

ИСПЫТАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ СТОЧНЫХ ВОД

Н.М. Лебедев, В.А. Грачев, О.В. Плямина, О.Ю. Лебедев, Д.С. Лукичёва, В.А. Доильницын, А.А. Акатов, Л.В. Леонов

ООО "Александра-Плюс", г. Вологда,
 Научно-исследовательский институт проблем экологии,
 Центр глобальной экологии МГУ имени М.В. Ломоносова
 ООО "Новотех-ЭКО", г. Вологда, Санкт-Петербургский политехнический университет
 Петра Великого, ГУП "Водоканал Санкт-Петербурга"

Приведены результаты промышленного испытания нового способа обеззараживания сточных вод, заключающегося в сочетании ультразвукового и ультрафиолетового методов воздействия на финальной стадии очистки сточных вод с целью уничтожения патогенных микроорганизмов и предотвращения тем самым распространения инфекционных заболеваний. Новый способ разработан и запатентован авторами и прошел испытание на одном из передовых водоканалов России – ГУП "Водоканал Санкт-Петербурга". Результаты испытания показали эффективность комбинированной ультрафиолетовой и ультразвуковой обработки сточных вод.

Ключевые слова: сточные воды, ультразвуковой способ обеззараживания, ультрафиолетовый способ обеззараживания

Testing Combined Application of Ultraviolet and Ultrasonic Disinfection of Wastewater

N.M. Lebedev, V.A. Grachev, O.V. Plyamina, O.Yu. Lebedev, D.S. Lukichyova, V.A. Doilnitsyn, A.A. Akatov, L.V. Leonov

"Alexandra-Plus" LLC, 160004 Vologda, Russia,
 Scientific Research Institute of Environmental Problems, 119017 Moscow, Russia,
 Global Ecology Center M.V. Lomonosov Moscow State University, 119991 Moscow, Russia
 "Novotekh-ECO" LLC, 160000 Vologda, Russia,
 Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University 195251 St. Petersburg, Russia,
 "Vodokanal of St. Petersburg", 191015 St. Petersburg, Russia

The article presents the results of an industrial test of a new technique for wastewater disinfection that combines ultrasonic and ultraviolet methods at the final stage of water purification in order to destroy pathogenic microorganisms, and thereby prevent the spread of infectious diseases. The new method was developed and patented by the authors; it has been tested at one of the most advanced water utilities in Russia, SUE "Vodokanal of St. Petersburg". The combined ultraviolet and ultrasonic wastewater treatment proved to be effective.

Keywords: wastewater; ultrasonic disinfection; ultraviolet disinfection

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-07-26-30

Сточные воды населённых пунктов обычно содержат значительное количество патогенных микроорганизмов, в том числе возбудителей тяжелых заболеваний. Их уничтожение перед сбросом является важной финальной стадией очистки, предотвращающей распространение инфекционных болезней.

Применяют различные технологии — как хлорирования и озонирования, так и обработку стоков ультрафиолетовым излучением, в результате которой

не генерируются токсичные вещества и вместе с тем достигается более высокая эффективность обеззараживания, чем в случае внесения химических веществ (иногда облуживают ультрафиолетом комбинируют с добавкой реагентов [1]). На практике получили распространение ртутные газоразрядные лампы [2].

Следует отметить, что эффективность обеззараживания ультрафиолетом снижается при высокой цветности и мутности среды, характерной для сточных

вод. Кроме того, отмечается, что за последние 15–20 лет устойчивость патогенной микрофлоры к ультрафиолету повысилась в 4 раза [3]. Ещё одним негативным фактором, снижающим эффективность данного процесса, является отложение солей и биообрастание чехлов УФ-ламп [4]. Как следствие — требуется периодическая очистка поверхностей чехлов.

С появлением мощных ультразвуковых излучателей стала обсуждаться возможность их са-

мостоятельного применения для обработки воды с целью обеззараживания. Под действием ультразвука в жидких средах возникают специфические эффекты, а именно: высокоскоростные микропотоки > 1 км/с, мощные ударные волны > 1 ГПа, локальные области разогрева > 1000 К, свободные радикалы [5], являющиеся результатом схлопывания кавитационных пузырьков. Безусловно, эти эффекты могут способствовать уничтожению патогенной флоры. Однако экспериментально было показано, что при малом времени воздействия или низкой мощности излучателя количество микроорганизмов в ряде случаев даже увеличивается [6, 7]. Именно поэтому ультразвуковую обработку применяют только в комбинации с дозированием химических реагентов или, например, ультрафиолетовым облучением воды [2].

Применение совместной ультразвуковой и ультрафиолетовой обработки воды предложено авторами [8]. Этот метод обеззараживания наиболее перспективен, так как объединяет положительные характеристики обоих воздействий. Подтверждено, что такая комбинация приводит к синергетическому росту эффективности обеззараживания благодаря следующим эффектам ультразвукового воздействия:

1) дроблению взвешенных частиц, внутри которых могут находиться микроорганизмы [9], дроблению скоплений микроорганизмов [10] и нарушению их клеточной структуры [11, 12] и последующей доступности, вследствие чего значительно повышается чувствительность микроорганизмов к ультрафиолету (с этой точки зрения ультразвуковое воздействие должно предшествовать облучению ультрафиолетом);

2) интенсивному перемешиванию воды, обеспечивающему доставку удалённых слоёв к поверхности чехлов ламп, в результате чего весь объём подаваемой воды обрабатывается равномерно;



Рис. 1. Установка УОВ-СВ-5, смонтированная по месту проведения испытаний

Fig. 1. Installation UVD-WW-5, mounted at the place of testing

3) предотвращению биообращения поверхности чехлов ламп и отложения солей на них [3, 13], что обеспечивает сохранение первоначальной интенсивности излучения ламп на протяжении всего срока службы.

В результате совмещения ультрафиолетовой и ультразвуковой обработки не только повышается результативность обеззараживания, но и увеличивается срок службы ламп, исключаются частые перерывы в работе, направленные на очистку чехлов [13], не требуется применение кислотных растворов для очистки и травления кварцевых чехлов, что позволяет снизить расходы на обслуживание, способствовать экологической безопасности. В некоторых публикациях утверждается, что комбинированная дезинфекция сточных вод оказывается предпочтительной с экономической точки зрения [2, 3, 6, 13].

В последние годы был проведен ряд испытаний с применением указанной технологии [2, 3, 13–16], продемонстрировавших ее высокую эффективность. Более того, в России ООО "Новотех-ЭКО" (Вологда) и ЗАО "Сварог" (Москва) выпускают установки для комбинированного (ультрафиолетового и ультразвукового) обеззараживания воды. Технология с применением пьезокерамических излучателей, разработанная ООО "Новотех-ЭКО", на сегодняшний день является передовой.

Установка УОВ-СВ-5 (рис. 1), спроектированная и изготовленная ООО "Новотех-ЭКО", работает по вышеописанному принципу. Она представляет собой прекавитатор, соединённый с камерой обеззараживания, и позволяет обрабатывать сточную воду с производительностью до 5 м³/ч.

Испытания УОВ-СВ-5 были проведены на Юго-Западных очистных сооружениях (ЮЗОС) ГУП "Водоканал Санкт-Петербурга" в период с октября 2015 г. по декабрь 2016 г. Установку разместили в помещении станции ультрафиолетовой обработки ЮЗОС, на которую поступают сточные воды, прошедшие предварительную механическую и полную биологическую очистку. Согласно результатам химического анализа содержание взвешенных веществ в этой воде находилось в интервале $6,7$ – 17 мг/дм³, а химическое потребление кислорода составляло 24 – 61 мг/дм³. Следует отметить, что после обработки воды на установке эти показатели не претерпевали значимых изменений.

Воду, ещё не облученную ультрафиолетом, забирали из лотка-канала насосом, пропускали через установку и сбрасывали обратно в канал. Бактериологический анализ проб воды, отобранных на входе и на выходе с установки, проводился в ЗАО "Центр исследования и контроля воды" (Санкт-Петербург). Контролировались сле-

Таблица 1. Режимы работы установки УОВ-СВ-5 на различных этапах испытаний

Table 1. Modes of operation of the UVD-WW-5 installation at various stages of testing

Обозначение режима	Описание режима	Этап		
		I	II	III
УЗ	Включены все ультразвуковые излучатели (8 шт.) (как в прекавитаторе, так и в камере обеззараживания)	+	-	-
УЗ-к	Включены ультразвуковые излучатели только в прекавитаторе (4 шт.)	+	-	-
УЗ+УФ-1	Включены ультрафиолетовые лампы и ультразвуковые излучатели только в камере обеззараживания (4 шт.)	+	-	-
УЗ+УФ-2	Включены ультрафиолетовые лампы и все ультразвуковые излучатели (8 шт.)	+	+	+
УФ-к	Включены только ультрафиолетовые лампы, ни один из ультразвуковых излучателей не работает	+	+	+

Таблица 2. Результаты I этапа испытаний (расход сточной воды 0,5–0,7 м³/ч)

Table 2. Results of the first stage of testing (wastewater consumption 0.5–0.7 m³/h)

Показатель	Исходные значения, КОЕ/100 см³	ЛКИ или результат работы в режиме				
		УЗ	УЗ-к	УЗ+УФ-1	УЗ+УФ-2	УФ-к
Колифаги	400–1000*	0	0	Полная очистка		
ОКБ	32000–62000	0	0	1,85	2,78	2,34
<i>E. coli</i>	29000–42000	0	0,23	2,18	4,51	4,62
Энтерококки	15000–32000	0	0,32	Полная очистка		
Стафилококки	45–150	1,65	0	Полная очистка		

дующие показатели: колифаги, общие колиформные бактерии (ОКБ), *E. coli*, энтерококки, стафилококки.

Испытания состояли из трех этапов. На первом этапе (I) исследовали различные варианты обеззараживания при небольшом расходе сточной воды через установку (0,5–0,7 м³/ч), при этом чехлы ультрафиолетовых ламп в момент отбора проб были чистыми, без следов отложений соли и биообрастания. Отличием второго этапа (II) стал

повышенный расход воды (8–10 м³/ч). Наконец, третий этап (III) подразумевал изучение интенсивности биообрастания и отложения солей на чехлах УФ-ламп при длительной работе установки в условиях небольшого расхода сточной воды (0,5–0,7 м³/ч). Особенности этапов представлены в табл. 1.

Результаты испытаний на I этапе даны в табл. 2, где либо приведены значения логарифмического коэффициента инактивации (ЛКИ), либо указано,

что по данному показателю достигнута полная очистка. ЛКИ рассчитывается как десятичный логарифм соотношения концентраций живых клеток в единице объема сточной воды до и после обработки.

Очевидно, что ультразвуковая обработка сама по себе не даёт значимого обеззараживающего эффекта. Отмечены слабые признаки интенсификации ультрафиолетового обеззараживания при помощи ультразвука, причем наибольший вклад вносил прекавитатор, тогда как УЗ-излучатели в камере обеззараживания даже оказывали негативное действие. По-видимому, дробление взвешенных частиц и скоплений микроорганизмов, лишаящее их защиты от ультрафиолетового излучения, является преобладающим механизмом. Вместе с тем низкий расход сточной воды через установку predetermined высокую эффективность ультрафиолетового обеззараживания самого по себе и малый вклад ультразвуковой обработки.

Поэтому на II этапе было принято решение отказаться от исключительно ультразвуковых режимов (УЗ, УЗ-к) и режима, в котором не был задействован прекавитатор (УФ+УЗ-1), и увеличить скорость пропускания воды через установку. Результаты испытаний приведены в табл. 3 и на рис. 2.

Видно, что ультразвуковая обработка сточной воды, проходящей через установку, значи-

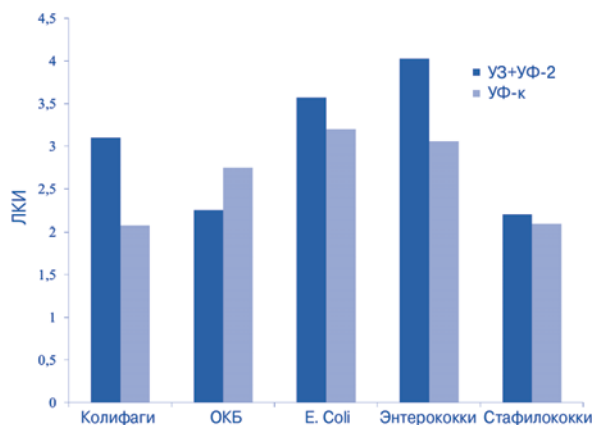


Рис. 2. ЛКИ на II этапе испытаний (расход сточной воды 8–10 м³/ч)

Fig. 2. Logarithmic inactivation coefficient at stage II of testing (wastewater flow rate of 8–10 m³/h)

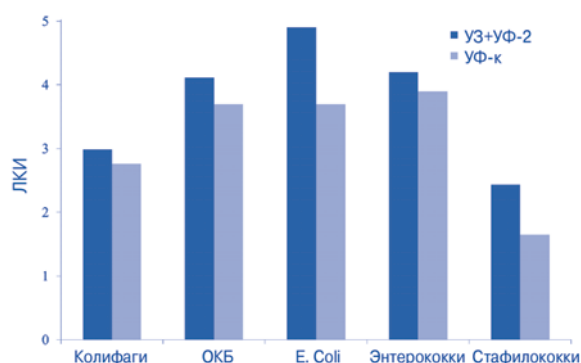


Рис. 3. ЛКИ на III этапе испытаний (расход сточной воды 0,5–0,7 м³/ч, длительная непрерывная работа в соответствующем режиме)

Fig. 3. Logarithmic inactivation coefficient at the third stage of testing (wastewater consumption 0.5–0.7 m³/h, long continuous operation in the appropriate mode)

тельно (в несколько раз, если брать абсолютные значения) усиливает обеззараживающий эффект ультрафиолетового облучения практически по всем исследованным показателям, при том что на I этапе сам ультразвук не демонстрировал дезинфицирующего действия.

На III этапе изучалась способность ультразвука препятствовать биообрастанию и отложению солей на чехлах УФ-ламп. Расход вновь был снижен до 0,5–0,7 м³/ч, но отбор проб выполнялся спустя длительное время (не менее месяца) непрерывной работы. Таким образом, проверялась стабильность работы установки. Расход был снижен для чистоты эксперимента и исключения возможности выноса отложений и частиц, загрязняющих чехол, вследствие высокой линейной скорости потока. Результаты приведены в табл. 4 и на рис. 3.

Преимущества ультразвуковой интенсификации подтвердились и на III этапе испытаний: эффективность обеззараживания по всем исследуемым микроорганизмам выросла в несколько раз, если считать по абсолютным значениям.

Кроме того, было проведено визуальное обследование поверхностей чехлов УФ-ламп после длительной работы в каждом из режимов и гравиметрическое исследование интенсивности отложений. Второй показатель измеряли следующим образом: отложения снимали с чехлов путем протирания их поверхности полиэфирно-вискозной тканью. Протирка проводилась по окончании установлен-

Таблица 3. Результаты II этапа испытаний (расход сточной воды 8–10 м³/ч)

Table 3. Results of the second stage of testing (wastewater consumption 8–10 m³/h)

Показатель	Исходные значения, КОЕ/100 см ³	ЛКИ или результат работы в режиме	
		УЗ+УФ-2	УФ-к
Колифаги	330–1200*	Полная очистка (> 3,08)	2,07
ОКБ	30000–83000	2,25	2,75
E. coli	29000–49000	3,57	3,20
Энтерококки	4700–25000	4,03	3,06
Стафилококки	140–270	Полная очистка (>2,14)	2,09

*БОЕ/100 см³.

Таблица 4. Результаты III этапа испытаний (расход сточной воды 0,5–0,7 м³/ч)

Table 4. Results of the third stage of testing (wastewater consumption 0.5–0.7 m³/h)

Показатель	Исходные значения, КОЕ/100 см ³	ЛКИ или результат работы в режиме	
		УЗ+УФ-2	УФ-к
Колифаги	580–970	Полная очистка (>2,99)	Полная очистка (>2,76)
ОКБ	110000–190000	4,11	3,70
E. coli	49000–72000	4,90	3,70
Энтерококки	22000–56000	4,20	3,90
Стафилококки	45–270	Полная очистка (>2,43)	Полная очистка (>1,65)

*БОЕ/100 см³.

ного периода работы установки в соответствующем режиме. Скорость биообрастания и отложения солей оценивали по разности масс воздушно-сухой ткани до и после протирки кварцевых чехлов УФ-ламп. Эта разность пропорциональна общей массе отложившихся за время работы установки загрязнений и продуктов биообрастания.

Суммарная масса воздушно-сухих отложений на трёх чехлах, отнесенная к 1 м³ пропущенной сточной воды, в режиме УФ+УЗ-2 (работа всех 3 УФ-ламп и 8 УЗ-излучателей) составила 45 мкг/м³, а в режиме УФ-к (работа только 3 УФ-ламп) — 300 мкг/м³. Таким образом, ультразвуковое воздействие позволило снизить интенсив-

ность биообрастания и отложения солей в 6,7 раза.

Результаты испытаний доказали эффективность комбинированной ультрафиолетовой и ультразвуковой обработки сточных вод как с точки зрения усиления обеззараживания, так и по показателю стабильности работы установки путём предотвращения отложения биологических плёнок и солей на поверхности чехлов ламп. Последний факт был положен в основу инициативного проекта усовершенствования существующей системы УФ-обеззараживания сточных вод на ЮЗОС. Внедрение на передовом предприятии отрасли позволит рекомендовать способ комбинированного обеззараживания к широкому применению.

Литература

1. Degremont — Технический справочник по обработке воды. СПб., Новый журнал, 2007. Т. 2. 920 с.
2. Соколова Н.Ф. Средства и способы обеззараживания воды (аналитический обзор). Медицинский алфавит. 2013. Т. 1. № 5. С. 44–54.
3. Ульянов А.Н. Технология "Лазурь" — новый шаг в обеззараживании воды и стоков. Вода: химия и экология. 2009. № 3. С. 11–15.
4. Севрюков И.Т., Афанасьева Е.В. Некоторые аспекты проблемы обеспечения безопасности населения в условиях чрезвычайных ситуаций с загрязнением гидросферы. Технологии гражданской безопасности. 2013. Т. 10. № 1 (35). С. 22–25.

References

1. Degremont — Tekhnicheskii spravochnik po obrabotke vody. SPb., Novyi zhurnal, 2007. T. 2. 920 s.
2. Sokolova N.F. Sredstva i sposoby obezrazhivaniya vody (analiticheskii obzor). Meditsinskii alfavit. 2013. T. 1. № 5. S. 44–54.
3. Ul'yanov A.N. Tekhnologiya "Lazur'" — novyi shag v obezrazhivanii vody i stokov. Voda: khimiya i ekologiya. 2009. № 3. S. 11–15.
4. Sevryukov I.T., Afanas'eva E.V. Nekotorye aspekty problemy obespecheniya bezopasnosti naseleniya v usloviyakh chrezvychainykh situatsii s zagryazneniem gidrosfery. Tekhnologii grazhdanskoi bezopasnosti. 2013. T. 10. № 1 (35). S. 22–25.

5. Osman H., Lim F., Lucas M., Balasubramaniam P. Development of an ultrasonic resonator for ballast water disinfection. Ed. R. Manna, D. DeAngelis. 44th Annual Symposium of the Ultrasonic Industry Association, (UIA 44th Symposium) and 45th Annual Symposium of the Ultrasonic Industry Association, (UIA 45th Symposium) (Physics Proceedings series). V. 87. P. 99–104.
6. Ахмедова О.О., Степанов С.Ф., Сошинов А.Г., Бахтияров К.Н. Повышение эффективности локальных очистных сооружений сточных вод за счёт применения комбинированных электрофизических методов воздействия. Современные проблемы науки и образования. 2009. № 5. С. 56–60.
7. Sesal N.C., Kekec O. Effects of pulsed ultrasound on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. Transactions of the Royal Society of tropical medicine and hygiene. 2014. V. 108. № 6. P. 348–353.
8. Лебедев Н.М., Лебедев О.Ю., Грачев В.А., Панкова Г.А., Рублевская О.Н., Васильев А.П., Доильнищын В.А. Устройство для обеззараживания воды в потоке. Пат. РФ 2664920 С2. Выдан 23.08.2016. Приоритет от 05.02.2016. Бюл. № 24. С. 1–8.
9. Cui X.F., Talley J.W., Liu G.J., Larson S.L. Effects of primary sludge particulate (PSP) entrapment on ultrasonic (20 kHz) disinfection of *Escherichia coli*. Water research. 2011. V. 45. № 11. P. 3300–3308.
10. Improved wastewater ultraviolet disinfection by ultrasonic pre-treatment. X. Jin, Z.F. Li, Y.L. Li, C. Xu. Proc. of 2009 Beijing International environmental technology conference (Beijing, PRC, 2009). P. 498–505.
11. Болотова Ю.В., Карелина К.А. Бактерии легионеллы в системе водоснабжения. Методы борьбы с патогенными микроорганизмами. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2015. № 3 (19). С. 43–59.
12. Effect of Wastewater Ultraviolet Disinfection of Power Ultrasonic Enhancement. S.H. Zhang, C.D. Wu. 2009 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. V. 1-11. P. 4890–4895.
13. Лебедев Н.М., Казуков О.В., Васильев А.П., Пронин Г.К. Опыт применения установок для обеззараживания питьевой воды, воды в бассейне и стоков совместным воздействием ультразвука и ультрафиолета. Матер. VIII Межрегион. геологической науч.-практ. конф. "Геология, полезные ископаемые и проблемы Башкортостана, Урала и сопредельных территорий". Уфа, 2010. С. 275–276.
14. Соснин Э.А., Липатов Е.И., Скакун В.С., Панарин В.А., Тарасенко В.Ф., Жданова О.С., Гольцова П.А. Действие ультрафиолетового излучения и ультразвуковых колебаний на сточные воды. Современные научные исследования и инновации. 2016. № 3 (59). С. 125–131.
15. Лямцов А.К., Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А., Ламонов Н.Г. Установка обеззараживания воды на животноводческих фермах методами ультразвуковой кавитации и ультрафиолетовым излучением. Инновации в сельском хозяйстве. 2015. № 3 (13). С. 90–93.
16. Torres-Palma R.A., Gibson J., Droppo I.G., Seto P., Farnood R. Surfactant-assisted sono-breakage of wastewater particles for improved UV disinfection. Water, Air and Soil Pollution. 2017. V. 228. № 3. P. 106.
5. Osman H., Lim F., Lucas M., Balasubramaniam P. Development of an ultrasonic resonator for ballast water disinfection. Ed. R. Manna, D. DeAngelis. 44th Annual Symposium of the Ultrasonic Industry Association, (UIA 44th Symposium) and 45th Annual Symposium of the Ultrasonic Industry Association, (UIA 45th Symposium) (Physics Proceedings series). V. 87. P. 99–104.
6. Akhmedova O.O., Stepanov S.F., Soshinov A.G., Bakhtiarov K.N. Povyshenie effektivnosti lokal'nykh ochestnykh sooruzhenii stochnykh vod za schet primeneniya kombinirovannykh elektrofizicheskikh metodov vozdeistviya. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2009. № 5. S. 56–60.
7. Sesal N.C., Kekec O. Effects of pulsed ultrasound on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. Transactions of the Royal Society of tropical medicine and hygiene. 2014. V. 108. № 6. P. 348–353.
8. Lebedev N.M., Lebedev O.Yu., Grachev V.A., Pankova G.A., Rublevskaya O.N., Vasil'ev A.P., Doil'nitsyn V.A. Ustroistvo dlya obezrazazhivaniya vody v potoke. Pat. RF 2664920 S2. Vydan 23.08.2016. Prioritet ot 05.02.2016. Byul. № 24. S. 1–8.
9. Cui X.F., Talley J.W., Liu G.J., Larson S.L. Effects of primary sludge particulate (PSP) entrapment on ultrasonic (20 kHz) disinfection of *Escherichia coli*. Water research. 2011. V. 45. № 11. P. 3300–3308.
10. Improved wastewater ultraviolet disinfection by ultrasonic pre-treatment. X. Jin, Z.F. Li, Y.L. Li, C. Xu. Proc. of 2009 Beijing International environmental technology conference (Beijing, PRC, 2009). P. 498–505.
11. Bolotova Yu.V., Karelina K.A. Bakterii legionelly v sisteme vodosnabzheniya. Metody bor'by s patogennymi mikroorganizmami. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika. 2015. № 3 (19). S. 43–59.
12. Effect of Wastewater Ultraviolet Disinfection of Power Ultrasonic Enhancement. S.H. Zhang, C.D. Wu. 2009 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. V. 1-11. P. 4890–4895.
13. Lebedev N.M., Kazukov O.V., Vasil'ev A.P., Pronin G.K. Opyt primeneniya ustanovok dlya obezrazazhivaniya pit'voi vody, vody v basseine i stokov sovmestnym vozdeistviem ul'trazvuka i ul'trafiioleta. Mater. VIII Mezhregion. geologicheskoi nauch.-prakt. konf. "Geologiya, poleznye iskopaemye i problemy Bashkortostana, Urala i sopredel'nykh territorii". Ufa, 2010. S. 275–276.
14. Sosnin E.A., Lipatov E.I., Skakun V.S., Panarin V.A., Tarasenko V.F., Zhdanova O.S., Goltsova P.A. Deistvie ul'trafiioletovogo izlucheniya i ul'trazvukovykh kolebaniy na stochnye vody. Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii. 2016. № 3 (59). S. 125–131.
15. Lyamtsov A.K., Kuz'michev A.V., Tikhomirov D.A., Lamonov N.G. Ustanovka obezrazazhivaniya vody na zhivotnovodcheskikh fermakh metodami ul'trazvukovoi kavitatsii i ul'trafiioletovym izlucheniem. Innovatsii v sel'skom khozyaistve. 2015. № 3 (13). S. 90–93.
16. Torres-Palma R.A., Gibson J., Droppo I.G., Seto P., Farnood R. Surfactant-assisted sono-breakage of wastewater particles for improved UV disinfection. Water, Air and Soil Pollution. 2017. V. 228. № 3. P. 106.

Н.М. Лебедев – директор, ООО "Александра-Плюс", 160004 Россия, г. Вологда, ул. Благовещенская 102, e-mail: mail@alexplus.ru ● В.А. Грачев – д-р техн. наук, гл. науч. руководитель, Научно-исследовательский институт проблем экологии, 119017 Россия, г. Москва, ул. Большая Ордынка 29, стр. 1, Центр глобальной экологии МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991 Россия, г. Москва, Ленинские горы 1, e-mail: grachev@niipe.com ● О.В. Плямина – директор, Научно-исследовательский институт проблем экологии, 119017 Россия, г. Москва, ул. Большая Ордынка 29, стр. 1, e-mail: grachev@niipe.com ● О.Ю. Лебедев – исполнительный директор, ООО "Новотех-ЭКО", 160004 Россия, г. Вологда, ул. Благовещенская 102, e-mail: eco@alexplus.ru ● Д.С. Лукичёва – сотрудник, e-mail: lds@alexplus.ru ● В.А. Доильнищын – канд. хим. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, e-mail: office@spbstu.ru ● А.А. Акатов – председатель, Санкт-Петербургское представительство Молодёжного отделения Ядерного общества России, 195251 Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, e-mail: office@spbstu.ru ● Л.В. Леонов – главный специалист, ГУП "Водоканал Санкт-Петербурга", 191015 Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кавалергардская 42, e-mail: office@vodokanal.spb.ru

N.M. Lebedev – Director, "Alexandra-Plus" LLC, 160004 Russia, Vologda, Blagoveshchenskaya Str. 102, e-mail: mail@alexplus.ru ● V.A. Grachev – Dr. Sci. (Eng.), Scientific Advisor, Scientific Research Institute of Environmental Problems, 119017 Russia, Moscow, Bolshaya Ordynka Str. 29, bld. 1, Global Ecology Center M.V. Lomonosov Moscow State University, 119991 Russia, Moscow, Leninsky Gory 1, e-mail: grachev@niipe.com ● O.V. Plyamina – Director, Scientific Research Institute of Environmental Problems, 119017 Russia, Moscow, Bolshaya Ordynka Str. 29, bld. 1, e-mail: grachev@niipe.com ● O.Yu. Lebedev – Executive Manager, "Novotekh-ECO" LLC, 160000 Russia, Vologda, Blagoveshchenskaya Str. 102, e-mail: eco@alexplus.ru ● D.S. Lukichyova – employee, e-mail: lds@alexplus.ru ● V.A. Doilnitsyn – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University 195251 Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya Str. 29, e-mail: office@spbstu.ru ● A.A. Akatov – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251 Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya Str. 29, e-mail: office@spbstu.ru ● L.V. Leonov – Chief Specialist, "Vodokanal of St. Petersburg", 191015 Russia, St. Petersburg, Kavalergradskaya Str. 42, e-mail: office@vodokanal.spb.ru