской воды в проточном режиме, обеспечивающие степень ее обеззараживания и обесцвечивания, соответствующую нормативам на питьевую воду. Показано, что применение О₃/УФ-обработки повышает степень обеззараживания и очистки днепровской воды от органических примесей по сравнению с озонированием или УФ-облучением.

В последнее время пристальное внимание ученых и экологов обращено на новые способы обработки воды для питьевых нужд, в которых используется комбинированное воздействие таких экологически безопасных дезинфектантов, как озон и ультрафиолетовое излучение. Обеззараживание воды при О₃/УФ-обработке – сложный процесс, зависящий от многих факторов. Оптимальные режимы сочетания озонирования и УФ-облучения для обеззараживания модельной и природных вод в непроточном барботажном реакторе установлены ранее в [1 – 3]. Показана зависимость степени обеззараживания воды при О₃/УФ-обработке от дозы УФ-излучения и положения УФ-облучения в технологической схеме водоподготовки. При оптимальном режиме О₃/УФ-обработки исследуемых вод достигался аддитивный эффект взаимодействия двух указанных дезинфектантов.

Цель данного исследования – оценка эффективности О₃/УФ-обработки для обеззараживания и очистки природной воды в проточном режиме.

Методика эксперимента. Эффективность обеззараживания и очистки природных вод озоном и озоном совместно с УФ-излучением в проточном режиме исследовали на установке производительностью 20 дм³/ч, смонтированной на базе описанной ранее [4] лабораторной установки с компьютерным контролем технологических параметров процесса озонирования. Установка включала реактор барботажного типа ($V = 10,5$ дм³) со

сменными кварцевыми кожухами для размещения источников УФ-излучения – лампы ДРБ-8 (вдоль оси реактора) или ИФП-800 (перпендикулярно оси реактора). Озон получали из кислорода воздуха с помощью генератора озона на тлеющем разряде производительностью 1 г озона в 1 ч, изготовленного Харьковским физико-техническим институтом. Воду и озono-воздушную смесь (ОВС) подавали в реактор прямоотокм снизу. Постоянную скорость протока воды ($0,30 \pm 0,02$ дм³/мин) обеспечивали при помощи перистальтического насоса из буферной емкости (20 дм³), уровень воды в которой поддерживали постоянным.

Исследования проводили на модельных растворах гуминовой кислоты (ГК) фирмы "Fluka" с добавлением тест-микроорганизма *E. coli* 1257 (10^7 КОЕ/дм³) и непосредственно на днепровской воде (табл. 1). Суспензию бактерий *E. coli* 1257 для модельной воды готовили согласно [4]. Речную воду, отобранную в день проведения экспериментов, предварительно фильтровали через бумажный фильтр. Содержание колиформных бактерий (КБ) в днепровской воде колебалось в диапазонах $5,15 \cdot 10^2 - 6,7 \cdot 10^3$, гетеротрофных бактерий (ГБ) – $1,13 \cdot 10^4 - 3,6 \cdot 10^5$ КОЕ/см³. Объем модельной воды в реакторе составлял 6,0 – 6,4 и 9,6, днепровской воды – 9,6 дм³.

Таблица 1. Характеристика модельной воды и воды р. Днепра

Вода	С _{ГК} , мг/дм ³	Цвет- ность, град	A ₃₆₄ (5 см)	A ₂₅₄ (1 см)	ХПК, мг О/ дм ³	ООУ, мг/дм ³	Численность бактерий		рН	С _{НСО₃⁻} , мг- экв/дм ³
							ГБ, КОЕ/см ³	КБ, КОЕ/дм ³		
Днеп- ровская (май – июль)	–	37–51	0,27– 0,43	0,30– 0,40	35– 42	13,9– 16,8	$1,13 \cdot 10^4 -$ $3,6 \cdot 10^5$	$5,15 \cdot 10^2 -$ $6,7 \cdot 10^3$	7,8– 8,6	2,5
Модель- ная	5,0– 10,0	27–67	0,22– 0,56	0,17– 0,27	–	–	–	10 ⁷	7,6– 8,3	1,0– 2,0

При О₃/УФ-обработке исследуемых вод УФ-облучение применяли либо одновременно с началом подачи ОВС в воду, либо после установления квазистационарного режима при ее озонировании.

Степень обеззараживания воды выражали через логарифм отношения количества выживших бактерий (N_t) к их начальному количеству (N_0). Степень очистки воды контролировали по спектрофотометрическим показателям (A_{364} , A_{254}), характеризующим цветность и ароматическую структуру ГК, и обобщенным показателям (ХПК, содержание общего органи-

ческого углерода (ООУ)) [5]. Концентрацию растворенного озона (C_{O_3}) определяли с помощью индигокармина [6].

Дозы поданного ($D_{\text{пд}}$) и поглощенного ($D_{\text{пг}}$) озона (мг/дм³) в квазистационарном режиме рассчитывали по уравнениям

$$D_{\text{пд}} = C_0 \cdot v_{\text{овс}} / v_{\text{в}} ; \quad (1)$$

$$D_{\text{пг}} = (C_0 - C_t) \cdot v_{\text{овс}} / v_{\text{в}} , \quad (2)$$

где C_0 и C_t – концентрация озона в ОВС соответственно на входе и выходе из реактора в квазистационарном режиме, мг/дм³; $v_{\text{овс}}$ – скорость подачи ОВС; $v_{\text{в}}$ – скорость протока воды, дм³/мин.

Согласно [7] действие УФ-излучения на тест-микроорганизмы характеризуется средней дозой УФ-излучения ($D_{\text{уф}}$), равной произведению усредненной по объему реактора освещенности (или скорости подачи дозы УФ-излучения, мДж/(с·см²)) на среднюю продолжительность экспозиции. Следует отметить, что в проточном режиме скорость инактивации микроорганизмов зависит не только от средней дозы облучения, но и от конструкции реактора, интенсивности перемешивания, скорости протока и др. Наиболее адекватной характеристикой действия света на микроорганизмы в таких условиях является биодоза, или так называемая эквивалентная приведенная доза (ЭПД) [8,9]. Ее определение, однако, требует тщательных и обширных предварительных исследований. В то же время для сравнительных исследований, как, например, эффективности некоторых конструкций реакторов, бактерицидного действия разных типов ламп или устойчивости различных микроорганизмов к УФ-излучению, оценки влияния условий перемешивания, совместного и раздельного действия УФ-излучения и других реагентов на степень обеззараживания, может быть успешно использована средняя доза. В некоторых случаях (например, в непроточном реакторе с быстрым равномерным перемешиванием и сравнительно продолжительной экспозицией [7]) значение средней дозы близко к ЭПД. Ее использование позволяет оценить также и чувствительность микроорганизмов к излучению. В проточных реакторах с быстрым объемным перемешиванием средняя доза УФ-излучения значительно превышает ЭПД и позволяет проводить только относительные измерения [10]. В настоящее время достаточно точно рассчитанная средняя доза является, пожалуй, наиболее употребляемой световой характеристикой при описании процессов дезинфекции, в том числе и в проточных реакторах [10 – 12]. Поэтому в наших экспериментах для количественной характеристики УФ-излучения использовали рассчитанную среднюю дозу ($D_{\text{уф}}$).

Результаты и их обсуждение. Обеззараживание модельной воды.

Сравнение эффективности озонирования и O_3 /УФ-обработки модельной воды ($C_{ГК} - 10$ мг/дм³, цветность – 67 град, щелочность – 2 мг-экв/дм³, $v_v - 6,4$ и $9,6$ дм³) в проточном и непроточном режимах показало, что доза поглощенного озона, необходимая для достижения равного качества очищенной воды, в проточном режиме повышалась в 1,7 – 2,5 раза (табл. 2). Частично увеличение требуемой дозы озона компенсировалось повышением коэффициента использования озона ($D_{пр}/D_{пл}$, %) при обработке воды в проточном режиме. Доля поглощенного озона при озонировании исследуемых вод в проточном режиме возрастала на ~ 20% при снижении соотношения скоростей подачи ОВС и воды с (3 – 4):1 до (0,9 – 1,2):1. Незначительное дополнительное увеличение доли поглощенного озона (2 – 12%) в процессе O_3 /УФ-обработки модельной воды (см. табл. 2) обусловлено малой мощностью источника УФ-излучения (ДРБ-8). Плотность УФ-облучения воды в проточном реакторе, используемом в данной работе, составляла 0,13 – 0,17 мДж/(см²·с), что в ~ 10 – 15 раз ниже, чем в ранее проведенных исследованиях на лабораторной установке в непроточном режиме [7, 13]. Влияние УФ-облучения такой интенсивности на степень обесцвечивания модельной воды озоном было незначительным, дополнительное снижение цветности не превышало 1 – 2 град.

При обеззараживании модельной воды, инфицированной *E. coli*, УФ-излучением и озоном отдельно и совместно (табл. 3) выявлено, что степень комбинированного (O_3 /УФ) обеззараживания модельной воды при $D_{пр}$ озона 1,07 – 3,48 мг/дм³ и $D_{УФ}$ 232 – 322 мДж/см² значительно выше, чем при озонировании, но лишь слегка выше или равна, чем при одном УФ-облучении. При прочих равных условиях снижение скорости подачи ОВС повышает степень обеззараживания воды. Так, при снижении скорости подачи ОВС с 1,0 до 0,3 дм³/мин степень обеззараживания модельной воды возрастает с 3,6 – 3,8 до 5,6 lg. ед.

Качество модельной воды, обработанной O_3 /УФ, по спектрофотометрическим характеристикам также выше, чем озонированной (см. табл. 3). Максимальная степень снижения оптической плотности при 254 и 364 нм (соответственно на 26 – 32 и 19 – 29%) достигалась в процессе ее O_3 /УФ-обработки. При равных дозах поглощенного озона комбинированная обработка повышала степень очистки воды по указанным показателям соответственно на ~ 7 и 4 – 6%. Остаточная концентрация растворенного озона в модельной воде, обработанной O_3 /УФ, снижалась на 17 – 33% по сравнению с озонированной водой.

Таблица 2. Сравнение эффективности озонирования и O_3 /УФ-обработки модельной воды в непроточном и проточном режимах

Режим обработки	Способ обработки	$h_{\text{слоя}}, \text{ м}$	Цветность очищенной воды, град	Скорость подачи O_3 , $\text{мг}/(\text{дм}^3 \cdot \text{мин})$	$I_{\text{УФ}}, \text{ мДж}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$	$t, \text{ мин}$	Доза, $\text{мг}/\text{дм}^3$	Доля, %
							поглощенного озона	
Непроточный	O_3	0,40	16±2	1,05±0,01	0	14	3,5	24
	$O_3/\text{УФ}$						2,7	22
Проточный	O_3	0,40	16±2	1,06±0,04	0	22	6,9	31
	$O_3/\text{УФ}$						6,7	33
Непроточный	O_3	0,60	12±2	0,9±0,05	0	14	4,6	38
	$O_3/\text{УФ}$						4,5	40
Проточный	O_3	0,60	12±2	0,7±0,03	0	29	7,7	40
	$O_3/\text{УФ}$						8,2	43

Примечание. Соотношение $v_{\text{овс}}/v_{\text{в}} = (3,1 \pm 0,2):1$.

Таблица 3. Эффективность обеззараживания *E. coli* в модельной воде озоном, УФ-излучением и $O_3/УФ$

Способ обработки	Параметры обработки				Качество исходной воды			Качество обработанной воды			
	$v_{\text{овс}}$, дм ³ / мин	$C_{\text{оз}}$ в ОВС, ₃ мг/дм ³	Доза озона, мг/дм ³		Численность <i>E.coli</i> , КОЕ/дм ³	A_{254} (2 см)	A_{364} (5 см)	Степень обеззараживания, $\lg N_t/N_0$	A_t/A_0 при λ , нм		$C_{\text{оз}}$, мг/дм ³
			поданного	поглощенного					254	364	
O_3	0,3	2,7	2,7	1,1	$1,62 \cdot 10^7$	0,49	0,35	-0,8	0,76	0,77	0,018
УФ	0,3*	–	–	–	$7,6 \cdot 10^6$	0,49	–	-5,6	–	–	–
$O_3/УФ^{**}$	0,3	2,7	2,7	1,3	$1,62 \cdot 10^7$	0,49	0,35	-5,9	0,71	0,74	0,015
O_3	1,0	2,2	7,0	3,2	$7,85 \cdot 10^6$	0,41	0,34	-1,0	0,80	0,64	0,024
$O_3/УФ^{***}$	1,0	2,2	7,0	3,5	$7,85 \cdot 10^6$	0,41	0,34	-3,6	–	0,55	0,016
O_3	1,0	2,0	6,5	2,2	$1,46 \cdot 10^7$	0,43	0,38	-0,3	0,87	0,74	–
УФ	1,0*	–	–	–	$1,46 \cdot 10^7$	0,49	0,43	-3,6	–	–	–
$O_3/УФ^{**}$	1,0	2,0	5,7	2,0	$9,5 \cdot 10^6$	0,43	0,38	-3,6	0,81	0,68	0,025

*Скорость подачи воздуха для перемешивания; **одновременная обработка воды озоном и УФ-излучением; ***применение УФ-облучения воды после достижения квазистационарного состояния при озонировании.

Динамика гибели тест-микробов и изменения спектрофотометрических характеристик модельной воды на выходе из проточного реактора после ее O_3 /УФ-обработки представлена на рис. 1. При включении УФ-облучения одновременно с началом подачи ОВС равновесная степень обеззараживания модельной воды достигалась быстро (в течение 1 мин), при этом количество бактерий в воде снижалось на 3,3 порядка (рис. 1, а, кривая 1). Равновесное качество воды по спектрофотометрическим характеристикам не достигалось из-за короткой продолжительности (15 мин) эксперимента (рис. 1, а, кривые 2, 3).

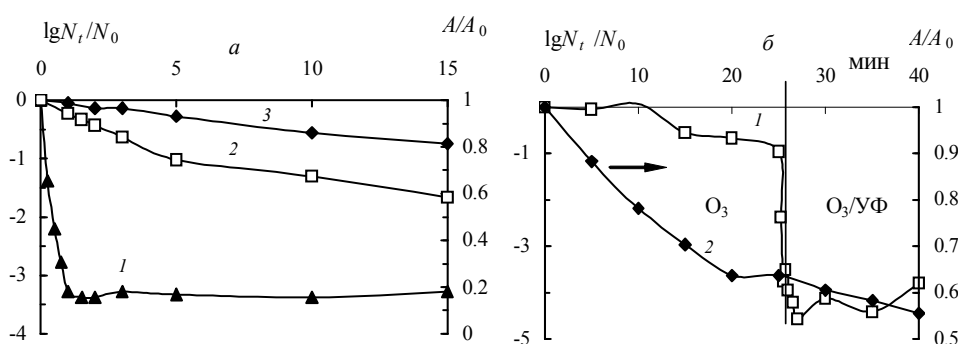


Рис. 1. Динамика гибели *E. coli* (1) и изменения A_{364} (2) и A_{254} (3) модельной воды на выходе из проточного реактора в процессе O_3 /УФ-обработки при одновременном (а) и последовательном (б) применении озонирования и УФ-облучения. Скорость подачи ОВС – 1 дм³/мин; C_{O_3} в ОВС – 2,0 мг/дм³; соотношение $v_{OVC}/v_B = 2,9$

При подключении УФ-облучения модельной воды после достижения квазистационарного качества в процессе озонирования в проточном режиме (рис. 1, б) степень ее обеззараживания и обесцвечивания существенно повышалась. Количество бактерий в течение 2 мин O_3 /УФ-обработки снизилось на 3,8 – 4,6 порядка, в то время как при озонировании – лишь на один порядок. Колебания количества оставшихся бактерий в выходящей воде не превышали одного порядка. УФ-облучение модельной воды при равной продолжительности обработки снижало содержание бактерий максимально на 3,6 порядка.

Обеззараживание и очистка днепровской воды. Степень очистки и обеззараживания днепровской воды при озонировании и O_3 /УФ-обработке (лампа ДРБ-8) в проточном режиме после достижения равновесного состояния приведена в табл. 4. Изменение состава органических примесей и численности микроорганизмов в исходной воде затрудняло

согласование необходимых минимальных доз окислителя для получения нормируемого качества очищенной воды одновременно по физико-химическим и микробиологическим показателям. Корреляция между снижением цветности воды и численностью микроорганизмов в ней не всегда наблюдалась. Так, из данных табл. 4 видно, что обработка указанной воды с невысокой исходной цветностью (32 град) дозами озона 1,7 – 2,8 мг/дм³ была достаточной для ее обесцвечивания до ≤ 20 град, что удовлетворяет требованиям как ГОСТа 2874-82 "Вода питьевая" [14], так и СанПиНа № 136/1940-96) [15]. Однако качество воды по микробиологическим показателям оставалось неудовлетворительным. Озонирование воды, отобранной в другой период (исходная цветность – 37 – 38 град), даже высокими дозами поглощенного озона (8,7 – 9,1 мг/дм³) не обеспечивало нормируемое качество по микробиологическим показателям, несмотря на глубокое обесцвечивание обработанной воды (до 8 – 10 град). В то же время для достижения требуемой степени обеззараживания воды с еще более высокой исходной цветностью (47 град) достаточными оказались дозы озона 6,5 – 7,5 мг/дм³, хотя цветность обработанной воды слегка превышала 20 град.

УФ-облучение озонируемой воды, отобранной в разное время (май – июль), позволяло достичь требуемого качества по микробиологическим показателям (содержание ГБ – < 100 КОЕ/см³ и КБ – < 3 КОЕ/дм³) при дозах поглощенного озона не ниже 6,5 мг/дм³. В то же время одно озонирование воды даже несколько более высокими дозами ($D_{\text{инт}}$ – 7,0 – 8,7 мг/дм³) не всегда снижало численность тестируемых микроорганизмов до нормируемых значений (см. табл. 3). При равных дозах поглощенного озона (~ 7 мг/дм³) одновременное УФ-облучение озонируемой воды приводило к снижению численности КБ дополнительно на один порядок, а ГБ – на 0,5 порядка, что обеспечило соответствие ее качества требованиям нормативных документов по микробиологическим показателям. Хотя цветность воды, очищенной обоими способами, оставалась довольно высокой (~ 30 град).

Значение ХПК воды снижалось на 20 – 36% при озонировании дозами 6,5 – 9,1 мг/дм³. Использование УФ-облучения повышало степень очистки воды по ХПК на ~ 5%. Степень минерализации ООУ в процессе озонирования воды варьировала от 2,5 – 5% (при дозах поглощенного озона 1,7 – 3,2 мг/дм³) до 23 – 34% (при дозах озона 8,0 – 8,7 мг/дм³). Использование O₃/УФ-обработки, в зависимости от дозы озона, повышало степень очистки воды по ООУ на 2,9 – 12,5% (см. табл. 4). Таким образом, данные указанной таблицы свидетельствуют о том, что влияние УФ-облучения на степень разложения органических примесей при озонировании зависит от качества исходной речной воды и дозы поглощенного озона.

Таблица 4. Сравнение степени очистки и обеззараживания воды р. Днепра озоном и $O_3/УФ$ в проточном режиме

Способ обработки	Доза озона, мг/дм ³		Цветность, град	ООУ, ₃ мг/дм ³	ΔООУ, %	ХПК, ₃ мг/дм ³	ΔХПК, %	Кол-во бактерий в равновесном состоянии	
	поданного	поглощенного						ГБ, КОЕ/см ³	КБ, КОЕ/дм ³
Исходная вода №1	0	0	38	16,8	–	42	–	3·10 ⁴	4,1·10 ³
О ₃	21,6	8,7	10	11,1	33,9	27	35,7	15 – 31	21 – 30
О ₃ /УФ	24,3	10,1	10	9,0	46,4	25	40,5	8 – 20	< 3
Исходная вода №2	0	0	37	–	–	36	–	1,16·10 ⁴	4,1·10 ³
О ₃	25,7	9,1	8	–	–	28	22,2	6 – 25	21 – 36
О ₃ /УФ	27,2	12,7	8	–	–	26	27,8	1 – 48	< 3
Исходная вода №3	0	0	47	15,4	0	35	–	1,13·10 ⁴	5,15·10 ²
О ₃	5,3	2,9	32	15,0	2,6	31	11,4	280 – 340	30
То же	12,4	6,5	25	14,0	9,1	28	20,0	30 – 45	< 3
“ – “	18,1	7,5	23	13,4	13,0	28	20,0	20 – 45	< 3
“ – “	15,2	8,0	22	11,9	22,7	27	22,9	–	–

Продолжение табл. 4

Исходная вода №4	0	0	52	13,9	0	37	–	$3,6 \cdot 10^5$	$6,7 \cdot 10^3$
O ₃	5,5	3,2	35	13,2	5,0	–	–	152 – 560	80 – 162
O ₃ /УФ	5,5	3,3	34	12,8	7,9	–	–	35 – 62	33 – 51
O ₃	14,0	7,0	29	12,8	7,9	–	–	96 – 160	21 – 30
O ₃ /УФ	14,0	7,2	30	12,0	13,7	–	–	32 – 55	< 3
Исходная вода №5	0	0	32	14,2	0	–	–	$5 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^3$
O ₃	4,5	1,7	21	13,8	2,8	–	–	800	350
O ₃ /УФ	4,5	1,7	21	12,6	11,3	–	–	95 – 100	166
O ₃	8,2	2,8	16	13,0	8,5	–	–	40 – 260	106 – 125
O ₃ /УФ	8,2	3,1	15	12,3	13,4	–	–	30 – 65	5 – 40

На стадии обесцвечивания воды (до 20 град) повышение степени минерализации ООУ при O_3 /УФ-обработке заметно ниже, чем при цветности очищенной воды 10 град.

Динамика снижения численности ГБ и КБ в воде, обработанной разными дозами озона, на выходе из проточного реактора приведена на рис. 2. Доза поглощенного озона $2,9 \text{ мг/дм}^3$ была недостаточной для снижения их численности в воде до нормируемых значений.

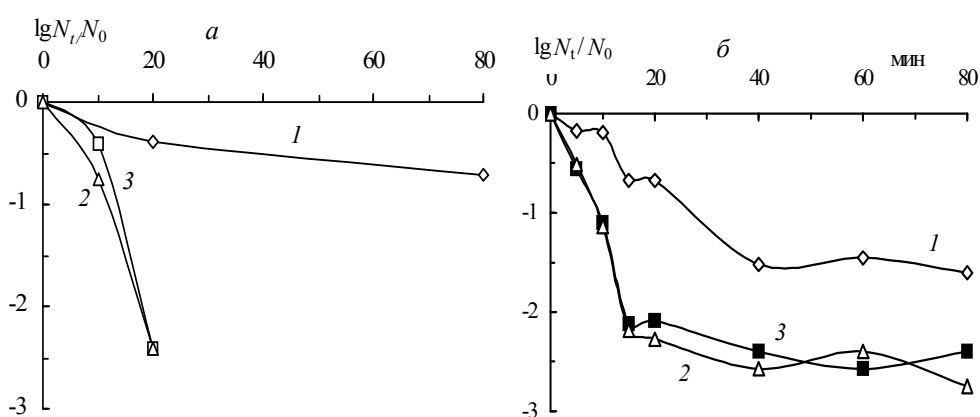


Рис. 2. Динамика изменения численности колиформных (а) и гетеротрофных (б) бактерий в озонируемой в проточном режиме днепровской воде при дозах поглощенного озона: $2,9$ (1); $6,5$ (2) и $7,5 \text{ мг/дм}^3$ (3). Исходная цветность воды – 47 град; содержание гетеротрофных бактерий – $1,13 \cdot 10^4 \text{ КОЕ/дм}^3$, колиформных – $5,12 \cdot 10^2 \text{ КОЕ/см}^3$; соотношение $v_{\text{овс}}/v_6$ – 1,0 (1); 1,8 (2) и 3,1 (3)

При дозах поглощенного озона $6,5$ и $7,5 \text{ мг/дм}^3$ коли-индекс озонируемой воды снижался до < 3 уже через 20 мин (рис. 2, а). Однако квазистационарное качество по содержанию ГБ при указанных дозах устанавливалось через ~ 60 мин (рис. 2, б), т. е. после двукратной смены речной воды в реакторе; остаточная их численность составляла 340; 45 и 20 КОЕ/см³ при дозах поглощенного озона соответственно $2,9$; $6,5$ и $7,5 \text{ мг/дм}^3$.

Равновесное качество днепровской воды по спектрофотометрическим характеристикам (A_{364} , A_{254}) при обработке ее разными дозами озона в аналогичных условиях также достигалось через 60 мин (рис. 3).

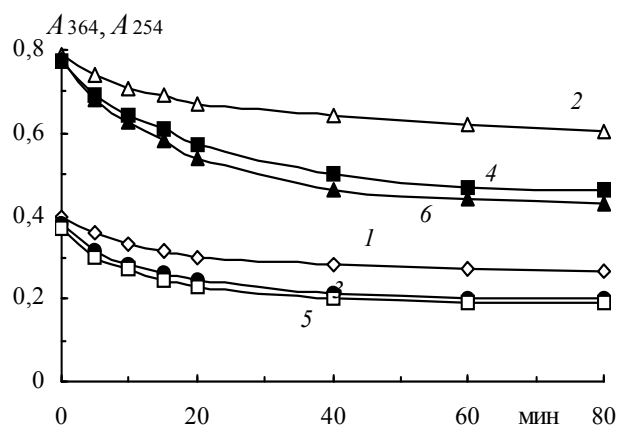


Рис. 3. Динамика изменения A_{364} (1, 3, 5) и A_{254} (2, 4, 6) озонируемой днепровской воды на выходе из проточного реактора при дозах поглощенного озона: 2,9 (1, 2), 6,5 (3, 4), 7,6 мг/дм³ (5, 6)

Динамика снижения численности гетеротрофных и эндобактерий в выходящей из реактора воде при ее обработке УФ-излучением и озоном отдельно и совместно в проточном режиме показана на рис. 4. На рис. 4, б приведены данные по выживаемости эндобактерий, т. е. всех бактерий, выросших на среде Эндо. Так как коли-индекс (численность колиформных бактерий) при данных условиях обработки быстро снижался до значения < 3 , его изменение невозможно было отобразить графически.

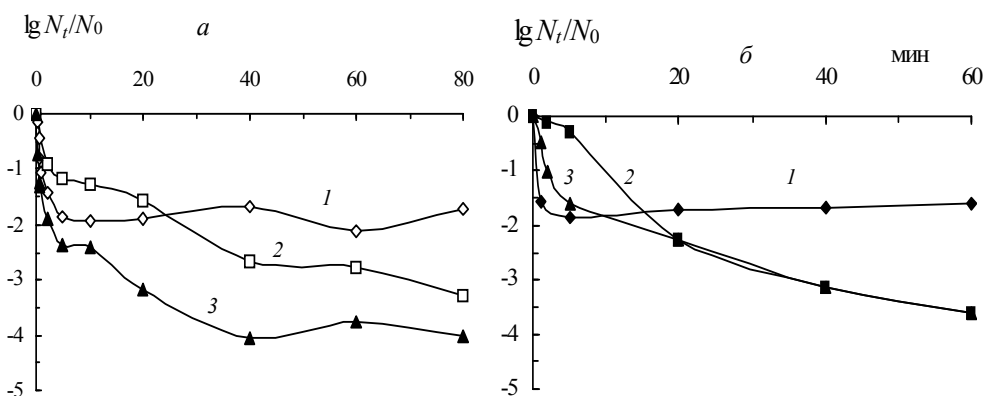


Рис. 4. Динамика отмирания гетеротрофных бактерий (а) и эндобактерий (б) в днепровской воде при ее УФ-облучении (1), озонировании (2) и O_3 /УФ-обработке (3) в проточном режиме. Дозы поглощенного озона: 9,0 (2), 12,8 мг/дм³ (3). Исходная цветность воды – 35 град; содержание гетеротрофных бактерий – $1,16 \cdot 10^4$ КОЕ/дм³, колиформных – $4,1 \cdot 10^3$ КОЕ/см³; C_{O_3} в озono-воздушной смеси – 6,35 мг/дм³; соотношение v_{O_3}/v_6 – 4,3

Равновесное качество воды по микробиологическим показателям при УФ-облучении устанавливалось уже через 5 мин (рис. 4), однако численность ГБ ($132 - 220 \text{ КОЕ/см}^3$) и КБ ($33 - 105 \text{ КОЕ/дм}^3$) существенно превышала нормируемые значения. При $\text{O}_3/\text{УФ}$ -обработке этой воды квазистационарная степень ее обеззараживания достигалась через 40 – 60 мин (рис. 4, а), так же, как и при озонировании (рис. 2, 4). Степень обеззараживания днепровской воды по гетеротрофным микроорганизмам значительно возрастала при совместном действии озона и УФ-излучения (рис. 4, а) по сравнению с озонированием или УФ-облучением. В начальный период (2 – 5 мин) $\text{O}_3/\text{УФ}$ -обработки гибель тест-микроорганизмов ускорялась в 2,5 – 5,9 раз по сравнению с действием одного озона (рис. 4, а, б). Необходимая степень обеззараживания этой пробы воды достигалась только при $\text{O}_3/\text{УФ}$ -обработке. Сравнение степени обеззараживания ($\lg N_t/N_0$) воды с помощью озона, УФ-излучения и $\text{O}_3/\text{УФ}$ -обработки в проточном реакторе в равновесном состоянии по ГБ (соответственно – 2,79; –1,72 и – 4,0) указывает на аддитивный характер взаимодействия исследуемых дезинфектантов.

Повышение степени обеззараживания днепровской воды в процессе $\text{O}_3/\text{УФ}$ -обработки отчетливо проявлялось при подключении УФ-облучения после достижения ее квазистационарного качества при озонировании в проточном режиме (через 60 мин) (рис. 5).

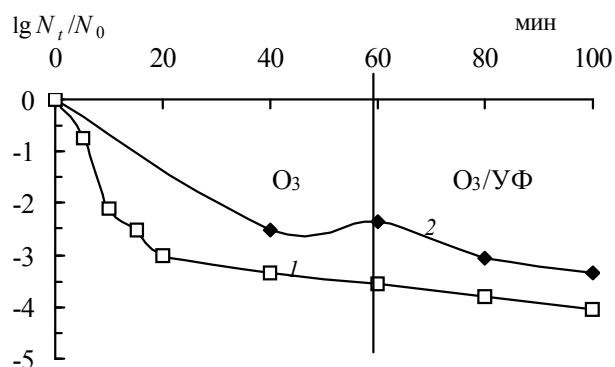


Рис. 5. Динамика снижения численности гетеротрофных (1) и колиформных (2) бактерий в днепровской воде на выходе из проточного реактора при подключении УФ-облучения после достижения равновесного качества озонируемой воды. Доза поглощенного озона – $7,1 \pm 0,1 \text{ мг/дм}^3$; исходная цветность воды – 51 град; содержание гетеротрофных бактерий – $3,6 \cdot 10^5 \text{ КОЕ/см}^3$, колиформных – $6,7 \cdot 10^3 \text{ КОЕ/дм}^3$

Разложение растворенного озона в объеме озонируемой речной воды регистрировали примерно через 5 мин после подключения УФ-облуче-

ния, вследствие чего его равновесная концентрация снижалась на 12 – 38 % по сравнению с озонируемой водой.

Выводы. Таким образом, изучение эффективности очистки и обеззараживания модельной и природной вод в проточном режиме подтвердило, что O_3 /УФ-обработка повышает степень их обеззараживания и степень минерализации органических примесей днепровской воды по сравнению с озонированием и УФ-облучением. Проведенные исследования позволили согласовать параметры озонирования и O_3 /УФ-обработки речной воды в проточном режиме, обеспечивающие степень ее обеззараживания и обесцвечивания, соответствующую нормативам на питьевую воду.

Озонирование воды без какой-либо предварительной обработки дозами поглощенного озона 7,5 – 9,0 мг/дм³ в летний период гарантирует степень ее обесцвечивания и обеззараживания согласно требованиям СанПиНа № 136/1940-96 на питьевую воду и снижает содержание ООУ на 13 – 34, ХПК – на 20 – 36%.

Применение O_3 /УФ-обработки днепровской воды даже при существенно более низкой, чем в лабораторных исследованиях [13], плотности УФ-облучения повышает степень ее обеззараживания и очистки от органических примесей по ХПК на 5, по ООУ – на 2,9 – 12,5% по сравнению с озонированием.

Уменьшение соотношения объемных расходов ОВС и воды от (3 – 4):1 до (0,9 – 1,2):1 увеличивает коэффициент полезного использования озона и степень обеззараживания воды.

Резюме. У проточному режимі на лабораторній установці продуктивністю 0,02 м³/год досліджено ефективність знезараження та деструкції органічних домішок модельної і природної вод при спільній та індивідуальній дії озону і УФ-випромінювання. Узгоджено параметри озонування та O_3 /УФ-обробки дніпровської води в проточному режимі, необхідні для досягнення ступеня її знезараження та знебарвлення у відповідності з нормативними вимогами на питну воду. Показано, що застосування O_3 /УФ-обробки підвищує ступінь знезараження та очистки води від органічних домішок у порівнянні з озонуванням чи УФ-опроміненням.

*V.V.Goncharuk, N.G. Potapchenko, V.F. Vakulenko, O.S. Savluk,
V.N. Kosinova, A.N. Sova*

DESINFECTATION OF WATER BY OZONE AND UV-IRRADIATION JOINTLY IN THE STREAMING REGIME

Summary

In the streaming regime on the laboratory unit with the productivity of 0.02 m³/h it was studied the efficiency of disinfection and destruction of the organic admixtures in

model and natural water under combined and individual action of ozone and UV-irradiation. Parameters of ozonation and O₃/UV treatment of water from Dnieper River in the streaming conditions need for reaching the degree of disinfection and decoloration to meet the drinking water standards were adjusted. It was shown that usage of O₃/UV treatment increases the degree of disinfection and purification of Dnieper water from the organic admixtures on comparison to ozonation or UV-irradiation.

1. Гончарук В.В., Потапченко Н. Г., Савлук О.С. и др. // Химия и технология воды. – 2003. – **25**, №2. – С. 179 – 190.
2. Гончарук В.В., Потапченко Н. Г., Савлук О.С. и др. // Там же. – 2003. – **25**, № 5. – С. 487 – 496.
3. Гончарук В.В., Потапченко Н. Г., Савлук О.С. и др. // Там же. – 2004. – **26**, № 2. – С. 202 – 213.
4. Гончарук В.В., Потапченко Н.Г., Косинова В.Н., Сова А.Н. // Там же. – 2001. – **23**, № 4. – С. 427 – 438.
5. Гончарук В.В., Вакуленко В.Ф., Сова А.Н. и др. // Там же. – 2003. – **25**, № 5. – С. 407 – 427.
6. Bader H., Hoigne J. // Water Res. – 1981. – **15**, N 4. – P. 449 - 456.
7. Гончарук В.В., Чорноморец М.П., Потапченко Н. Г и др. / Химия и технология воды. – 2002. – **24**, № 4. – С. 316 – 327.
8. Sommer R., Cabaj A. // Water Sci. and Technol. – 1993. – **27**, N 3/4. – P. 357 – 362.
9. Cabaj A., Sommer R. // Rad. Protect. Dosimetry. – 2000. – **91**, N 1/3. – P. 139 – 142.
10. Sommer R., Cabaj A., Schoenen D. et al // Water Sci. and Technol. – 1995. – **31**, N 5/6. – P. 147 – 156.
11. Blatchley III. E.L. // Water Res. – 1997. – **31**, N 9. – P. 2205 – 2218.
12. Blatchley III. E.L., Do-Quang Z., Janex M.-L., Laine J.-M. // Water Sci. and Technol. – 1998. – **38**, N 6. – P. 63 – 69.
13. Гончарук В. В., Потапченко Н. Г., Вакуленко В.Ф. и др. // Химия и технология воды. – 2005. – **27**, № 3. – С. 266 – 282.
14. ГОСТ 2874-82. Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством. – М.: Госкомстандарт, 1982. – 7 с.
15. СанПіН № 136/1940-96. Державні санітарні правила і норми "Вода питна. Гігієнічні вимоги до якості води централізованого господарсько-питного водопостачання". – Київ, 1996.

Ин-т коллоид. химии и химии воды
им. А.В. Думанского НАН Украины,
г. Киев

Поступила 08.12.2005