

ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Добромиров В. Н., Аврамов Д. В., Мартынов Н. В.

TECHNOLOGY OF LIQUID DISINFECTION BASED ON THE ELECTROHYDRAULIC EFFECT

Dobromirov V. N., Avramov D. V., Martynov N. V.

Аннотация

Введение: в статье рассматриваются основные проблемы водопотребления современного общества, обосновывается актуальность вопроса очистки сточных вод и вод оборотного потребления. Изложены общие принципы использования электрогидравлического эффекта в интересах обеззараживания жидкостей, а также перспективы использования этого явления для обеззараживания бактериальных сред различной специфики. **Методы:** дается описание макетной установки для обеззараживания воды, созданной на основе использования такого эффекта. Представлены методика и результаты экспериментальных исследований по обоснованию режимов работы высоковольтной электроимпульсной установки для достижения максимального успеха обеззараживания. **Результаты:** установлено, что зависимость степени обеззараживания от энергии, вложенной в жидкость, близка к линейной. При этом наибольший бактерицидный эффект обеспечивает жесткий режим работы электрогидравлической установки, которому соответствуют высокое напряжение разряда и относительно малая емкость импульсного конденсатора.

Ключевые слова: водная стратегия, водопотребление, обеззараживание жидкостей, электрогидравлический эффект, режимы функционирования оборудования, эффективность обеззараживания.

Введение

В соответствии с данными Федеральной целевой программы «Вода России» ежегодно на обеспечение нужд хозяйственного комплекса страны из природных источников изымается около 80 куб. км воды. Причем основными ее потребителями являются энергетика (37 %), сельское хозяйство (24 %), жилищно-коммунальный комплекс (18 %), добывающая и обрабатывающая промышленность (12 %), то есть ключевые области хозяйственной деятельности общества [6]. В этой связи снижение потребления водных ресурсов в стране и в мире в обозримом будущем представляется маловероятным. Поэтому реше-

Abstract

Introduction: The article reviews main problems of current water consumption, showing that the issue of wastewater treatment and water recycling is quite relevant. General principles of applying the electrohydraulic effect to disinfect liquids, as well as prospects of its use to disinfect various bacterial media are outlined. **Methods:** A model unit for water disinfection, developed on the basis of this effect, is described. A methodology and results of experimental studies to provide a rationale for operation modes of a high-voltage electric pulse installation, which allow achieving maximum disinfection, are presented. **Results:** It has been established that the dependence of the disinfection degree on energy put into the liquid is close to linear. Hard mode of installation operation, corresponding to high discharge voltage and relatively small capacity of the pulse capacitor, ensures the greatest bactericidal effect.

Keywords: water strategy, water consumption, liquid disinfection, electrohydraulic effect, equipment operation modes, disinfection efficiency.

ние проблемы рационального использования водных ресурсов уже сегодня должно обеспечиваться не только повсеместным применением водосберегающих технологий, но и за счет расширения оборотного водоиспользования. А это предполагает активную деятельность в сфере очистки и обеззараживания сточных вод.

По данным [6] в водоемы России ежегодно сбрасывается до 52 куб. км сточных вод, из которых около 37 % подлежат очистке. Существующая сегодня в стране инфраструктура очистки сточных вод обеспечивает очистку до нормативно установленного уровня не более 2 куб. км в год, т. е. около 11 % от потребности. Остальной

объем водных сбросов поступает в водоемы недостаточно очищенным (72 %) или вообще без очистки (около 17 %). В результате в водные объекты России вместе со сточными водами ежегодно поступает примерно 11 млн тонн загрязняющих веществ [6], в составе которых содержатся как механические примеси и химические загрязнения, так и микробная, в первую очередь бактериальная флора. Для придания мировым водным сбросам с подобным уровнем загрязнения естественных свойств за счет очищения в биосфере необходимо их 50...100-кратное разбавление, что уже сегодня находится на грани возможности мирового водного стока. Такая ситуация грозит превращением воды в невозобновляемый природный ресурс.

Сегодня разработаны достаточно многообразные методы очистки и обеззараживания сточных вод: механические, химические, физико-химические, бактериологические, комбинированные [2, 3, 7, 8, 10–12, 14–19]. Выбор наиболее предпочтительного из них — достаточно сложная задача, что обусловлено большим разнообразием типов примесей в воде и жесткими требованиями к качеству ее очистки [1, 4, 5, 9].

Известно, что качество очистки и обеззараживания воды указанными методами может быть улучшено путем воздействия на нее электрическими импульсами [12]. При этом в зоне электрических разрядов происходят малоизученные процессы на молекулярном и ионном уровне [17, 18, 19], что в определенной мере тормозит широкое применение электрогидравлических методов. Таким образом, исследование процессов электроимпульсного воздействия на воду в целях ее очистки и обеззараживания представляется актуальным.

Обоснование объекта, предмета, задачи и методов исследования

Объектом исследования являлась водная среда, подлежащая очистке и обеззараживанию, предметом исследования — метод обеззараживания воды, основанный на ее электроимпульсной обработке. Задача исследования — оценка эффективности обеззараживания воды в результате действия электрогидравлического эффекта. Метод исследования — экспериментальное обоснование параметров рабочего процесса обезза-

раживания воды путем воздействия высоковольтного электрического разряда.

Объект, предмет и задачи исследования обоснованы высокой актуальностью обеззараживания воды и водной среды в интересах вторичного потребления.

Обеззараживание жидкости методом электрогидравлического удара

Известно, что в жидкости, подвергающейся воздействию электрогидравлического удара, вызываемого электроимпульсами малой длительности (несколько мкс), но при высокой мгновенной мощности импульса (от 50 до 1000 МВт), происходят структурные изменения. В частности, в воде это приводит к появлению активных свободных радикалов, атомарных кислорода и водорода, соединений азота и простейших аминокислот. Осуществлению этих процессов способствует воздух и другие газы, растворенные в воде. Микробная флора воды, в первую очередь бактериальная, при этом активно гибнет, что связывают с ультразвуковым, ультрафиолетовым и рентгеновским излучением плазмы канала разряда и с мощным окисляющим действием атомарного кислорода. Обработанная таким образом жидкость приобретает бактерицидность, не снижающуюся с течением времени. Проводимое таким путем обеззараживание жидкостей происходит весьма интенсивно, а скорость процесса пропорциональна количеству и энергии импульсов, вызывающих электрогидравлические удары [13]. Также установлено, что в малых дозах и при мягких режимах воздействия электрогидравлический эффект может быть не фактором уничтожения, а фактором угнетения микроорганизмов, обеспечивающим их селекционный отбор, например, в интересах получения вакцин, бактериальных и клеточных медицинских препаратов с измененной патогенностью микробов [2].

Конструктивная схема электрогидравлического устройства для обеззараживания воды

Любые конструктивные варианты электрогидравлических установок для обеззараживания воды должны иметь емкость для жидкости со встроенными электродами. Положительные электроды изолируются, а отрицательные могут быть частью самой емкости, выполненной в виде металлической трубы. Питание каждой пары электродов производится от самостоятельного

разрядного контура. Питание всей группы контуров обеспечивается от общего для них источника питания. Главными проблемами создания подобных устройств до последнего времени были труднодоступность высоковольтного источника питания постоянного тока для импульсного применения и сложность автоматизации управления импульсами. В настоящее время с развитием мехатронного подхода к созданию различного оборудования и накопленного опыта имеется реальная возможность создавать промышленные электрогидравлические установки для очистки и обеззараживания сточных вод.

Принципиальная схема установки для обеззараживания жидкостей, как варианта — пульпы, высоковольтным электрическим разрядом представлена на рис. 1. Установка включает генератор высоковольтных импульсов, состоящий из высоковольтного источника тока (ИТ), импульсного конденсатора (ИК), в котором накапливается энергия разряда и коммутирующего устройства (КУ). Разряды происходят в рабочей емкости (РЕ) между торцом центрального электрода и внешним металлическим корпусом в рабочем зазоре (РЗ).

Установка работает следующим образом.

Рабочая емкость заполняется водой или пульпой из органических отходов. После включения установки в конденсаторе начинает накапливаться электрический заряд. По достижении заданного напряжения в импульсном конденсаторе в схеме формирования разряда с крутым фронтом срабатывает коммутирующее устройство, и им-

пульсный конденсатор разряжается на рабочий зазор в рабочей емкости.

В конструкцию установки может быть включен контур для перекачки жидкости на основе струйного насоса (СН), который позволяет ее интенсивно перемешивать. После окончания обработки содержимое рабочей емкости перекачивается тем же насосом в емкость для хранения обработанной жидкости.

Процесс можно сделать и непрерывным. В этом случае рабочая емкость представляет собой трубу с несколькими установленными последовательно по длине трубы разрядниками. Жидкость непрерывно поступает в эту трубу, последовательно обрабатывается разрядниками и на выходе из трубы также непрерывно получаем готовый продукт.

Качество обработки и ее интенсивность зависят от количества разрядников и мощности ИК. Конструктивная простота устройства позволяет создавать на основе модульного принципа установки любой производительности, которые могут использоваться как автономно, так и в качестве систем дополнительной очистки в составе установок, работающих на иных физических и химических принципах.

Методы и материалы

В соответствии с целью эксперимента авторами были проведены опыты по обоснованию рациональных режимов электрогидравлического обеззараживания жидкостей. Для этого использовалась созданная авторами экспериментальная электрогидравлическая установка с генератором

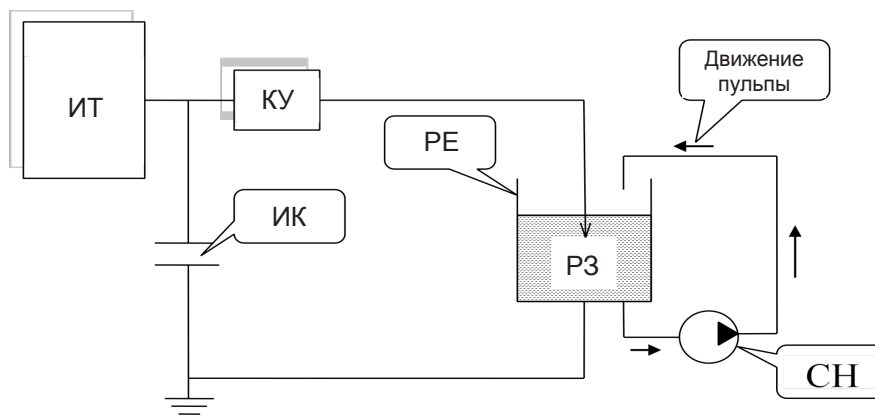


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для обработки жидких продуктов высоковольтным электрическим разрядом

импульсов тока и рабочей емкостью с разрядником. Генератор импульсов состоит из высоковольтного источника питания с возможностью подачи напряжения U от 20 до 80 кВ, батареи накопительных конденсаторов с электрической емкостью C от 0,5 до 6 мкФ и коммутирующих элементов. Он должен был обеспечить три основных режима работы электрогидравлической установки: мягкий ($U = 25$ кВ, $C = 6,0$ мкФ), средний ($U = 50$ кВ; $C = 1,5$ мкФ) и жесткий ($U = 80$ кВ; $C = 0,6$ мкФ).

В качестве жидкой бактериальной среды использовался водный дрожжевой раствор, разведенный в обеззараженной емкости в пропорции 1 грамм сухих дрожжей на 1 литр теплой воды и заправленный в обеззараженную рабочую емкость установки. Заправленная в рабочую емкость в объеме 12 литров дрожжевая смесь подвергалась обработке высоковольтными импульсами на каждом из 3-х режимов, причем количество импульсов на каждом режиме принималось 100, 200 и 300 разрядов. Расчетное значение энергии E , вкладываемой в обработку жидкости на различных режимах, определялось по известной зависимости:

$$E = \frac{CU^2}{2} N_r, \text{ кДж},$$

где C — емкость конденсатора, мкФ; U — напряжение разряда, кВ; N_r — количество разрядов.

Получаемые значения E приведены в табл. 1., из которой видно, что при сочетаниях планируемых соотношений напряжения разряда и емкости накопительного конденсатора энергия, вкладываемая в обрабатываемую жидкость, практически одинакова.

При каждом режиме обработки и для каждого количества разрядов до начала обработки и после неё из рабочего резервуара проводился отбор проб в объеме 3 мл в 20-миллилитровый

Таблица 1
Значение энергии, вкладываемой в обработку жидкости на разных режимах

Режим работы	Мягкий режим	Средний режим	Жесткий режим
Энергия одного разряда, кДж	1,875	1,875	1,92 0
Энергия 100 разрядов, кДж	187,5	187,5	192,0
Энергия 200 разрядов, кДж	375,0	375,0	384,0
Энергия 300 разрядов, кДж	562,5	562,5	576,0

стерильный шприц. В каждую пробу для интенсификации деятельности дрожжевых бактерий вводилась глюкоза в объеме 1 мл, после чего шприц герметизировался и производилась 3-часовая выдержка пробы с глюкозой. Замер количества газов, образовавшихся в каждом шприце через три часа выдержки, позволял судить об интенсивности деятельности микроорганизмов до и после соответствующей обработки.

Результаты исследования и обсуждение

Результаты экспериментов с разными режимами обработки жидкости представлены в табл. 2–4 и на графиках рис. 2–4.

Так как газ является продуктом жизнедеятельности микроорганизмов в растворе, то уменьшение его объема по отношению к объему жидкости (V_r/V_p) говорит о том, что с увеличением вложенной в раствор энергии разрядов снижается количество живых микроорганизмов, содержащихся в нем. Интенсивность этого снижения показана на графике (рис. 2).

Таблица 2
Результаты исследования мягкого режима работы электрогидравлической установки

Мягкий режим	Количество разрядов, ед.			
	0 (Эталон)	100	200	300
Объем газа в шприце (V_r), см ³	12,00	7,83	3,50	1,50
Объем раствора в шприце (V_p), см ³	4	4	4	4
Относительное значение (V_r/V_p)	3,00	1,96	0,88	0,38

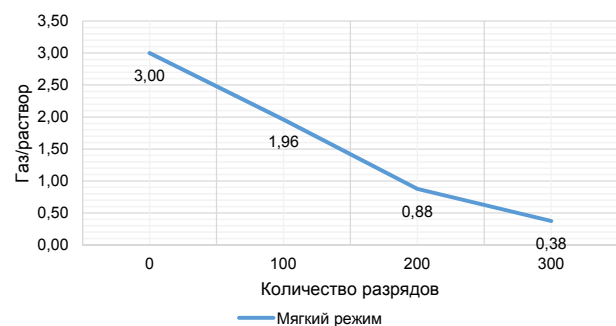


Рис. 2. Интенсивность снижения количества живых микроорганизмов в зависимости от вложенной в раствор энергии разрядов на мягком режиме

Таблица 3

Результаты исследования среднего режима работы электрогидравлической установки

Средний режим	Количество разрядов, ед			
	0 (Эталон)	100	200	300
Объем газа в шприце (V_r), см ³	12,00	6,67	4,67	3,00
Объем раствора в шприце (V_p), см ³	4	4	4	4
Относительное значение (V_r/V_p)	3,00	1,67	1,17	0,75

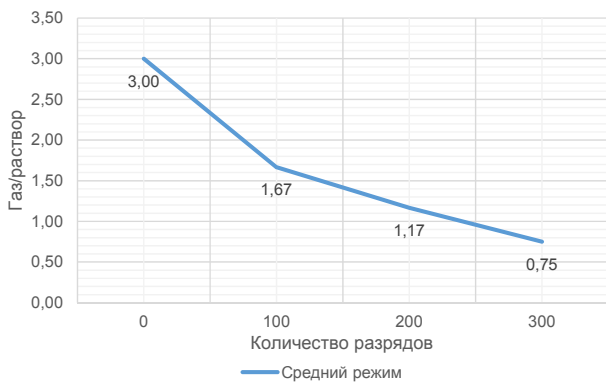


Рис. 3. Интенсивность снижения количества живых микроорганизмов в зависимости от вложенной в раствор энергии разрядов на среднем режиме

Таблица 4

Результаты исследования жесткого режима работы электрогидравлической установки

Жесткий режим	Количество разрядов, ед			
	0 (Эталон)	100	200	300
Объем газа в шприце (V_r), см ³	12,00	6,17	4,17	1,50
Объем раствора в шприце (V_p), см ³	4	4	4	4
Относительное значение (V_r/V_p)	3,00	1,54	1,04	0,38

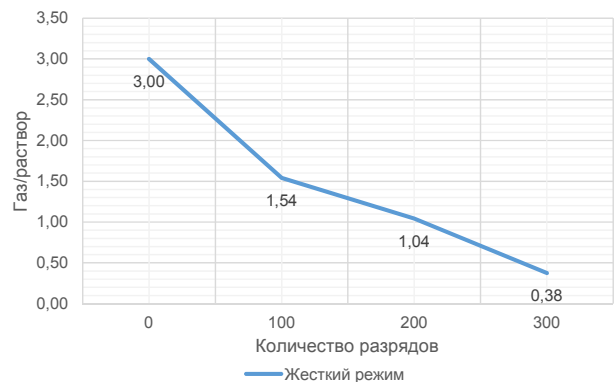


Рис. 4. Интенсивность снижения количества живых микроорганизмов в зависимости от вложенной в раствор энергии разрядов на жестком режиме

Как следует из графиков рис. 2–4, зависимость уменьшения числа живых микроорганизмов от роста вложенной энергии можно считать близкой к линейной. Линейная аппроксимация относительных значений V_r/V_p имеет вид:

для мягкого режима обработки

$$V_r/V_p = 2,89583 - 0,00896N_r;$$

для среднего режима обработки

$$V_r/V_p = 2,73333 - 0,00725N_r;$$

для жесткого режима обработки

$$V_r/V_p = 2,74583 - 0,00838N_r,$$

где N_r — количество высоковольтных разрядов.

На рис. 5 представлен сравнительный график эффективности режимов работы электрогидравлической установки по обеззараживанию жидкости, полученный по результатам линейной аппроксимации опытных данных.

Из графика рис. 5 видно, что наилучшими бактерицидными свойствами обладает мягкий и жесткий режимы. Однако при исследованиях аппаратные возможности не позволили устано-

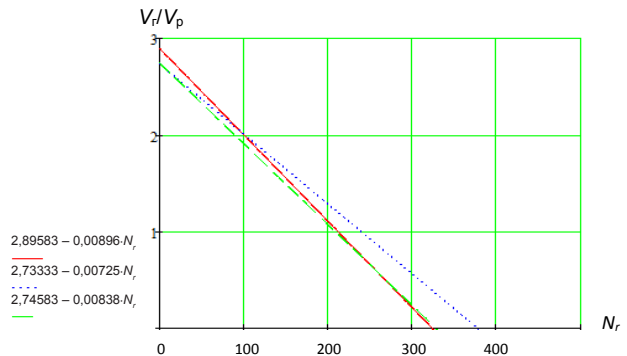


Рис. 5. Сравнительный график эффективности режимов работы электрогидравлической установки по обеззараживанию жидкости

вить напряжение разряда на жестком режиме 80 кВ и испытания производились на напряжении 60 кВ. Поэтому на жестком режиме вложенная энергия были в 1,7 раза меньше планируемых. Следовательно, логично предположить, что наиболее эффективным режимом обеззараживания является жесткий режим.

Заключение

В результате экспериментальных исследований подтверждено, что электрогидравлический эффект обладает ярко выраженным бактерицидным воздействием на жидкость. Установлено, что зависимость степени обеззараживания от энергии, вложенной в жидкость, близка к линейной. При этом наибольший бактерицидный эффект обеспечивает жесткий режим работы электрогидравлической установки, которому соответствуют высокое напряжение разряда и относительно малая емкость импульсного конденсатора. Дальнейшие исследования бактерицидных свойств электрогидравлического эффекта целесообразно проводить в направлении оптимизации параметров его воздействия на жидкость именно при жестком режиме работы установки.

Литература

1. Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды (2004). ПНД Ф 14.1:2.110–97. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений содержания взвешенных веществ и общего содержания примесей в пробах природных и очищенных сточных вод гравиметрическим методом. М.: Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды, 15 с.
2. Жмур, Н. С. (2003). Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: АКВАРОС, 512 с.
3. Министерство жилищно-коммунального хозяйства РСФСР (1989). Правила приема производственных сточных вод в системы канализации населенных пунктов. 5-е изд. М.: Ротапринт АКХ им. К. Д. Памфилова, 104 с.
4. Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации (2004). ПНД Ф 14.1:2.1–95. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации ионов аммония в природных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера. М.: Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации, 22 с.
5. Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации (2004). ПНД Ф 14.1:2.3–95. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации нитрит-ионов в природных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Грисса. Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации, 22 с.
6. Правительство Российской Федерации (2012). Постановление от 19.04.2012 № 350 (ред. 19.11.2014). О федеральной целевой программе «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах». М.: Правительство Российской Федерации, 249 с.
7. Пупырев, Е. И. (2015). Как выбрать лучшую технологию для сооружений очистки воды. В: Сборник выступлений на конференции «Качество воды как индикатор социального благополучия государства». М.: Мосводоканал, сс. 22–23.

8. Тятте, А. (2015). Круговорот воды в городе. Что влияет на качество воды и как ее очищают в Петербурге. Экология и право, № 3 (59), сс. 42–46.

9. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (2007). ПНД Ф 14.1:4.248–07. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций ортофосфатов, полифосфатов и фосфора общего в питьевых, природных и сточных водах фотометрическим методом. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 14 с.

10. Хенце, М., Армоэс, П., Ля-Кур-Янсен, Й. и Арван, Э. (2004). Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы. М.: Мир, 480 с.

11. Электронный фонд правовой и нормативной технической документации (2016). ИТС 10–2015. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов: [online] Доступно по ссылке: <http://docs.cntd.ru/document/1200128670> [Дата обращения 05.04.2019].

12. Эпов, А. Н. и Канунникова, М. А. (2015). Очистка сточных вод предприятий агропромышленного комплекса. Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения, № 1, сс. 52–59.

13. Юткин, Л. А. (1986). Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 253 с.

14. Cardinal, L. J., Stenstrom, M. K., Love, N. G. and Lu, Y.-T. (1992): Discussion of: Enhanced biodegradation of polyaromatic hydrocarbons in the activated sludge process. *Water Environment Research*, vol. 64, No. 7, pp. 922–924.

15. Figdore, B., Bowden, G., Bodniewicz, B., Bailey, W., Derminassian, R., Kharkhar, S. and Murthy, S. (2010). Impact of thermal hydrolysis solids pretreatment on sidestream treatment process selection at the DC Water Blue Plains AWTP. In: *Proceedings of the Water Environment Federation 83rd Annual Technical Exhibition & Conference*, New Orleans, LA, USA, October 2–6, 2010, pp. 5927–5949.

16. German Association for Water, Wastewater and Waste (2000). Standard ATV-DVWK-A 131E. Dimensioning of single-stage activated sludge plants. Hennef: Publishing Company of ATV-DVWK, Water, Wastewater, Waste, 57 p.

17. Mendoza-Espinosa, L. and Stephenson, T. (2009). A review of biological aerated filters (BAFs) for wastewater treatment. *Environmental Engineering Science*, vol. 16, No. 3, pp. 201–216. DOI: 10.1089/ees.1999.16.201.

18. Parker, D. and Wanner, J. (2007). Review of methods for improving nitrification through bioaugmentation. In: *Proceedings of the Water Environment Federation. WEFTEC 2007: Session 61 through Session 70*, pp. 5304–5326.

19. Stephen, T.-L. T., Ivanov, V., Wang, X.-H. and Tay, J.-H. (2006). Bioaugmentation and enhanced formation of microbial granules used in aerobic wastewater treatment. *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 70, issue 3, pp 374–381. DOI: 10.1007/s00253-005-0088-5.

References

1. State Committee of the Russian Federation for the Protection of the Environment (2004). *Environmental Regulatory Document PND F 14.1:2.110–97. Quantitative chemical analysis of water: Methodology for measuring the content of suspended*

substances and total content of impurities in samples of natural and treated waste water using the gravimetric method. Moscow: State Committee of the Russian Federation for the Protection of the Environment, 15 p.

2. Zhmur, N. S. (2003). *Technological and biochemical processes of waste water treatment on treatment plants with aerotanks*. Moscow: Akvaros, 512 p.

3. Ministry of Housing and Utilities of the RSFSR (1989). *Rules for collection of industrial wastewater in sewerage systems of populated areas*. 5th edition. Moscow: Rotaprint, Pamfilov Academy of Public Utilities, 104 p.

4. Ministry for the Protection of the Environment and Natural Resources of the Russian Federation (2004). *Environmental Regulatory Document PND F 14.1:2.1–95. Quantitative chemical analysis of water. Methodology for measuring the mass fraction of ammonium ions in natural and waste water using the photometric method with Nessler reagent*. Moscow: Ministry for the Protection of the Environment and Natural Resources of the Russian Federation, 22 p.

5. Ministry for the Protection of the Environment and Natural Resources of the Russian Federation (2004). *Environmental Regulatory Document PND F 14.1:2.3–95. Quantitative chemical analysis of water. Methodology for measuring the mass fraction of nitrite ions in natural and waste water using the photometric method with Griess reagent*. Moscow: Ministry for the Protection of the Environment and Natural Resources of the Russian Federation, 22 p.

6. Government of the Russian Federation (2012). *Decree No. 350 dd. 19.04.2012 (amended on 19.11.2014). Concerning the Federal Target Program “Development of the Water Industry in the Russian Federation in 2012–2020”*. Moscow: Government of the Russian Federation, 249 p.

7. Pupyrev, E. I. (2015). Choosing the best technology for water treatment facilities. In: *Proceedings of the Conference “Water quality as an indicator of social welfare of the state”*. Moscow: Mosvodokanal, pp. 22–23.

8. Tyatte, A. (2015). Water cycle in the city. What affects water quality and how water is treated in Saint Petersburg. *Environment and Rights*, No. 3 (59), pp. 42–46.

9. Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia (2007). *Environmental Regulatory Document PND F 14.1:4.248–07. Quantitative chemical analysis of water. Methodology for measuring the mass fraction of orthophosphates, polyphosphates and total phosphorus in drinking, natural and waste water using the photometric method*. Moscow: Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia, 14 p.

10. Henze, M., Harremoës, P., La Cour Jansen, J. and Arvin, E. (2004). *Wastewater treatment. Biological and chemical processes*. Moscow: Mir, 480 p.

11. Repository for legal documents, standards, regulations and specifications (2016). *Information and technical reference book ITS 10–2015. Wastewater treatment using centralized water disposal systems of settlements, urban districts*. [online] Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200128670> [Date accessed 05.04.2019].

12. Eпов A. N. and Kanunnikova, M. A. (2015). Wastewater treatment at agro-industrial enterprises. *Best Available Technologies (NDT) Journal*, No. 1, pp. 52–59.

13. Yutkin, L. A. (1986). *Electrohydraulic effect and its application in industry*. Leningrad: Mashinostroyeniye, Leningrad Department, 253 p.

14. Cardinal, L. J., Stenstrom, M. K., Love, N. G. and Lu, Y.-T. (1992). Discussion of: Enhanced biodegradation of polyaromatic hydrocarbons in the activated sludge process. *Water Environment Research*, vol. 64, No. 7, pp. 922–924.

15. Figdore B., Bowden G., Bodniewicz B., Bailey W., Derminassian R., Kharkhar S. and Murthy S. (2010). Impact of thermal hydrolysis solids pretreatment on sidestream treatment process selection at the DC Water Blue Plains AWTP. In: *Proceedings of the Water Environment Federation 83rd Annual Technical Exhibition & Conference*, New Orleans, LA, USA, October 2–6, 2010 pp. 5927–5949.

16. German Association for Water, Wastewater and Waste (2000). Standard ATV-DVWK-A 131E. Dimensioning of single-stage activated sludge plants. Hennef: Publishing Company of ATV-DVWK, Water, Wastewater, Waste, 57 p.

17. Mendoza-Espinosa, L. and Stephenson, T. (2009). A review of biological aerated filters (BAFs) for Wastewater Treatment. *Environmental Engineering Science*, vol. 16, No. 3, pp. 201–216. DOI: 10.1089/ees.1999.16.201.

18. Parker, D. and Wanner, J. (2007). Review of methods for improving nitrification through bioaugmentation. In: *Proceedings of the Water Environment Federation. WEFTEC 2007: Session 61 through Session 70*, pp. 5304–5326.

19. Stephen, T.-L. T., Ivanov, V., Wang, X.-H. and Tay, J.-H. (2006). Bioaugmentation and enhanced formation of microbial granules used in aerobic wastewater treatment. *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 70, issue 3, pp. 374–381. DOI: 10.1007/s00253-005-0088-5.

Авторы

Добромиров Виктор Николаевич, д-р техн. наук, профессор Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: viktor.dobromirov@mail.ru

Аврамов Дмитрий Витальевич, канд. техн. наук ООО «НПФ «ЭлектроГидроДинамика», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: dvavramov@gmail.com

Мартынов Николай Васильевич, канд. техн. наук ООО «НПФ «ЭлектроГидроДинамика», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: nik_mart51@mail.ru

Authors

Dobromirov Viktor Nikolaevich, Dr. of Engineering, Professor Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia
E-mail: viktor.dobromirov@mail.ru

Avramov Dmitri Vitalyevich, Ph. D. in Engineering “NPF “Electrohidrodinamica”, St. Petersburg, Russia
E-mail: dvavramov@gmail.com

Martynov Nikolai Vasilyevich, Ph. D. in Engineering “NPF “Electrohidrodinamica”, St. Petersburg, Russia
E-mail: nik_mart51@mail.ru