

Применение ультразвука и ультрафиолетового излучения в гибридных методах обеззараживания воды

* Г. Г. Матафонова, В. Б. Батоев

*Байкальский институт природопользования СО РАН,
г. Улан-Удэ, 670047, Россия, *e-mail: ngal@binm.ru*

Поступила 11.02.2019

После доработки 15.02.2019

Принята к публикации 15.02.2019

Рассматриваются гибридные фотохимические методы обеззараживания воды ультразвуком совместно с ультрафиолетовым излучением (УЗ/УФ) при последовательном и одновременном воздействии, а также с участием окислителей и катализаторов. Анализ литературы показал, что процессы инактивации патогенных микроорганизмов в водных средах высокочастотным УЗ (>100 кГц) изучены недостаточно, а в гибридных методах УЗ/УФ использовались только низкочастотный УЗ (<100 кГц) и ртутные лампы низкого давления (254 нм). При облучении высокочастотным УЗ генерируется больше активных форм кислорода (прежде всего гидроксильных радикалов), а при дополнительном облучении УФ светом возникает синергический эффект. Поэтому для интенсификации процессов обеззараживания и повышения их эффективности перспективно применение высокочастотного УЗ и безртутных УФ источников в гибридных окислительных системах, в том числе на основе фентоноподобных процессов.

Ключевые слова: ультразвук, ультрафиолетовое излучение, микроорганизмы, инаktivация, обеззараживание воды.

УДК 628.316.6

DOI: 10.5281/zenodo.3369702

ВВЕДЕНИЕ

Биогенное загрязнение водных экосистем остается глобальной экологической проблемой и представляет собой угрозу здоровью населения. По оценке ВОЗ, на март 2018 г. по меньшей мере 2 млрд человек употребляли воду, загрязненную фекалиями, а острые кишечные инфекции ежегодно приводят к 502 тыс. смертей [1]. Источниками поступления патогенной микрофлоры являются, как правило, недостаточно очищенные хозяйственно-бытовые и промышленные сточные воды. Загрязнение такими стоками природных поверхностных и грунтовых вод приводит к дефициту качественной питьевой воды. Для снижения уровня биогенного загрязнения водных объектов, в том числе источников питьевого водоснабжения, необходимы разработка современных экологобезопасных методов обеззараживания природных и сточных вод и внедрение технологий на их основе.

Известно, что для обеззараживания воды применяются различные методы, среди которых наиболее распространены хлорирование, озонирование, облучение ультрафиолетовым (УФ) светом и ультразвуком (УЗ). Последние два метода, фотолиз и сонолиз, являются безреагентными и наиболее перспективными с точки зрения экологобезопасности. Исторически был хорошо исследован и нашел технологическое применение **низкочастотный** диапазон УЗ с

частотами генерации ниже 100 кГц, широко используемый для различных целей, в том числе для дезинфекции. К настоящему времени в литературе накоплен большой материал по применению низкочастотного УЗ (в основном 20–45 кГц) и УФ излучения (как отдельных методов) для инактивации патогенных микроорганизмов в воде с использованием ртутных ламп низкого и среднего давления. Вместе с тем ограничением УФ метода является низкая эффективность при высоком содержании микроорганизмов или взвешенных твердых частиц в воде в силу поглощения и рассеивания излучения, снижения эффективной дозы излучения и возможной фотореактивации клеток. При УЗ воздействии, как известно, возникает явление акустической кавитации, продуцирующей коллапсирующие микропузырьки (hot spots), при схлопывании которых в воде генерируются пероксид водорода и высокорекреационные активные формы кислорода (АФК), такие как $\text{OH}\cdot$, $\text{HO}_2\cdot$ и $\text{O}\cdot$ радикалы [2–4], способные инаktivировать ферменты и повреждать клеточную мембрану, ДНК, липосомы [5, 6]. Кроме того, кавитационное воздействие приводит к механическому разрушению клетки, дезинтегрируя ее и вызывая лизис [7, 8]. Рассматривая частоту УЗ как один из ключевых факторов, влияющих на генерацию микропузырьков и АФК, максимальные уровни $\text{OH}\cdot$ радикалов ранее установ-

лены при высоких частотах 585 и 1040 кГц [2]. По данным [4], оптимальные частоты УЗ для эффективной акустической кавитации находятся в диапазоне 200–600 кГц, где образуется большое число микропузырьков и радикалов. При облучении же низкочастотным УЗ (<100 кГц) образуется меньше пузырьков, и они большего размера, что снижает выход АФК [4]. Считается, что бактерицидный эффект при этом достигается за счет физического разрушения клетки коллапсирующими кавитационными микропузырьками, тогда как при воздействии высокочастотного УЗ (>100 кГц и мегагерцового диапазона) инактивация протекает в основном за счет окислительных реакций с участием продуцируемых радикалов [8–10] (см. рисунок). Поэтому для генерации АФК, а значит, и интенсификации процессов инактивации перспективно использование высокочастотного УЗ.



Основные пути инактивации клетки ультразвуком и УФ излучением.

ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ ВОДЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ УЛЬТРАЗВУКОМ

Анализ литературы показал, что процессы инактивации микроорганизмов в воде высокочастотным УЗ практически не изучены, а публикаций в этой области немного (табл. 1). Так, на примере *E. coli* и *S. mutans* показана более высокая бактерицидная эффективность высокочастотного УЗ по сравнению с низкочастотным [11, 12]. Степень инактивации *E. aerogenes* в деионизованной воде высоко- и низкочастотным УЗ была сопоставимой [8]; однако в работе [9] этих же авторов достигнута инактивация >99% ряда бактерий и дрожжей *A. pullulans* при облучении УЗ с частотой 850 кГц. Авторы предположили сонохимический механизм инактивации с участием генерирующихся свободных радикалов и H_2O_2 . Для инактивации цианобактерий частота в 580 кГц оказалась более эффективной, чем в 1146 кГц [10]. Результаты этих исследований свидетельствуют об эффективности высокочастотного УЗ для инактивации микроорганизмов в водных средах, хотя в отдельных случаях наблюдалась преимущественно деагломерация клеток [13, 14], а для инактивации микобактерий

более эффективным был низкочастотный УЗ [15]. Таким образом, недостаточность литературных данных диктует необходимость более глубоких исследований процессов обеззараживания воды высокочастотным УЗ, в том числе с использованием гибридных методов.

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД УЗ/УФ

Для интенсификации окислительных процессов и сокращения продолжительности обработки (энергозатрат) одним из развивающихся в последнее время направлений исследований в области очистки и обеззараживания воды являются **гибридные** методы. К ним можно отнести сонофотохимический метод на базе УЗ в сочетании с УФ излучением по схемам УЗ→УФ (последовательная обработка) и УЗ+УФ (одновременная обработка). Исследования в этой области представлены в табл. 2.

Первые лабораторные исследования Т. Блуме (Германия) показали, что УЗ предобработка диспергирует крупные частицы и повышает эффективность обеззараживания воды [16]. Это подтверждено в более поздних исследованиях других групп, в которых при УЗ→УФ обработке выявлен синергический эффект [17–21]. Причем этот метод реализован и в опытно-пилотной установке для обеззараживания стоков с низкой светопрозрачностью [18]. Отмечается, что облучение УЗ также подавляет биообрастание, в том числе на УФ лампах, и снижает фотореактивацию клеток [22, 23]. Показано, что метод УЗ→УФ также эффективен и в отношении эукариотических организмов (инфузорий, нематод и ракообразных) в рециркуляционных системах для аквакультуры [24].

В России метод одновременного применения УЗ и УФ реализован в технологии «Лазурь» на основе облучения воды низкочастотным УЗ и ртутными лампами низкого давления в модульных установках [25]. Автором сделан вывод о наличии синергического эффекта, что противоречит выводу в обзоре [26]. Тем не менее синергический эффект был также установлен при обеззараживании хозяйственно-бытовых стоков методом УЗ+УФ как в лабораторном, так и в пилотном сонофотореакторах проточного типа [27, 28]. В отличие от УФ облучения одновременное воздействие УЗ и УФ было также более эффективным для инактивации морского зоопланктона в балластных водах судов [29]. Таким образом, гибридный метод в обеих модификациях (УЗ→УФ и УЗ+УФ) повышает скорость инактивации целевых микроорганизмов и энергоэффективность процесса в модельных и реальных водных растворах с обеспечением синергического эффекта (табл. 2).

Таблица 1. Литературные данные об инактивации микроорганизмов в воде высокочастотным ультразвуком

Микроорганизм, исходная концентрация	Частота УЗ, кГц	Водная матрица	Результат	Ссылка
<i>Enterobacter aerogenes</i> (10 ⁸ КОЕ/мл)	20, 850	Деионизованная вода, обезжиренное молоко	При 850 кГц в воде зафиксировано снижение численности клеток на 3 порядка за 60 мин (3,6 порядка при 20 кГц), инаktivация в молоке не наблюдалась	[8]
<i>Enterobacter aerogenes</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Aureobasidium Pullulans</i> (10 ⁸ КОЕ/мл)	850	0,9% физиологический раствор	Инаktivация >99%	[9]
<i>Microcystis Aeruginosa</i> (10 ⁶ КОЕ/мл)	20, 580 и 1146	Не указана	20 и 580 кГц эффективны для инаktivации, деагломерация клеток при 1146 кГц	[10]
<i>Escherichia coli</i> (10 ⁶ КОЕ/мл)	20, 205, 358, 618, 1017	Дистиллированная вода	Максимальная скорость инаktivации при 205 кГц (~ 4 порядка за 60 мин)	[11]
<i>Escherichia coli</i> IAM 12058, <i>Streptococcus mutans</i> JCM 5175 (10 ⁸ КОЕ/мл)	20, 500	0,9% физиологический раствор	Эффективность инаktivации при 500 кГц выше, чем при 20 кГц	[12]
<i>Bacillus subtilis</i>	20, 38, 512, 850	–	Деагломерация клеток при 512 и 850 кГц	[13]
<i>Escherichia coli</i> , <i>Klebsiella pneumonia</i> (10 ⁵ КОЕ/мл)	20, 40 и 580	Фосфатный буферный раствор	Деагломерация клеток при 580 кГц, снижение на 2–3 порядка при 20 и 40 кГц	[14]
<i>Mycobacterium</i> sp. штамм 6PY1 (2,15 × 10 ⁻³ –1,4 × 10 ⁻² мг белка/л)	20, 612	Водно-минеральная среда	Облучение при 20 кГц более эффективно (инаktivация 93%), чем при 612 кГц (инаktivация 35,5%)	[15]

Если говорить о дезинфекции других жидких сред, то различные последовательные комбинации УЗ и УФ для инаktivации спор *A. acidoterrestis* в яблочном соке не дали синергического эффекта [30]. Тем не менее одновременная обработка (УЗ+УФ) была более энергоэффективной, чем последовательная (УЗ→УФ), для обеззараживания фруктовых соков [31] и индивидуальные методы (УЗ или УФ) для инаktivации *Z. bailii* в яблочном соке [32], *E. coli* и колиформных бактерий в молоке [33].

Во всех исследованиях инаktivации микроорганизмов гибридным методом УЗ/УФ использовались **низкочастотный** УЗ с частотами генерации в несколько десятков килогерц и ртутная лампа низкого давления (254 нм) в качестве источника УФ излучения. Между тем в мире введен поэтапный отказ от использования ртути, предусмотренный Минаматской конвенцией о ртути (2013 г.), которую подписала Россия 24 сентября 2014 г. в числе 118 государств [34]. Учитывая Минаматскую конвенцию, экологичность и ряд других преимуществ, безртутные источники, например УФ эксиплексные лампы

(эксилампы) [35] и светодиоды (LED) [36, 37], рассматриваются в последние годы альтернативой для замены традиционных ртутных ламп в технологиях водоочистки и водоподготовки. Наилучшие результаты при обеззараживании воды достигнуты при использовании КгСi-эксилампы (222 нм) [38, 39].

Разработка нитридных полупроводников обеспечила производство светодиодов, излучающих в бактерицидном диапазоне 200–280 нм (УФ-С). Новое поколение УФ светодиодов является привлекательным из-за долгого срока службы и низкого энергопотребления, превосходя дейтериевые, ксеноновые и ртутные газоразрядные лампы [40]. В связи с вышеизложенным в гибридных методах, на наш взгляд, перспективным является использование **высокочастотного** УЗ в комбинации с УФ излучением, например эксилампы или светодиодов. Так, одновременное воздействие высокочастотного УЗ (582, 862 или 1142 кГц) и видимого излучения обеспечило более эффективную инаktivацию бактериофага MS2 в фосфатном физиологическом растворе [41]. Высокочастотный УЗ (1,7 МГц) в сочетании с УФ излучением эксилампы успешно применен нами ранее для

Таблица 2. Литературные данные об инаktivации микроорганизмов в воде гибридным методом УЗ/УФ

Микроорганизм, исходная концентрация	Частота УЗ, кГц	Водная матрица	Результат	Ссылка
<i>Последовательная обработка УЗ→УФ</i>				
Общие колиформные бактерии ($4,8 \times 10^5$ КОЕ/100 мл), <i>E. coli</i> ($4,6 \times 10^4$ КОЕ/100 мл) и фекальные стрептококки ($5,6 \times 10^3$ КОЕ/100 мл)	20	Хозяйственно-бытовая сточная вода после очистки	Более высокая (энерго) эффективность инаktivации при УЗ→УФ обработке	[16]
Общие колиформные бактерии	20	Та же	Повышение скорости инаktivации, уменьшение эффекта «плато» на кривых инаktivации, раздробление крупных частиц (> 60 мкм)	[17]
Общие колиформные бактерии ($2,7 \times 10^5$ КОЕ/100 мл), <i>E. coli</i> ($1,4 \times 10^4$ КОЕ/100 мл)	39	Та же	Синергический эффект при УЗ→УФ обработке	[18]
<i>E. coli</i> ($2,6 \times 10^6$ – $3,2 \times 10^7$ КОЕ/л)	20, 28, 40, 83	Та же	Синергический эффект при УЗ→УФ обработке	[19]
<i>E. coli</i> (10^5 КОЕ/мл)	20	0,9% физиологический раствор	Синергический эффект при УЗ→УФ обработке, нет синергизма при УФ→УЗ обработке	[20]
<i>E. coli</i> (5×10^8 КОЕ/мл)	40	Дистиллированная вода	Синергический эффект при УЗ→УФ обработке в присутствии Ag^+ , снижение численности клеток на 8 порядков	[21]
Общие колиформные бактерии (10^3 – 10^4 КОЕ/мл)	80	Хозяйственно-бытовая сточная вода	Инаktivация 100% клеток и отсутствие фотореактивации после УЗ→УФ обработки	[22]
<i>E. coli</i> (10^8 КОЕ/мл)	33	Деионизованная вода, водная каолиновая суспензия, хозяйственно-бытовая сточная вода после очистки	При УЗ-предобработке более высокая эффективность обеззараживания и сниженная фотореактивация клеток	[23]
<i>Одновременная обработка УЗ+УФ</i>				
<i>E. coli</i> , бактериофаг MS2, споры <i>B. subtilis</i> , цисты <i>Giardia muris</i> , полиовирусы	<100	Для представленных кривых инаktivация не указана	Синергический эффект при одновременном воздействии УЗ и УФ, эффективные дозы УФ излучения 100–150 мДж/см ²	[25]
Фекальные колиформные бактерии ($3,67 \times 10^5$ – $9,48 \times 10^7$ КОЕ/л)	28	Хозяйственно-бытовая сточная вода после очистки	В проточном сонофотореакторе УЗ+УФ обработка обеспечивает наибольшее снижение численности на 4,24 порядка с энергопотреблением 0,219 кВт·час/м ³ . Синергический эффект	[27]
Фекальные колиформные бактерии ($3,7 \times 10^5$ КОЕ/л), <i>E. coli</i> ($2,2 \times 10^5 \pm 7,8 \times 10^4$ КОЕ/л) и фекальные стрептококки ($1,0 \times 10^5 \pm 3,3 \times 10^4$ КОЕ/л)	28	Та же	Высокая эффективность инаktivации после УЗ+УФ обработки в пилотном проточном сонофотореакторе. В 87% случаев численность колиформных бактерий < 100 КОЕ/л	[28]

обеззараживания поверхностей [42]. Насколько нам известно, другие исследования инаktivации микроорганизмов с использованием высококачественного УЗ и светового излучения ранее не проводились.

ГИБРИДНЫЕ МЕТОДЫ УЗ/УФ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОКИСЛИТЕЛЕЙ И КАТАЛИЗАТОРОВ

Одно из самых интересных направлений исследований в области очистки и обеззаражи-

вания воды – это гибридные сонофотохимические процессы с использованием экологически чистых окислителей и/или катализаторов. В качестве таких окислителей применяются (пероксо)сульфосоединения – H_2O_2 , HSO_5^- , $S_2O_8^{2-}$, а в качестве катализаторов – TiO_2 , (нано)композиты на его основе и переходные металлы, чаще всего ионы железа (II) в системах Фентона (Fe^{2+}/H_2O_2) и фентоноподобных системах (например, $Fe^{2+}/S_2O_8^{2-}$). Особый интерес представляют окислительные системы с

пероксомоно- и дисульфатами, в которых, помимо $\text{OH}\cdot$, генерируются сульфатные анион-радикалы $\text{SO}_4\cdot^-$, обладающие сравнимым окислительно-восстановительным потенциалом (2,5–3,1 В) и продолжительным временем жизни (30–40 мкс) [43]. Следует отметить, что гибридные сонофотохимические процессы деструкции органических поллютантов в присутствии окислителей и/или катализаторов (прежде всего сонофотокатализ) достаточно подробно изучены [4, 44], тогда как исследования микробной инактивации в этой области практически отсутствуют.

К настоящему времени опубликована работа [45], в которой для инактивации *E. coli* (10^6 КОЕ/мл) в сточной воде использован высокочастотный УЗ (275 кГц) в комбинации с фотофентоном на основе симулированного солнечного излучения (система $\text{УЗ}/h\nu/\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$). Выявлен синергизм (синергический индекс 1,57) между УЗ и процессом Фентона ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$, без облучения), тогда как синергический эффект в системе $\text{УЗ}/h\nu/\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ ниже; однако только в последнем случае достигнуто полное обеззараживание стоков через 4 ч обработки. Показано, что УЗ предобработка повышает эффективность инактивации в системе фотофентона, компенсируя темновые реакции и подавляя реактивацию клеток [45]. Отметим, что значительный синергический эффект также наблюдался в той же гибридной системе ($\text{УЗ}/h\nu/\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) при очистке воды от органических поллютантов с использованием высокочастотного УЗ (400 кГц) в пилотных реакторах [46]. В связи с этим такие гибридные методы, в том числе на основе фотофентона и фентоноподобных процессов, могут быть высокоэффективными и в целях обеззараживания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возможности применения высокочастотного УЗ с частотами генерации выше 100 кГц для обеззараживания природных и сточных вод изучены недостаточно. Тем не менее, поскольку при облучении воды высокочастотным УЗ генерируется больше высокореакционных АФК, перспективно использовать его совместно с УФ излучением (например, УФ светодиодов). На примере низкочастотного УЗ доказано, что при гибридной УЗ/УФ обработке водных сред возникает синергический эффект и повышается эффективность обеззараживания. Для интенсификации процессов микробной инактивации и повышения их энергоэффективности большой научный и технологический интерес, по нашему мнению, представляют гибридные сонофотохи-

мические методы с использованием окислителей и катализаторов. Процессы микробной инактивации в таких окислительных системах не изучены и требуют дальнейших исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания БИП СО РАН (проект № 0339-2019-0005).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Путьевая вода. Основные факты*. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ). 16 марта 2018 г. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
2. Mark G., Tauber A., Laupert R., Schuchmann H.P. et al. *Ultrason Sonochem.* 1998, **5**, 41–52.
3. Furuta M., Yamaguchi M., Tsukamoto T., Yim B. et al. *Ultrason Sonochem.* 2004, **11**, 57–60.
4. Sathishkumar P., Mangalaraja R.V., Anandan S. *Ren Sustain Energy Rev.* 2016, **55**, 426–454.
5. Riesz P., Kondo T. *Free Radical Biol Med.* 1992, **13**, 247–270.
6. Cabiscol E., Tamarit J., Ros J. *Int Microbiol.* 2000, **3**, 3–8.
7. Jyoti K.K., Pandit A.B. *Biochem Eng J.* 2001, **7**, 201–212.
8. Gao S., Hemar Y., Lewis G.D., Ashokkumar M. *Ultrason Sonochem.* 2014, **21**, 2099–2106.
9. Gao S., Hemar Y., Ashokkumar M., Paturel S. et al. *Water Res.* 2014, **60**, 93–104.
10. Wu X., Joyce E.M., Mason T.J. *Water Res.* 2012, **46**, 2851–2858.
11. Hua I., Thompson J. *Water Res.* 2000, **15**, 3888–3893.
12. Koda S., Miyamoto M., Toma M., Matsuoka T. et al. *Ultrason Sonochem.* 2009, **16**, 655–659.
13. Joyce E., Phull S.S., Lorimer J.P., Mason T.J. *Ultrason Sonochem.* 2003, **10**, 315–318.
14. Joyce E., Al-Hashimi A., Mason T.J. *J Appl Microbiol.* 2011, **110**, 862–870.
15. Al Bsoul A., Magnin J.-P., Commenges-Bernole N., Gondrexon N. et al. *Ultrason Sonochem.* 2010, **17**, 106–110.
16. Blume T., Neis U. *Ultrason Sonochem.* 2004, **11**, 333–336.
17. Yong H.N., Farnood R.R., Cairns W., Mao T. *Water Environ Res.* 2009, **81**(7), 695–701.
18. Naddeo V., Landi M., Belgiorno V., Napoli R.M.A. *J Hazard Mater.* 2009, **168**, 925–929.
19. Jin X., Li Z., Xie L., Zhao Y., Wang T. *Ultrason Sonochem.* 2013, **20**, 1384–1389.
20. Sato C., Nicolae V.V., Ramalingam B., Shields M. et al. *J Environ Eng.* 2015, **141**(11), 04015034.
21. Gemici B.T., Karel F.B., Karaer F., Koparal A.S. *Appl Ecol Environ Res.* 2018, **16**(4), 4667–4680.

22. Paleologou A., Marakas H., Xekoukoulotakis N.P., Moysa A. et al. *Catal Today*. 2007, **129**, 136–142.
23. Zhou X., Li Z., Lan J., Yan Y. et al. *Ultrason Sonochem*. 2017, **35**, 471–477.
24. Bazyar Lakeh A.A., Kloas W., Jung R., Ariav R. et al. *Ultrason Sonochem*. 2013, **20**, 1211–1216.
25. Ульянов А.Н. *Вода: химия и экология*. 2009, (3), 11–15.
26. Василяк Л.М. *ЭОМ*. 2010, **46**(5), 106–111.
27. Zhou X., Guo H., Li Z., Zhao J. et al. *Ultrason Sonochem*. 2015, **27**, 81–86.
28. Zhou X., Yan Y., Li Z., Yin J. *Ultrason Sonochem*. 2017, **37**, 114–119.
29. Sassi J., Rytönen J., Vitasalo S., Leppäkoski E. *Experiments with ultraviolet light, ultrasound and ozone technologies for onboard ballast water treatment*. VTT Tiedotteita – Research Notes 2313. VTT: Espoo, 2005. 80 p.
30. Tremarin A., Brandão T.R.S., Silva C.L.M. *LWT – Food Sci Technol*. 2017, **78**, 138–142.
31. Char C.D., Mitilinaki E., Guerrero S.N., Alzamora S.M. *Food Bioprocess Technol*. 2010, **3**, 797–803.
32. Gomez-Diaz J.J., Santiesteban-Lopez A., Palou E. *J Food Protect*. 2011, **74**(10), 1751–1755.
33. Şengül M., Erkaya T., Başlar M., Fatih Ertugay M. *Food Control*. 2011, **22**, 1803–1806.
34. Minamata Convention on Mercury. URL: <http://www.mercuryconvention.org/Convention/tabid/3426/language/en-US/Default.aspx>
35. Matafonova G., Batoev V. *Chemosphere*. 2012, **89**, 637–647.
36. Song K., Mohseni M., Taghipour F. *Water Res*. 2016, **94**, 341–349.
37. Matafonova G., Batoev V. *Water Res*. 2018, **132**, 177–189.
38. Matafonova G.G., Batoev V.B., Astakhova S.A., Gómez M. et al. *Lett Appl Microbiol*. 2008, **47**, 508–513.
39. Popova S., Matafonova G., Batoev V. et al. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2019, **169**, 169–177.
40. Chen J., Loeb S., Kim J.-H. *Environ Sci Water Res Technol*. 2017, **3**, 188–202.
41. Chrysikopoulos C.V., Manariotis I.D., Syngouna V.I. *Colloids Surf B*. 2013, **107**, 174–179.
42. Tsenter I.M., Matafonova G.G., Batoev V.B. *Eng Life Sci*. 2015, **15**, 830–834.
43. Ghanbari F., Moradi M. *Chem Eng J*. 2017, **310**, 41–62.
44. Panda D., Manickam S. *Ultrason Sonochem*. 2017, **36**, 481–496.
45. Giannakis S., Papoutsakis S., Darakas E., Escalacañellas A. et al. *Ultrason Sonochem*. 2015, **22**, 515–526.
46. Papoutsakis S., Miralles-Cuevas S., Gondrexon N., Baup S. et al. *Ultrason Sonochem*. 2015, **22**, 527–534.

Summary

The hybrid sonophotochemical methods of water disinfection by ultrasound in conjunction with ultraviolet radiation (US/UV) under sequential and simultaneous modes and in the presence of oxidants and catalysts are reviewed. Literature survey showed that the processes of inactivation of pathogenic microorganisms in aqueous media by high-frequency US (>100 kHz) have been insufficiently studied, and only low-frequency US (<100 kHz) and low-pressure mercury lamps (254 nm) have been applied in hybrid systems such as US/UV. Higher levels of reactive oxygen species (primarily, hydroxyl radicals) are generated under treatment with high-frequency US and the additional UV irradiation provides a synergistic effect. Therefore, application of high-frequency US and mercury-free UV sources in the hybrid oxidation systems, including Fenton-like processes, have a high potential for intensifying disinfection processes and improving their (energy) efficiency.

Keywords: ultrasound, ultraviolet radiation, microorganisms, inactivation, water disinfection.