

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ЖИДКОСТИ НА РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЕЕ ОБРАБОТКИ

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

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF ELECTRO-HYDRAULIC DISINFECTION LIQUID ON DIFFERENT MODES OF PROCESSING

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

Аннотация

Введение. В связи со значительными объемами водопотребления в интересах обеспечения хозяйственной деятельности остро стоит вопрос обеззараживания воды, сбрасываемой в водоемы и подаваемой в оборотное водоснабжение после ее использования в различных технологических целях. Наряду с традиционными методами обеззараживания значительное внимание современных исследователей сосредоточено на разработке инновационных технологий этого процесса. К числу таких относится и технология воздействия на воду электрическим полем. **Методы.** В статье рассматривается процесс обеззараживания жидкости методом ее высоковольтной электроимпульсной обработки. Дается описание макетной установки для обеззараживания жидкости, созданной на основе использования электрогидравлического эффекта. Представлены методика и результаты экспериментальных исследований по выявлению зависимости степени обеззараживания жидкости от вложенной в нее электрической энергии на примере обработки водного дрожжевого раствора.

Результаты. Установлено, что эта зависимость имеет не линейный, как предполагалось ранее, а экспоненциальный характер, вследствие чего при любом режиме обработки невозможно достичь абсолютного уничтожения грибковых бактерий. Оставшиеся живыми микроорганизмы с течением времени производят самовосстановление популяции, что вызывает снижение бактерицидных свойств обработанной жидкости. **Заключение.** В результате проведенного исследования определен режим обработки, обеспечивающий наименьшие негативные последствия данного явления при максимальной эффективности обеззараживания. Приведены параметры высоковольтной электроимпульсной обработки водного дрожжевого раствора, обеспечивающие достижение такого эффекта.

Ключевые слова: обеззараживание жидкостей, электрогидравлический эффект, режимы обработки, эффективность обеззараживания.

Abstract

Introduction. Due to significant water consumption to maintain business activities, there is concern about an issue of disinfecting water discharged to water bodies and supplied to a circulating water system after being used for process needs. Modern researchers focus not only on traditional disinfection methods but on the development of innovative technologies as well. Such technologies include a technology of water treatment using an electric field. **Methods.** The paper addresses liquid disinfection with the use of high-voltage electric pulses. A mock-up installation for liquid disinfection based on the use of the electro-hydraulic effect is described. The paper presents a technique and results of experimental researches conducted to determine a dependence between the liquid disinfection rate and electrical energy applied using the example of aqueous yeast solution treatment. **Results.** It has been established that the dependence is not linear (as it was assumed earlier) but exponential. Therefore, it is impossible to ensure the total elimination of fungal bacteria in any mode of treatment. Over time, the remaining living microorganisms recover the population, reducing the bactericidal properties of the treated liquid.

Conclusion. As a result of the study, a treatment mode with the least negative consequences of this phenomenon at the maximum disinfection efficiency is determined. Parameters of aqueous yeast solution treatment with the use of high-voltage electric pulses, which ensure achievement of such effect, are described.

Keywords: liquid disinfection, electro-hydraulic effect, treatment modes, disinfection efficiency.

Введение

Общий объем водопотребления из природных водных объектов в Российской Федерации составляет около 80 км³. После использования в интересах обеспечения ключевых областей хо-

зяйственной деятельности до 52 км³ этой воды сбрасывается в водоемы в виде сточных вод, из которых не менее 37 % подлежат очистке. Такая ситуация предполагает активную деятельность

и контроль государства в сфере очистки и обеззараживания сточных вод [3, 4].

Традиционно для очистки и обеззараживания сточных вод используются механические, химические, физико-химические, биологические и комбинированные методы [2, 5–8, 10, 11, 12]. Одним из перспективных направлений обеззараживания воды является воздействие на нее электрическим полем. Исследования этого процесса были начаты еще в 50-х годах прошлого века [9], однако новый интерес они вызвали лишь в настоящее время [1]. В связи с крайне малым объемом данных о процессах, протекающих при электрогидравлической обработке воды [13–15], современные исследователи сосредоточились на вопросах оптимизации электроэнергетического воздействия на нее с позиции повышения бактерицидности среды после обработки. Решение этого вопроса позволит обосновать значения параметров электрогидравлической обработки, обеспечивающих максимальную эффективность процесса обеззараживания воды, что представляется актуальным.

Обоснование объекта, предмета, задач и методов исследования

По результатам проведенных ранее исследований авторами был предложен линейный характер зависимости остаточного содержания микроорганизмов от величины энергии электрических разрядов, использованной для обработки раствора [1]. Однако позднее было выявлено, что использование такой зависимости допустимо лишь для простого выбора наиболее эффективного режима работы электрогидравлической установки. Для исследования самого процесса обеззараживания необходимо более детальное изучение характера этой зависимости. Наблюдения показали, что в обработанной жидкости со временем (примерно через 24 часа) начинает восстанавливаться популяция микроорганизмов, а ее бактерицидные свойства ухудшаются. Этот факт дал основание выдвинуть гипотезу, что независимо от количества энергии, вложенной в обеззараживание, в жидкости остаются живые микроорганизмы, способные восстанавливать свою численность. Это возможно лишь в том случае, когда количество микроорганизмов в обрабатываемом объеме жидкости с увеличением вложенной энергии не сводится к нулю, как предполагалось

ранее, а лишь асимптотически к нему приближается. В связи с изложенным задачей исследования было подтверждение выдвинутой гипотезы и определение оптимального сочетания параметров электрогидравлической обработки для получения максимальных эффектов обеззараживания и сохранения бактерицидности.

Объектом исследования в таком случае является электрогидравлический метод обеззараживания жидкости, а предметом исследования — водная среда, подлежащая обеззараживанию.

Методы и материалы

Для проведения исследований использовалась специально разработанная авторами экспериментальная установка. Она представляет собой непроточную цилиндрическую пластиковую емкость (корпус) с металлическими днищем и крышкой, в которую вмонтирован центральный высоковольтный электрод. Роль второго электрода выполняет металлическое днище корпуса (рис. 1).

Подвергающаяся обеззараживанию жидкость заливается в рабочую емкость. На электроды рабочей емкости от высоковольтного источника тока через накопительные импульсные конденсаторы и коммутирующее устройство подаются электрические импульсы, вызывающие разряды



Рис. 1. Экспериментальная электрогидравлическая установка

в рабочей емкости между центральным электродом и металлическим дном корпуса. Электрогидравлические удары, происходящие в жидкости под действием электрических разрядов, вызывают гибель микроорганизмов.

В качестве испытываемой жидкости использовался дрожжевой водный раствор, приготовленный в соотношении 1 г сухеных дрожжей на 1 л воды. Эта дрожжевая смесь обрабатывалась в электрогидравлической установке на трех режимах ее работы, отличающихся соотношением параметров электрической емкости накопительных конденсаторов (C , мкФ) и величиной подаваемого на них напряжения (U , кВ):

- мягкий режим ($U = 25$ кВ, $C = 6,0$ мкФ);
- средний режим ($U = 50$ кВ, $C = 1,5$ мкФ);
- жесткий режим ($U = 60$ кВ, $C = 0,6$ мкФ).

При каждом режиме испытаний обработка жидкости выполнялась тремя сериями воздействий — 100, 200 и 300 разрядов. Для повышения достоверности эксперимента опыты при каждой серии воздействий повторялись трижды.

Перед каждым опытом и по его завершению проводился отбор проб, причем в обработанные пробы для интенсификации жизнедеятельности сохранившихся дрожжевых бактерий вводилась глюкоза в объеме 1 мл на 3 мл обработанного раствора. Наличие и количество выживших дрожжевых бактерий в отобранных пробах оценивалось после их 24-часовой выдержки по соотношению в пробнике (герметичный 20-миллиметровый стерильный шприц) объемов раствора (V_p) и газа (V_r), выделяемого бактериями в процессе их жизнедеятельности.

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментов при мягком режиме обработки жидкости представлены в табл. 1.

Так как газ является продуктом жизнедеятельности микроорганизмов в растворе, то уменьше-

ние 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.

Для выявления характера зависимости $V_r/V_p = f(N_r)$, где N_r — количество поданных в жидкость разрядов; использовалась программа обработки статистических данных SPSS, в регрессионном анализе которой есть функция «подгонка кривых», позволяющая не только оперативно подобрать зависимость для набора экспериментальных данных, но и оценить степень корректности такой зависимости. По полученным экспериментальным данным были построены четыре регрессионные модели — линейная, квадратичная, кубическая и экспоненциальная. Оценочные параметры адекватности моделей показали, что результаты экспериментов лучше всего описываются экспоненциальной моделью вида

$$V_r/V_p = 3,317 \cdot \text{EXP}(-0,007 \cdot N_r). \quad (1)$$

Графическая зависимость степени обеззараживания раствора от вносимой энергии разрядов представлена на графике рис. 2.

Расчет по зависимости (1) показал, что для максимального обеззараживания раствора до уровня $V_r/V_p = 0,01$, т. е. близкого к нулю, на мягком режиме требуется подать 830 разрядов.

Аналогичный анализ был проведен для среднего и жесткого режимов обработки. Его результаты представлены на графиках рис. 3, 4, 5 и в табл. 2.

Сравнение расчетных зависимостей степени обеззараживания от вносимой энергии в диапазоне от 100 до 800 разрядов при различных режимах обработки после 24-часовой выдержки жидкости приведено на рис. 5.

Из графика рис. 5 видно, что самым эффективным режимом обработки является жесткий

Таблица 1

Результаты обработки раствора дрожжевых грибов на мягком режиме работы электрогидравлической установки

| Мягкий режим | Количество разрядов, ед. | | | |
|---------------------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|
| | 0 (Эталон) | 100 | 200 | 300 |
| Относительное значение (V_r/V_p): | | | | |
| опыт № 1 | 4,000 | 1,750 | 0,875 | 0,375 |
| опыт № 2 | 2,000 | 2,125 | 0,750 | 0,250 |
| опыт № 3 | 3,000 | 2,000 | 1,000 | 0,500 |

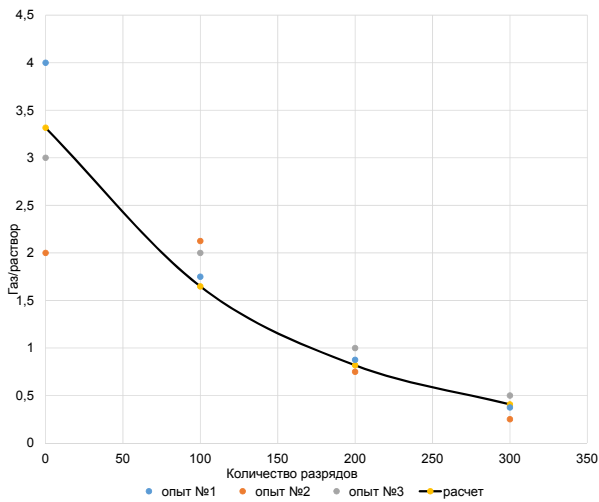


Рис. 2. Экспоненциальная зависимость степени обеззараживания от вносимой энергии разрядов на мягком режиме

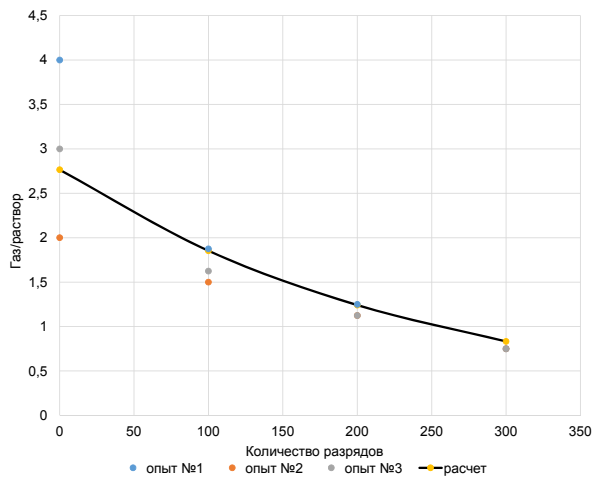


Рис. 3. Экспоненциальная зависимость степени обеззараживания от вносимой энергии разрядов на среднем режиме

режим. Расчет по зависимостям табл. 2 показал, что для обеззараживания раствора до уровня $V_r/V_p = 0,01$, т. е. близкого к нулю, на жестком режиме требуется 620 импульсов, в то время как на среднем и мягком режимах для этого необходимо воздействие 1400 и 830 импульсов соответственно.

С учетом полученных результатов представляет интерес исследование интенсивности восстановления популяции грибков после электрогидравлической обработки. Как указывалось ранее, восстановление концентрации живых грибков в пробах начинается примерно через 24 часа после обработки. Замеры соотношения V_r/V_p в пробах

через 72 часа позволили получить видеоизмененные регрессионные модели, представленные в табл. 3. Графики, построенные по этим моделям, показаны на рис. 6.

На графиках хорошо видна тенденция, ведущая к совпадению регрессионных моделей для всех режимов.

Установлено, что показатель числа микроорганизмов в растворе (V_r/V_p) в зависимости от времени его выдержки ($T_{v,ч}$) нарастает по линейному закону (рис. 7), а скорость их восстановления

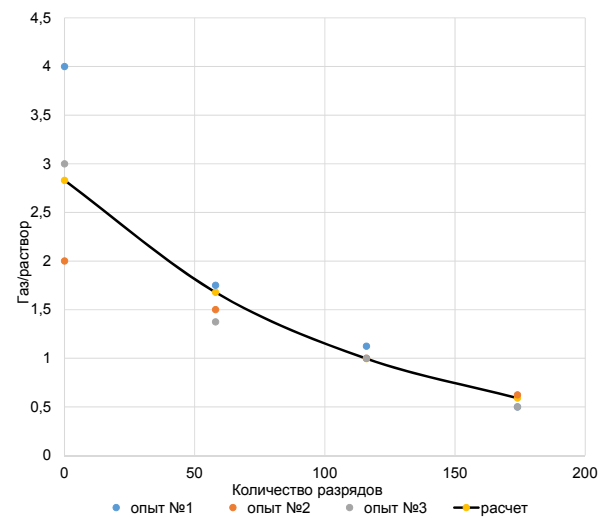


Рис. 4. Экспоненциальная зависимость степени обеззараживания от вносимой энергии разрядов на жестком режиме

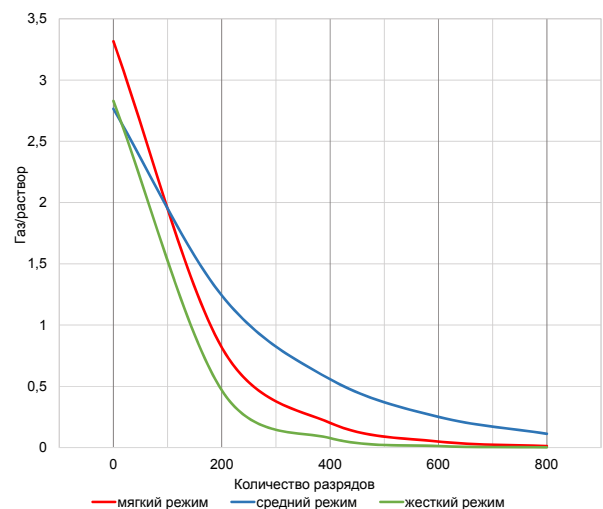


Рис. 5. Сравнительное протекание процесса обеззараживания в соответствии с замерами через 24 часа

Таблица 2
Регрессионные зависимости $V_r/V_p = f(N_r)$ по замерам после 24-часовой выдержки обработанной жидкости

| Режим | Формула |
|---------------|--|
| Мягкий режим | $V_r/V_p = 3,317 \cdot \text{EXP}(-0,007 \cdot N_r)$ |
| Средний режим | $V_r/V_p = 2,765 \cdot \text{EXP}(-0,004 \cdot N_r)$ |
| Жесткий режим | $V_r/V_p = 2,830 \cdot \text{EXP}(-0,009 \cdot N_r)$ |

Таблица 3
Регрессионные зависимости $V_r/V_p = f(N_r)$ по замерам после 72-часовой выдержки обработанной жидкости

| Режим | Формула |
|---------------|--|
| Мягкий режим | $V_r/V_p = 4,396 \cdot \text{EXP}(-0,005 \cdot N_r)$ |
| Средний режим | $V_r/V_p = 3,972 \cdot \text{EXP}(-0,004 \cdot N_r)$ |
| Жесткий режим | $V_r/V_p = 3,848 \cdot \text{EXP}(-0,004 \cdot N_r)$ |

определяется тангенсом угла наклона линии нарастания.

Приведенные результаты экспериментов позволяют считать жесткий режим наиболее эффективным для электрогидравлического обеззараживания жидкости. При этом опыты проводились при предельных значениях параметров процесса. Целью дальнейших экспериментов являлся поиск оптимальных значений параметров жесткого режима обработки из диапазонов всех возможных их значений по напряжениям

разряда, емкостям накопительных конденсаторов и количеству разрядов. В качестве параметра оптимизации выбрано относительное значения объема образовавшегося газа к объему раствора (V_r/V_p), в качестве факторов варьирования — напряжение разряда, емкость конденсаторов и число вносимых в раствор электрических разрядов. Выбранные факторы отвечают требованиям, предъявляемым к ним по управляемости, точности замера, совместимости и отсутствию корреляции. Факторы эксперимента и диапазоны их варьирования приведены в табл. 4.

Количество опытов при проведении полного факторного эксперимента с тремя факторами и двумя уровнями их варьирования равно $Y = 2^3 = 8$. В ходе каждого из восьми опытов определялось значение параметра оптимизации V_r/V_p , а также время сохранения бактерицидности T_B и скорость восстановления популяции микроорганизмов в растворе T_r . Матрица плана эксперимента и результаты опытов представлены в табл. 5.

Из данных табл. 5 видно, что 5-й опыт показал не только максимальный эффект обеззараживания, но и максимальное время сохранения бактерицидности среды и минимальную скорость восстановления популяции микроорганизмов. Соотношение значений факторов (параметров режима обработки), соответствующих опыту № 5, можно считать близким к оптимальному для достиже-

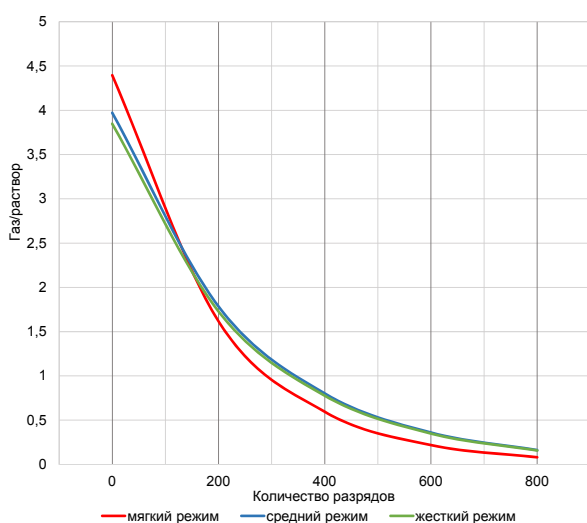


Рис. 6 Сравнительное протекание процесса обеззараживания в соответствии с замерами через 72 часа

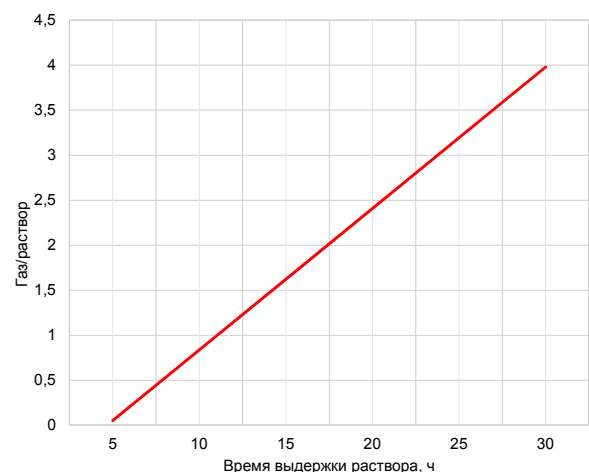


Рис. 7. График восстановления популяции микроорганизмов в растворе после его электрогидравлической обработки с параметрами жесткого процесса ($U=60$ кВ, $C=0,6$ мкФ, $N_r=300$ разрядов)

Таблица 4
Факторы эксперимента и интервалы их варьирования

| № п/п | Наименование фактора | Верхний уровень | Нижний уровень |
|-------|--------------------------------|-----------------|----------------|
| 1 | Напряжение разряда U , кВ | 60 | 35 |
| 2 | Емкость конденсатора C , мкФ | 0,6 | 0,1 |
| 3 | Количество разрядов N , ед. | 600 | 300 |

Таблица 5
Результаты опытов с данными по эффективности обеззараживания, времени сохранения бактерицидности и скорости восстановления микроорганизмов в растворе

| Номер опыта | U , кВ | C , мкФ | N , ед. | V_i/V_p , % | T_V | T_B , ч |
|-------------|----------|-----------|-----------|---------------|-------|-----------|
| 1 | 35 | 0,25 | 300 | 0,058 | 0,126 | 7,34 |
| 2 | 35 | 0,60 | 300 | 0,566 | 0,143 | 3,85 |
| 3 | 60 | 0,25 | 300 | 0,629 | 0,190 | 4,48 |
| 4 | 60 | 0,60 | 300 | 0,494 | 0,157 | 4,66 |
| 5 | 35 | 0,25 | 600 | 0,010 | 0,103 | 7,71 |
| 6 | 35 | 0,60 | 600 | 0,207 | 0,150 | 6,42 |
| 7 | 60 | 0,25 | 600 | 0,374 | 0,145 | 5,22 |
| 8 | 60 | 0,60 | 600 | 0,286 | 0,130 | 5,60 |

ния наибольшего эффекта электрогидравлического обеззараживания водных растворов.

Заключение

Проведенные исследования уточнили, что при электрогидравлической обработке жидкости снижение в ней количества живых микроорганизмов в зависимости от количества вложенной энергии происходит не по линейному, а по экспоненциальному закону. Максимальный эффект обеззараживания раствора с дрожжевыми грибками достигается на жестком режиме обработки 600-ми разрядами с параметрами $U = 35$ кВ и $C = 0,25$ мкФ. Данный режим можно считать близким к оптимальному для достижения наибольшего эффекта электрогидравлического обеззараживания водных растворов. Примерно через 24 часа для исследованного вида дрожжевых грибков количество микроорганизмов в растворе начинает восстанавливаться с нарастанием их популяции по линейному закону. Скорость восстановления популяции микроорганизмов разная, но такая, которая приводит к выравниванию концентраций примерно через 72 часа несмотря на разные режимы обработки. При этом

режим, обеспечивающий наибольшее время сохранения бактерицидного состояния раствора с дрожжевыми грибками, совпадает с режимом оптимальной эффективности его обеззараживания.

Литература

1. Добромиров, В. Н., Аврамов, Д. В. и Мартынов, Н. В. (2019). Технология обеззараживания жидкости на основе электрогидравлического эффекта. Вода и экология: проблемы и решения, № 2, сс. 17–23. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.2.17-23.
2. Жмур, Н. С. (2003). Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: АКВАРОС, 512 с.
3. 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.
4. 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.
5. Тятте, А. (2015). Круговорот воды в городе. Что влияет на качество воды и как ее очищают в Петербурге. Экология и право, № 3 (59), сс. 42–45.
6. Хенце, М., Армоэс, П., Ля-Кур-Янсен, Й. и Арван Э. (2004). Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы. М.: Мир, 480 с.
7. 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].
8. Эпов, А. Н. и Канунникова М. А. (2015). Очистка сточных вод предприятий агропромышленного комплекса. Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения, № 1, сс. 52–59.
9. Юткин, Л. А. (1986) Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 253 с.
10. 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.
11. 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.
12. 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.

13. Ivanov, V., Wang, X.-H., Tay, S. T.-L. 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.

14. Mendoza-Espinosa, L. and Stephenson, T. (1999). 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.

15. 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.

References

1. Dobromirov, V.N., Avramov, D.V. and Martynov, N.V. (2019). Technology of liquid disinfection based on the electrohydraulic effect. *Water and Ecology*, No. 2, pp. 17–23. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.2.17-23

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

3. 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.

4. 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.

5. 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. 42–45.

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

7. 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].

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

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

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. Ivanov, V., Wang, X.-H., Tay, S. T.-L. 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.

14. Mendoza-Espinosa, L. and Stephenson, T. (1999). A review of biological aerated filters (BAFs) for wastewater treatment. *Environmental Engineering Science*, Volume 16, No. 3, pp. 201–216. DOI: 10.1089/ees.1999.16.201.

15. 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.

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

Гордиенко Валерий Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: val-gor@yandex.ru

Authors

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

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

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

Gordienko Valery Evgen'evich, Dr. of Engineering, Professor Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia
E-mail: val-gor@yandex.ru