

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ ЭКСИЛАМП ДЛЯ СИМУЛЬТАННОЙ
ОЧИСТКИ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ****И.М. Центер, К.Д. Алексеев, С.А. Попова, Н.М. Гаркушева, Г.Г. Матафонова, В.Б. Батоев**

Ирина Михайловна Центер (ORCID 0000-0001-9317-3880)*, Куприян Дмитриевич Алексеев (ORCID 0009-0001-6464-0600), Светлана Александровна Попова (ORCID 0000-0002-2245-2898), Наталья Михайловна Гаркушева (ORCID 0000-0002-6404-3021), Галина Георгиевна Матафонова (ORCID 0000-0001-7383-9788), Валерий Бабудоржиевич Батоев (ORCID 0000-0002-9548-2975)

Лаборатория инженерной экологии, Байкальский институт природопользования СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, Российская Федерация, 670047

E-mail: tsenter@binm.ru*

*Работа посвящена сравнительному исследованию эффективности KrCl- (222 нм) и XeVr-эксилламп (282 нм) для симультанной (одновременной) очистки и обеззараживания модельных водных растворов без и в присутствии экологически чистого окислителя пероксида водорода. На примере органического фармполлутанта безафибрата (20 мкмоль/л), гиполипидемического лекарственного средства, и индикаторных бактерий *Escherichia coli* и *Enterococcus faecalis* (10^5 КОЕ/мл) показана более высокая эффективность KrCl-эксилламп как для прямого фотолиза, так и окисления в пероксидной системе {УФ/Н₂O₂}. Установлено, что скорости деструкции безафибрата существенно ниже, чем скорости инактивации, и для полного обеззараживания воды требуется на порядок более низкая продолжительность облучения, чем для деструкции. Внесение безафибрата вызвало ингибирование инактивации *E. faecalis* во всех случаях, тогда как для *E. coli* – только при прямом фотолизе при 222 нм. Это привело к незначительному увеличению продолжительности облучения для снижения исходного числа клеток на 5 порядков, т.е. полной инактивации. В свою очередь, ингибирующее влияние бактерий на кинетику деструкции безафибрата было более выраженным, в два раза снижая скорость его разложения. Тем не менее, в пероксидной системе {УФ/Н₂O₂} с использованием KrCl-эксилламп достигнута полная деструкция безафибрата с обеспечением инактивации 100% бактерий, что делает KrCl-эксилламп перспективным источником УФ излучения. Данный комбинированный окислительный процесс может быть рекомендован для эффективной симультанной очистки и обеззараживания воды с низкой мутностью, например, для финишной обработки питьевой воды.*

Ключевые слова: УФ эксилламп, очистка и обеззараживание воды, деструкция, инактивация, безафибрат, бактерии, пероксид водорода

**EFFICIENCY OF ULTRAVIOLET EXCILAMPS FOR SIMULTANEOUS TREATMENT
AND DISINFECTION OF WATER****I.M. Tsenter, K.D. Alexeev, S.A. Popova, N.M. Garkusheva, G.G. Matafonova, V.B. Batoev**

Irina M. Tsenter (ORCID 0000-0001-9317-3880)*, Kuprian D. Alexeev (ORCID 0009-0001-6464-0600), Svetlana A. Popova (ORCID 0000-0002-2245-2898), Natalia M. Garkusheva (ORCID 0000-0002-6404-3021), Galina G. Matafonova (ORCID 0000-0001-7383-9788), Valeriy B. Batoev (ORCID 0000-0002-9548-2975)

Laboratory of Engineering Ecology, Baikal Institute of Nature Management of the SB RAS, Sakhyanovoy st., 6, Ulan-Ude, 670047, Russia

E-mail: tsenter@binm.ru*

The work is focused on the comparative investigation of the efficiency of KrCl- (222 nm) and XeBr-excilamps (282 nm) for simultaneous treatment and disinfection of model aqueous solutions in the absence and presence of environmentally-friendly oxidant hydrogen peroxide. It was shown that KrCl excilamp was more efficient for direct photolysis as well as for oxidation in the peroxide system {UV/H₂O₂} using pharmaceutical pollutant bezafibrate (20 μM), a hypolipidemic drug, and indicator bacteria Escherichia coli and Enterococcus faecalis (10⁵ CFU/mL). It was found that the destruction rates of bezafibrate were substantially lower than the inactivation rates, and the irradiation time, which was required for complete water disinfection, was by one order of magnitude lower than that needed for destruction. Addition of bezafibrate resulted in inhibition of E. faecalis inactivation in all cases, whereas E. coli inactivation in the presence of bezafibrate was inhibited only by direct photolysis at 222 nm. This led to non-significant increase in irradiation time for 5-log reduction, i.e. total inactivation. In turn, the inhibition effect of bacteria on the kinetics of bezafibrate destruction was more pronounced by 2-fold decreasing the decomposition rate. However, complete destruction of bezafibrate and 100% inactivation of bacteria were achieved in the peroxide system {UV/H₂O₂} using KrCl-excilamp, that make it a perspective source of UV radiation. This advanced oxidation process can be recommended for effective simultaneous treatment and disinfection of low-turbid water, e.g. for final drinking water treatment.

Key words: UV excilamps, water treatment and disinfection, destruction, inactivation, bezafibrate, bacteria, hydrogen peroxide

Для цитирования:

Центер И.М., Алексеев К.Д., Попова С.А., Гаркушева Н.М., Матафонова Г.Г., Батоев В.Б. Эффективность ультрафиолетовых эксиламп для симультанной очистки и обеззараживания воды. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 9. С. 116–122. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6820.

For citation:

Tsenter I.M., Alexeev K.D., Popova S.A., Garkusheva N.M., Matafonova G.G., Batoev V.B. Efficiency of ultraviolet excilamps for simultaneous treatment and disinfection of water. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 9. P. 116–122. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6820.

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение акваэкосистем синтетическими лекарственными веществами (фармполлутантами) и патогенными микроорганизмами остается актуальной экологической проблемой. Основными источниками их поступления являются недостаточно очищенные хозяйственно-бытовые и производственные сточные воды. Многие органические фармполлутанты устойчивы к разложению при биологической очистке и далее транзитом поступают в природные воды. Кроме того, фармполлутанты могут поступать в составе воды, дренировавшей через почву, загрязненную медицинскими или твердыми бытовыми отходами. Несмотря на относительно низкие концентрации в природной воде (как правило, от десятков до сотен нг/л) [1], при постоянном поступлении органические фармполлутанты токсичны для гидробионтов, а также человека, т.к. могут оказаться в питьевой воде. К недостатку качественной питьевой воды также приводит загрязнение природных вод патогенной микрофлорой. Поэтому возникает актуальная задача симультанной (одновременной) очистки и

обеззараживания воды, позволяющей за один этап удалять химические и биологические загрязнители и снижать общие энергозатраты.

Известно, что для эффективного обеззараживания воды используются УФ технологии на основе традиционных ртутных ламп низкого и среднего давления. В то же время, УФ-индуцированные окислительные процессы с использованием окислителей или катализаторов также эффективны для очистки природных и сточных вод от органических фармполлутантов [2-4]. Поэтому эти процессы применимы для очистки воды, одновременно содержащей органические поллутанты (включая фармполлутанты) и патогенные микроорганизмы. С этой целью ранее использовано вакуумное УФ (185 нм) и УФ-С (254 нм) излучение ртутной лампы в комбинации с фотокатализатором диоксидом титана [5], окислителями озонем [6] и перкарбонатом [7]. Поскольку системы на основе вакуумного УФ излучения крайне дороги (дорогостоящее оборудование, а также высокие энергозатраты) и малоприменимы для масштабного практического применения из-за сильного поглощения вакуумного УФ излучения водой, интерес представляют

другие короткие длины волн в спектральных диапазонах УФ-С и УФ-В. С этой точки зрения современные безртутные источники узкополосного УФ излучения (эксилампы, светодиоды) являются альтернативой экологически небезопасным ртутным лампам и дают возможность выбирать разные длины волн для селективного воздействия на органические поллютанты и патогенные микроорганизмы. Так, в результате облучения УФ-С светодиодами (278 нм) в присутствии персульфата и нитрилоацетата железа достигнута одновременная деструкция больше 80% инсектицида имидаклоприда и инактивация кишечной палочки *E. coli* [8]. Ранее нами показана эффективная деструкция гербицида атразина в присутствии бактерий в железо-персульфатной системе, активированной УФ-А светодиодами [9]. Другие длины волн в УФ-С и УФ-В диапазоне для симультанной очистки и обеззараживания воды ранее не использовались. В связи с этим, целью данной работы явилось сравнительное исследование эффективности KrCl- (222 нм) и XeBr-эксиламп (282 нм) для совместной деструкции органического фармполлютанта и инактивации бактерий в водных растворах прямым фотолизом (УФ) и в присутствии окислителя пероксида водорода (УФ/ H_2O_2). В работе также рассматривается взаимное влияние фармполлютанта и бактериальных клеток на скорость процессов деструкции и инактивации, и в конечном итоге, на эффективность симультанной очистки и обеззараживания воды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводили на модельных водных растворах безафибрата (Sigma-Aldrich, США, чистота $\geq 98\%$) с исходной концентрацией 20 мкмоль/л (рН = 6,3). Безафибрат (2-(4-{2-[(4-хлорбензоил)амино]этил}фенокси)-2-метилпропановая кислота) – лекарственный препарат для лечения гиперлипидемии, который токсичен для водной биоты [10-12]. В качестве экологически чистого окислителя взят пероксид водорода (33%, ООО «Лега», Россия). Для приготовления растворов использовалась деионизированная вода качества Milli-Q (18,2 мСм/см, Simplicity®UV system, Millipore, Франция).

Модельными микроорганизмами служили бактериальные штаммы кишечной палочки *Escherichia coli* K-12 и фекального энтерококка *Enterococcus faecalis* В 4053 из Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов (ФГУП ГосНИИГенетика, г. Москва). Односуточные куль-

туры *E. coli* и *E. faecalis* получены аэробным культивированием лиофилизированных клеток в ГРМ-бульоне (ГНЦ ПМБ, г. Оболенск) и триптиказо-соевом бульоне (Merck, Германия), соответственно. В свою очередь, очищенные клеточные суспензии с исходным количеством клеток 10^8 колониеобразующих единиц (КОЕ) в 1 мл получены после осаждения односуточной биомассы центрифугированием (4000 об/мин, C2006, Centurion Scientific, Великобритания) и двукратной отмывки клеток от питательной среды в фосфатном буфере (рН = 7,3-7,5) с последующим ресуспендированием. Аликвоту данной суспензии далее вносили в обеззараживаемую воду для получения 10^5 КОЕ/мл.

Эксперименты проведены в периодическом фотореакторе, представляющем собой стеклянную ванну с очищаемым водным раствором, над которой зафиксированы KrCl и XeBr-эксилампы на расстоянии 0,6 м до поверхности воды (рис. 1). Интенсивность падающего излучения при 222 и 282 нм, измеренная методом ферриоксалатной актинометрии, составила 0,017 и 0,009 мВт/см², соответственно.

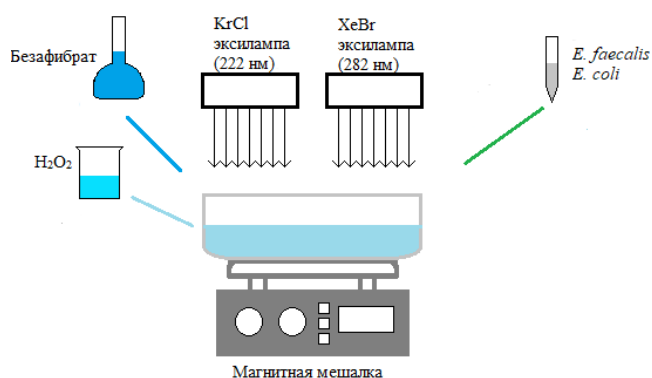


Рис. 1. Схема фотореактора на основе УФ эксиламп
Fig. 1. A scheme of photoreactor based on UV excilamps

Водные растворы безафибрата облучали отдельно KrCl- (222 нм) и XeBr-эксилампой (282 нм) совместно с бактериями без (прямой фотолиз) и в присутствии 40 мг/л H_2O_2 при перемешивании на магнитной мешалке. Кинетику деструкции безафибрата исследовали методом ВЭЖХ, кинетику инактивации – чашечным методом Коха. Из облучаемого раствора периодически отбирались пробы для определения остаточной концентрации безафибрата и количества выживших клеток. Безафибрат определяли на хроматографе Agilent 1260 Infinity (Agilent Technologies, США) элюированием смесью ацетонитрила и уксусной кислоты (60:40) со скоростью 0,5 мл/мин и детектированием при 228 нм.

Кинетические кривые деструкции безафибрата представлены в виде зависимостей степени деструкции, т.е. соотношения остаточной (C) и исходной (C_0) концентрации, от продолжительности облучения (t). В свою очередь, количество выживших клеток определяли в КОЕ/мл подсчетом колоний, выросших после посева и инкубирования проб на плотных агаризованных средах при 37 °C в течение 24 ч. Степень инактивации выражали в виде числа порядков, на которое снизилось исходное количество клеток, т.е. в виде десятичного логарифма соотношения числа выживших (N) и исходных клеток (N_0). Кинетические кривые инактивации представлены графически в виде зависимостей степени инактивации $Lg(N/N_0)$ от продолжительности облучения (t). Для оценки взаимного влияния фармполлутанта и бактерий также проведены эксперименты по деструкции безафибрата в отсутствие бактерий и инактивации бактерий в отсутствие безафибрата.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

УФ и УФ/ H_2O_2 деструкция безафибрата без и в присутствии бактерий

На первом этапе проведены эксперименты по деструкции безафибрата в отсутствие бактерий. Полученные кинетические кривые показали, что безафибрат устойчив к прямому фотолизу при 282 нм, тогда как в результате облучения при 222 нм в течение 20 мин разложилось около 30% фармполлутанта (рис. 2).

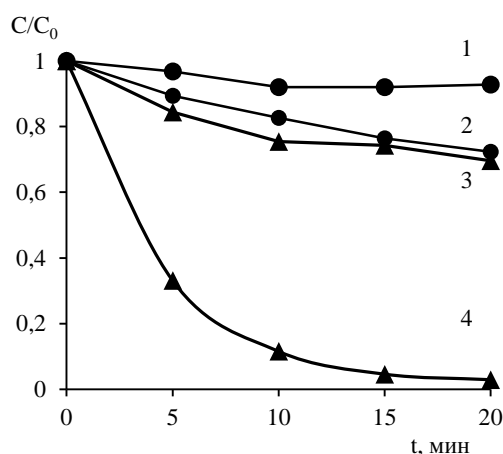
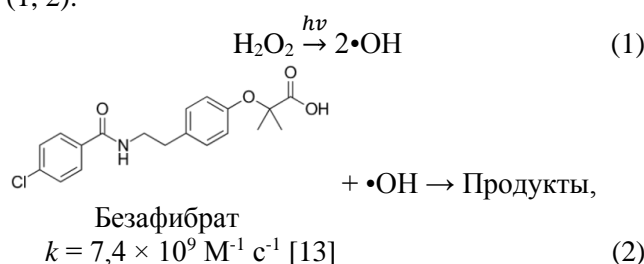


Рис. 2. Кинетика деструкции безафибрата в отсутствие бактерий УФ излучением эксциламп без и с участием пероксида водорода. [Безафибрат]₀ = 20 мкмоль/л, [H₂O₂]₀ = 40 мг/л.

Fig. 2. Kinetics of bezafibrate destruction in the absence of bacteria using UV radiation of excilamps with and without hydrogen peroxide. [Bezafibrate]₀ = 20 μM, [H₂O₂]₀ = 40 mg/L. 1 – 282 nm, 2 – 222 nm, 3 – 282 nm+H₂O₂, 4 – 222 nm+H₂O₂

Это связано с более высоким квантовым выходом фотолиза при 222 нм в силу высокого поглощения безафибрата при этой длине волны ($\epsilon = 19100 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$). Внесение окислителя H₂O₂ значительно увеличило скорость деструкции и обеспечило полное разложение безафибрата при облучении KtCl-эксцилампой (рис. 2). Найденная константа скорости деструкции псевдо-первого порядка на порядок превышала константу скорости прямого фотолиза при 222 нм (табл. 1). Это обусловлено более высоким поглощением H₂O₂ в коротковолновой области спектра и, следовательно, повышенным выходом гидроксильных радикалов ($\bullet\text{OH}$), быстро окисляющих молекулы безафибрата (1, 2):



Поскольку безафибрат устойчив к прямому фотолизу при 282 нм, эксперименты по его фотолизу в присутствии бактерий при этой длине волны не проводились. Кинетика фотолиза безафибрата при 222 нм совместно с клетками *E. coli* и *E. faecalis* показала незначительное ингибирование деструкции; эффективность разложения при этом ниже и составила 30% (рис. 3).

Ингибирование деструкции безафибрата в присутствии бактерий также выявлено в пероксидной системе {УФ/H₂O₂} с использованием KtCl-эксцилампой (222 нм) (рис. 3). Сравнительный анализ констант скорости показал, что внесение бактерий привело к снижению скорости деструкции в ~2 раза (системы {222 нм+H₂O₂} и {222 нм + H₂O₂ + *E. coli*/*E. faecalis*}) (табл. 1).

Вместе с тем, значительного ингибирующего влияния бактерий на скорость деструкции с использованием XeBr-эксцилампой (282 нм) не наблюдалось и соответствующие константы были сравнимыми (системы {282 нм + H₂O₂} и {282 нм + H₂O₂ + *E. coli*/*E. faecalis*}). Следует отметить, что различия в кинетике деструкции в зависимости от вида бактерий (*E. coli*, *E. faecalis*) не выявлены. Таким образом, одновременное присутствие бактерий вызвало ингибирование деструкции фармполлутанта, что также наблюдалось нами ранее при совместной деструкции и инактивации с использованием фото-Фентон-подобных процессов [9, 14, 15]. В

частности, при облучении УФ-А светодиодами в железо-персульфатной системе было выявлено снижение скорости деструкции на один порядок [15], тогда как в пероксидной системе {УФ/ H_2O_2 } использованием КгСл-эксилампы степень ингибирования значительно ниже (в ~ 2 раза). О снижении скорости деструкции 10 мкмоль/л (2,4 мг/л) карбамазепина в присутствии *E. faecalis* также сообщалось при обработке водного раствора в Фентон-подобной системе { Fe^0 /персульфат} [16]. В целом, ингибирование деструкции органических поллютантов при концентрации на уровне мг/л в присутствии достаточно высокого количества микробных клеток объясняется, главным образом, снижением эффективной дозы излучения (в силу поглощения и рассеяния света на клетках) и также конкуренцией между микробными клетками и молекулами органического вещества за фотоны и/или генерирующиеся радикалы. Несмотря на ингибирующий эффект бактерий, полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности пероксидной системы с использованием КгСл-эксилампы (222 нм).

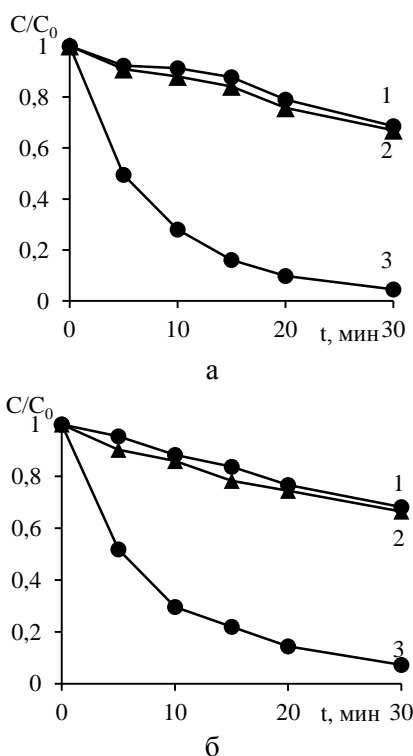


Рис. 3. Кинетика деструкции безафибрата в присутствии *E. coli* (а) и *E. faecalis* (б) УФ излучением эксилампы без и с участием пероксида водорода. [Безафибрат] $_0$ = 20 мкмоль/л, [H_2O_2] $_0$ = 40 мг/л, [бактерии] $_0$ = 10^5 КОЕ/мл. 1 – 222 нм+бактерии, 2 – 282 нм+ H_2O_2 +бактерии, 3 – 222 нм+ H_2O_2 +бактерии

Fig. 3. Kinetics of bezafibrate destruction in the presence of *E. coli* (a) and *E. faecalis* (б) using UV radiation of excilamps with and without hydrogen peroxide. [Bezafibrate] $_0$ = 20 μ M, [H_2O_2] $_0$ = 40 mg/L, [bacteria] $_0$ = 10^5 CFU/mL. 1 – 222 nm+bacteria, 2 – 282 nm+ H_2O_2 +bacteria, 3 – 222 nm+ H_2O_2 +bacteria

Таблица

Константы скорости деструкции псевдо-первого порядка (k) и периоды полураспада ($t_{1/2}$) безафибрата УФ излучением эксилампы без и в присутствии H_2O_2 и бактерий

Table. Pseudo-first-order rate constants (k) and half-live times ($t_{1/2}$) of bezafibrate destruction using UV radiation of excilamps with and without H_2O_2 and bacteria

УФ-система	k , мин $^{-1}$	R^2	$t_{1/2}$, мин
222 нм	0,017	0,99	41,8
282 нм	н.о.	н.о.	н.о.
222 нм + H_2O_2	0,19	0,97	3,6
282 нм + H_2O_2	0,015	0,95	46,2
222 нм + <i>E. coli</i>	0,012	0,96	59,2
282 нм + <i>E. coli</i>	н.о.	н.о.	н.о.
222 нм + <i>E. faecalis</i>	0,013	0,99	54,6
282 нм + <i>E. faecalis</i>	н.о.	н.о.	н.о.
222 нм + H_2O_2 + <i>E. coli</i>	0,111	0,98	6,2
282 нм + H_2O_2 + <i>E. coli</i>	0,013	0,98	52,1
222 нм + H_2O_2 + <i>E. faecalis</i>	0,094	0,96	7,3
282 нм + H_2O_2 + <i>E. faecalis</i>	0,014	0,98	47,8

н.о. – не определено

УФ и УФ/ H_2O_2 инактивация бактерий без и в присутствии безафибрата

Полученные кинетические кривые инактивации *E. coli* и *E. faecalis* также показали более высокую эффективность КгСл-эксилампы (рис. 4). При этом скорость инактивации кишечной палочки выше, чем энтерококков, и снижение числа клеток на 5 порядков (начальное 10^5 КОЕ/мл), т.е. инактивация 100% клеток, достигается за меньшую продолжительность облучения. Это обусловлено меньшей устойчивостью грамтрицательной бактерии *E. coli* к УФ воздействию по сравнению с грамположительной бактерией *E. faecalis*, клеточная стенка которой покрыта толстым слоем пептидогликана. В присутствии безафибрата инактивация при 222 нм незначительно подавляется для обоих видов (рис. 4). Однако ингибирующего влияния фармполлютанта для инактивации *E. coli* при 282 нм не выявлено.

В присутствии H_2O_2 скорости инактивации бактерий закономерно увеличились, сокращая продолжительность облучения для достижения полной инактивации, т.е. снижения числа клеток на 5 порядков (рис. 4). При этом ингибирующий эффект безафибрата наблюдался только для более резистентной бактерии *E. faecalis*. Для *E. coli*, более чувствительной к УФ и окислительному воздействию бактерии, внесение безафибрата не оказало влияния на эффективность обеззараживания. Ингибирующий эффект атразина также был выражен сильнее для инактивации *E. faecalis* в фотоактивированной железо-персульфатной системе [15].

В целом, те или иные эффекты (ингибирующий, ускоряющий эффект или его отсутствие), возникающие в процессе симультанной деструкции и инактивации, зависят, главным образом, от природы поллютантов, их исходной концентрации и состава водной матрицы. Например, увеличение скорости инактивации может быть вызвано токсичностью образующихся продуктов деструкции поллютанта. Полученные результаты согласуются с данными других исследователей об ингибировании микробной инактивации в модельных водных растворах в присутствии органических поллютантов при исходных концентрациях на уровне нескольких мг/л (десятков микромоляр) [17-20]. Снижение скорости инактивации бактерий также наблюдалось при обработке смеси *E. coli* и имидаклоприда [21], а также *E. faecalis* и карбамазепина [16] с помощью других окислительных процессов. Вместе с тем, например, внесение 2 мг/л бисфенола А не оказало влияния на кинетику фотоката-

литической инактивации *E. coli* в модельном водном растворе [22]. По нашим данным, безафибрат также не вызвал измеримого эффекта при инактивации *E. coli* в пероксидной системе.

Полученные результаты показывают, что скорости деструкции безафибрата существенно ниже, чем инактивации, и для полного обеззараживания воды требуется значительно более низкая продолжительность облучения. Поэтому разложение безафибрата совместно с бактериями гарантированно обеспечивает их полную инактивацию. Более продолжительное время обработки или более высокие концентрации окислителя для деструкции, по сравнению с инактивацией, также требовались для симультанной очистки и обеззараживания модельной воды с помощью других фотоокислительных процессов [8, 21, 23]. Очевидно, что процессы симультанной деструкции органических фармполлютантов и инактивации микроорганизмов в сложных водных матрицах являются предметом будущих исследований.

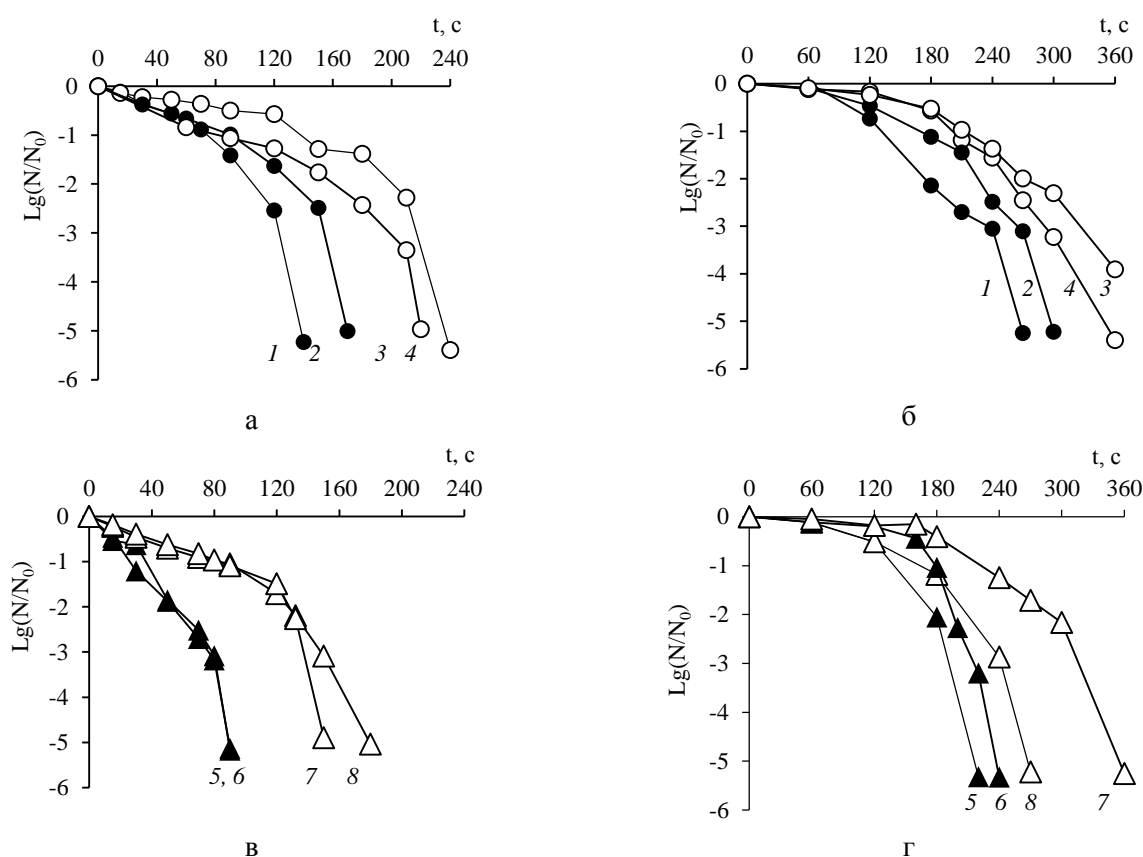


Рис. 4. Кинетика инактивации *E. coli* (а, в) и *E. faecalis* (б, г) УФ излучением эксциламп без и в присутствии безафибрата (БЗФ) и пероксида водорода. $[BZF]_0 = 20$ мкмоль/л, $[H_2O_2]_0 = 40$ мг/л, $[bacteria]_0 = 10^5$ КОЕ/мл. 1 – 222 нм, 2 – 222 нм+БЗФ, 3 – 282 нм+БЗФ, 4 – 282 нм, 5 – 222 нм+H₂O₂, 6 – 222 нм+H₂O₂+БЗФ, 7 – 282 нм+H₂O₂+БЗФ, 8 – 282 нм+H₂O₂

Fig. 4. Kinetics of inactivation of *E. coli* (a, б) and *E. faecalis* (б, г) using UV radiation of excilamps in the absence and presence of bezafibrate (BZF) and hydrogen peroxide. $[BZF]_0 = 20$ μ M, $[H_2O_2]_0 = 40$ mg/L, $[bacteria]_0 = 10^5$ CFU/mL. 1 – 222 nm, 2 – 222 nm+BZF, 3 – 282 nm+BZF, 4 – 282 nm, 5 – 222 nm+H₂O₂, 6 – 222 nm+H₂O₂+BZF, 7 – 282 nm+H₂O₂+BZF 8 – 282 nm+H₂O₂

ВЫВОДЫ

KrCl-эксиллампа (222 нм) является более эффективной, чем XeBr-эксиллампа (282 нм) для симультанной очистки и обеззараживания модельных водных растворов как прямым фотолизом, так и окислением в присутствии H₂O₂. Несмотря на взаимное ингибирование, в пероксидной системе на основе KrCl-эксиллампы достигается полная деструкция безафибрата с одновременной инактивацией присутствующих в воде клеток *E. coli* и *E. faecalis*. Полагаем, что полученные результаты могут быть применены для симультанной очистки воды с низкой мутностью от органических фармполлютантов и патогенных микроорганизмов.

Работа выполнена в рамках государственного задания БИП СО РАН (проект № 0273-2021-0006) с использованием оборудования ЦКП БИП СО РАН (г. Улан-Удэ).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The work was carried out within the framework of project No. 0273-2021-0006 using the equipment of the Center for Collective Use of BINM SB RAS (Ulan-Ude).

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. **Wilkinson J.L., Boxalla A.B.A., Kolpin D.W.** // *PNAS*. 2022. V. 119. N 8. e2113947119. DOI: 10.1073/pnas.2113947119.
2. **Guo K., Wu Z., Fang J.** UV-based advanced oxidation process for the treatment of pharmaceuticals and personal care products. Chapter 10. In: *Contaminants of emerging concern in water and wastewater*. Eds: A.J. Hernández-Maldonado, L. Blaney. Butterworth-Heinemann. 2020. P. 367-408. DOI: 10.1016/B978-0-12-813561-7.00010-9.
3. **Samzadeh A., Dehghani M., Ali Baghapour M., Azhdarpoor A., Derakhshan Z., Cvetnić M., Bolanča T., Giannakis S., Cao Y.** // *Environ. Res.* 2022. V. 212. 113385. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113385.
4. **Meijide J., Lama G., Pazos M. Sanromán M.A., Dunlop P.S.M.** // *J. Environ. Chem. Eng.* 2022. V. 10. N 3. 107630. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107630.
5. **Choi S.W., Shahbaz H.M., Kim J.U., Kim D.-H., Yoon S., Jeong S.H., Park J., Lee D.-U.** // *Appl. Sci.* 2020. V. 10. N 13. 4493. DOI: 10.3390/app10134493.
6. **Kiyanmehr K., Moussavi G., Mohammadi S. Naddafi K., Giannakis S.** // *Chemosphere*. 2022. V. 304. 135307. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135307.
7. **Mohammadi S., Moussavi G., Kiyanmehr K., Giannakis S.** // *Chem. Eng. J.* 2022. V. 431. N 2. 134064. DOI: 10.1016/j.cej.2021.134064.
8. **Miralles-Cuevas S., de la Obra I., Gualda-Alonso E. Soriano-Molina P., Casas López J. L., Sánchez Pérez J.A.** // *Water*. 2021. V. 13. 1507. DOI:10.3390/w13111507.
9. **Попова С.А., Центр И.М., Гаркушева Н.М., Матафонова Г.Г., Батоев В.Б.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 2. С. 134-143.
Popova S.A., Tsenter I.M., Garkusheva N.M., Matafonova G.G., Batoev V.B. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 2. P. 134-143. DOI: 10.6060/ivkkt.20226502.6457.
10. **Velasco-Santamaria Y.M., Korsgaard B., Madsen S.S., Bjerregaard P.** // *Aquat. Toxicol.* 2011. V. 105. N 1-2. P. 107-118. DOI: 10.1016/j.aquatox.2011.05.018.
11. **Duarte B., Prata D., Matos A.R. Cabrita M.T., Caçador I., Marques J.C., Cabral H.N., Reis-Santos P., Fonseca V.F.** // *Sci. Tot. Environ.* 2019. V. 650. N 2. P. 2085-2094. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.354.
12. **Zhang K., Zhao Y., Fent K.** // *Sci. Tot. Environ.* 2020. V. 729. 138770. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138770.
13. **Huber M.M., Canonica S., Park G.-Y., von Gunten U.** // *Environ. Sci. Technol.* 2003. V. 37. P. 1016-1024. DOI: 10.1021/es025896h.
14. **Garkusheva N., Matafonova G., Tsenter I., Beck S., Batoev V., Linden K.** // *J. Environ. Sci. Health A*. 2017. V. 52. P. 849-855. DOI: 10.1080/10934529.2017.1312188.
15. **Popova S., Tsenter I., Garkusheva N., Beck S.E., Matafonova G., Batoev V.** // *J. Environ. Chem. Eng.* 2021. V. 9. 105249. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105249.
16. **Liu K., Bai L., Shi Y. Wei Z., Spinney R., Göktaş R.K., Dionysiou D.D., Xiao R.** // *Environ. Poll.* 2020. V. 263. 114558. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114558.
17. **Moncayo-Lasso A., Mora-Arismendi L.E., Rengifo-Herrera J.A.** // *Photochem. Photobiol. Sci.* 2012. V. 11. P. 821-827. DOI: 10.1039/c2pp05290c.
18. **Subramanian G., Parakh P., Prakash H.** // *Photochem. Photobiol. Sci.* 2013. V. 12. P. 456-466. DOI: 10.1039/c2pp25316j.
19. **Ortega-Gómez E., Ballesteros Martín M.M., Esteban García B., Sánchez Pérez J.A., Fernández Ibáñez P.** // *Appl. Catal. B*. 2014. V. 148-149. P. 484-489. DOI: 10.1016/j.apcatb.2013.09.051.
20. **Khadgi N., Upreti A.R., Li Y.** // *RSC Adv.* 2017. V. 7. P. 27007-27016. DOI: 10.1039/C7RA01782K.
21. **Akbari S., Moussavi G., Decker J. Marin M.L., Bosca F., Giannakis S.** // *Appl. Catal. B*. 2022. V. 317. 121732. DOI: 10.1016/j.apcatb.2022.121732.
22. **He J., Zeng X., Lan S., Lo I.M.C.** // *Chemosphere*. 2019. V. 217. P. 869-878. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.11.072.
23. **Berruti I., Oller I., Polo-López M.I.** // *Chemosphere*. 2021. V. 279. 130555. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130555.

Поступила в редакцию (Received) 15.02.2023

Принята к опубликованию (Accepted) 10.04.2023