

ЭКОЛОГИЯ

Обзорная статья

УДК 628.3

doi: 10.31774/2658-7890-2021-3-2-61-74

Применение эффекта кавитации при очистке сточных вод животноводства

**Екатерина Васильевна Комарова¹, Александра Васильевна Слабунова²,
Сергей Евгеньевич Харитонов³**

^{1, 2, 3}Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

¹EkaterinaKomarova95@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9807-1696>

²SlabunovaAV@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6769-3866>

³Sekh5052@gmail.ru

Аннотация. Цель: провести анализ преимуществ кавитационного обеззараживания сточной воды различного происхождения, в т. ч. и сточных вод животноводства.

Обсуждение. Проблема очистки и утилизации животноводческих стоков в России стоит достаточно остро, как и поиск альтернативного источника воды для полива сельскохозяйственных культур, одним из путей решения данных проблем является применение сточных вод в орошении. Однако такое решение, в свою очередь, имеет свои сложности, связанные с санитарно-гигиеническими требованиями, нужны большие капитальные вложения для подготовки стоков к орошению, общепринятые системы очистки крупногабаритны и сложны. Это вызывает особый интерес к изучению обеззараживания воды путем кавитационной обработки. Проведенный анализ показал, что кавитационный метод зарекомендовал себя как безреагентное, экономически и энергетически выгодное обеззараживание воды, которое применяется во многих сферах деятельности.

Выводы: кавитационный способ очистки и обеззараживания различных видов сточной воды однозначно имеет преимущества перед существующими методами. Однако требует дальнейшего более глубокого и подробного изучения процесса обеззараживания сточных вод животноводства с возможностью получения очищенной и обеззараженной жидкости, которая богата органическими веществами, имеет удобрительную ценность при поливе сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: животноводческие стоки, кавитационное обеззараживание воды, обеззараживание жидкого навоза, сточные воды, орошение сельскохозяйственных культур, гидродинамическая кавитация, кавитационная водоподготовка, кавитационные технологии

ECOLOGY

Review article

Applying the cavitation effect during animal wastewater treatment

Ekaterina V. Komarova¹, Alexandra V. Slabunova², Sergey E. Haritonov³

^{1, 2, 3}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

¹EkaterinaKomarova95@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9807-1696>

²SlabunovaAV@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6769-3866>

³Sekh5052@gmail.ru



Abstract. Purpose: to analyze the advantages of cavitation disinfection of wastewater of various origins, including animal husbandry wastewater. **Discussion.** The problem of purification and utilization of livestock wastewater in Russia is quite acute, as well as the search for an alternative source of water for irrigating crops, one of the ways of solving these problems is the use of wastewater in irrigation. However, such a solution, in its turn, has its own difficulties associated with sanitary and hygienic requirements, large capital investments are needed to prepare wastewater for irrigation, the conventional treatment systems are large and complex. This arouses particular interest to the study of water disinfection by cavitation treatment. The analysis showed that the cavitation method has established itself as a reagent-free, economically and energetically beneficial water disinfection, which is used in many areas of activity. **Conclusions:** the cavitation method of purification and disinfection of various types of wastewater has clear advantages over existing methods. However, it requires further deeper and more detailed study of the disinfection process of wastewater from animal husbandry with the possibility of obtaining a purified and disinfected liquid, rich in organic substances, having a fertilizing value during irrigating crops.

Keywords: livestock wastewater, cavitation disinfection of water, disinfection of liquid manure, wastewater, irrigation of agricultural crops, hydrodynamic cavitation, cavitation water treatment, cavitation technologies

Введение. Проблема очистки и утилизации животноводческих стоков в России стоит достаточно остро, потому как аграрный сектор занимает значительное место в экономике страны и имеется большое количество животноводческих комплексов.

Как известно, промышленное животноводство является одним из крупных водопотребителей; большое количество поголовья скота на ограниченных площадях, использование гидравлических систем уборки и удаления экскрементов животных приводят к образованию огромных объемов жидкого навоза.

Современные технологии очистки животноводческих стоков представляют собой отдельные комплексы, которые занимают огромные территории, требуют больших капитальных вложений и достаточно сложную систему обслуживания, она включает многоступенчатость методов очистки с применением дополнительных реагентов, последние, в свою очередь, имеют высокую стоимость и определенные требования к хранению и применению.

Одним из путей решения проблемы очистки животноводческих стоков до показателей, пригодных к поливу сельскохозяйственных культур, является внедрение новых методов водоподготовки.

Обсуждение. Известно применение эффекта кавитации во многих

сферах деятельности человека – в разных направлениях пищевой, военной, нефтехимической и других видах промышленности, медицине, косметологии, биотехнологии, и все больше внимание уделяется применению в сельском хозяйстве.

Как одно из перспективных направлений рассматривается кавитационная технология обеззараживания и дистиллирования воды, не требующая предварительной химической или механической подготовки, что делает технологию привлекательной в экономическом и экологическом аспектах [1].

В России изучению воздействия на водные системы гидродинамической кавитации особое внимание уделяют в Сибирском федеральном университете такие ученые, как А. С. Криволицкий, В. А. Кулагин, О. Г. Дубровская [2–8], Л. С. Прохасько [9, 10]. В своих работах они излагают результаты исследований воздействия гидродинамической кавитации на различные водные системы, проводят анализ существующих технологических схем очистки, выявляют изменения физических и химических показателей воды, установили рациональную продолжительность кавитационной обработки, определили эффективность снижения содержания химических элементов при различных режимах гидродинамического кавитационного воздействия и др. Ученые отмечают, что использование кавитационных генераторов для эффективной очистки воды является новой перспективной, энергетически малозатратной, безотходной и безреагентной технологией, которая позволяет на выходе получать чистую, обеззараженную воду.

Кавитационная обработка как один из способов физического воздействия на жидкость считается новым экологичным методом обеззараживания, потому что является безреагентным методом обеззараживания жидкостей. Безреагентные методы очистки и дезинфекции не загрязняют природную среду химическими веществами, не оказывают вредного или раздражающего воздействия на организм человека при контакте с очищенной водой и другими жидкостями.

Применение в животноводстве кавитационного обеззараживания находится на стадии исследования. При использовании сточных вод животноводства в сельском хозяйстве опасение вызывает возможность распространения гельминтов, поэтому новые приемы очистки и обеззараживания животноводческих стоков (а также других видов сточных вод) кавитационным способом так востребованы в исследованиях.

Эффективность данного способа доказана исследованиями многих авторов. Но результаты по числу циклов обработки для достижения 100% обеззараживания стоков различны.

Российский опыт кавитационного обеззараживания жидкого навоза направлен на получение органоминерального удобрения в жидкой и твердой фазах [11–14], зарубежный опыт, в свою очередь, направлен в основном на обеззараживание воды до питьевого качества [15, 16].

В зависимости от типа кавитационных конструкций и методик кавитационного обеззараживания требуются различные подходы к процессу обеззараживания.

Например, существующий кавитационный способ обеззараживания жидкого навоза и помета и технологическая линия для безотходного приготовления органоминеральных удобрений [11] позволяют произвести кавитационное обеззараживание в кавитационном генераторе-диспергаторе за один проход, разрушение и лишение всхожести семян сорных растений – за два прохода, а прекращение выделения аммонийного азота – путем 4–5-кратного прохода через кавитационный генератор-диспергатор.

Другим примером кавитационного способа обеззараживания и переработки навозов и стоков является генератор-диспергатор и установка обратного осмоса, которая обеспечивает гибель всей патогенной микрофлоры при прохождении первой ступени. Процессы обеззараживания, гомогенизации и коагуляции достигаются во второй и третьей ступени безотходной технологии обеззараживания и переработки навозов и стоков с исполь-

зованием кавитационного генератора-диспергатора и установки обратного осмоса [12].

Также кавитационное обеззараживание низкоконцентрированных навозных стоков в кавитационном смесителе-диспергаторе достигается путем нескольких повторений прохождения их через два насоса, между которыми и располагается кавитационный смеситель-диспергатор. Данный способ также предусматривает кавитационное обеззараживание жидких органических отходов и приготовление органоминеральных удобрений [13].

Необходимость пропуска промышленных и схожих по составу сточных вод через кавитационную установку несколько раз объясняется еще и размером кавитационного факела, который всегда оказывается небольшим, изменение скорости течения воды и попадание любой взвешенной частицы в поток воды приводят к исчезновению кавитационного факела вообще, а поддерживать скорость течения постоянной технически сложно [14].

Потому при использовании кавитационной установки необходимо предусматривать подготовку обеззараживаемых вод (животноводческих стоков) путем пропуска их через систему механической очистки.

В ходе проведения микробиологических исследований [17] выявлено бактерицидное действие кавитации, совместное воздействие высокой температуры (75 °С) и ударных волн ультразвука вызвало гибель всей микрофлоры, присутствовавшей в исходной массе навоза, уже после 9-минутной ее обработки. Также отмечается, что после кавитационной обработки продукт возвращается обратно в емкость для проведения нескольких обработок, различных по требуемым режимам [17].

Сочетание различных способов физического воздействия на обрабатываемую жидкость признано наиболее эффективным методом уничтожения патогенной микрофлоры. Синергетический эффект и многократное увеличение эффективности обеззараживания жидкостей достигается путем

совместного применения кавитации, ультрафиолетового облучения, насыщения жидкости озоном или кислородом [18].

В изучении способов водоподготовки питьевой воды с целью обеззараживания выделяется ряд недостатков, которых лишена установка многофункционального генератора кавитации. Она более экологична и экономична, также она менее энергозатратна. Особый интерес данная установка вызывает со стороны получения из сточных вод животноводства жидкой фазы, очищенной и обеззараженной практически до показателей питьевой воды, а также содержащей органоминеральные вещества, которые имеют особую ценность при поливе сельскохозяйственных культур. Благодаря безреагентному способу кавитационной водоочистки возможно осуществление глубокой очистки воды при сохранении в ней органических удобрительных веществ (азота, калия, фосфора и т. д.) [19].

В целом можно сказать, что кавитация – это хорошо зарекомендовавшая себя технология в опытном лабораторном масштабе, как в России, так и в зарубежных странах.

Процессы кавитации широко используются для уничтожения непокорных органических загрязнителей в сточных водах в лабораторных масштабах. Комбинированный метод кавитации (гидродинамической и акустической) в сочетании с реагентами является более энергоэффективным и экономичным по сравнению с отдельными методами, поскольку он использует преимущества этих двух методов для получения большего количества энергии [20].

Экспериментальные исследования, посвященные применению кавитации для очистки балластных вод, показали, что гидродинамическая кавитация способствует 99% уничтожению всех бактерий, а также 80% уничтожению зоопланктона [15]. Цель проектировщиков – сделать процесс однопроходным, так как с учетом объема обрабатываемой жидкости практически невозможно иметь несколько проходов при очистке балластных вод [15].

Исследования, проводимые для выявления эффективности сочетания гидродинамической кавитации, акустической кавитации и перекиси водорода на скважинной воде, которая имела бактериальную популяцию гетеротрофных пластинчатых бактерий, а также индикаторных микроорганизмов (общие колиформы, фекальные колиформы и фекальные стрептококки), позволили выявить, что гибридные методы обеззараживания воды намного превосходят любые индивидуальные методы физической обработки [16]. Однако, прежде чем подвергнуть скважинную воду дезинфекционной обработке, ее необходимо было предварительно отфильтровать с целью удаления взвешенных частиц и грязи.

Гибридная методика, описанная в работе К. К. Джоти, А. Б. Пандита [16], позволяет снижать не только содержание бактерий, но и общее количество кишечных палочек, фекальных колиформ и фекальных стрептококков, которые рассматриваются как индикаторы загрязнения питьевой воды.

Изучение физических и биологических факторов, участвующих в разрушении кишечной палочки гидродинамической кавитацией [21], а также воздействием кавитации на клеточную стенку дрожжей [22], позволило доказать, что при длительном и повторном циркулировании суспензий через зону кавитации возможно крупномасштабное разрушение клеток, а также доказано, что гидродинамическая кавитация является более энергоэффективной, чем ультразвуковая обработка [23].

В изучении систематического удаления остатков фармацевтических препаратов из сточных вод с помощью нового генератора кавитации гидродинамическая кавитация была проведена как перед стадией биологической обработки сточных вод, так и после. Полученные результаты показали высокую эффективность удаления фармацевтических препаратов при использовании гидродинамической кавитации до и после биологической обработки [24, 25].

В работе по исследованию очистки эвтрофной воды с использовани-

ем комбинации гидродинамической кавитации и озонирования было определено, что комбинация обеспечивает множество преимуществ, которые включают простоту эксплуатации и высокую эффективность обработки. Это перспективная технология очистки эвтрофной воды, на основе которой можно еще больше повысить энергоэффективность [26].

Изучение кавитационной очистки и обеззараживания воды различного происхождения и разных целей применения показывает высокие и многообещающие положительные стороны метода в лабораторных условиях, однако некоторые ученые считали, что более высокая стоимость обработки по сравнению с традиционными химическими методами является препятствием для ее применения в промышленных масштабах [15].

Однако уже через несколько лет другие ученые утверждают [27], что гидродинамическая кавитация становится все более привлекательной как в лабораторных, так и в натуральных условиях в качестве альтернативной системы очистки и обеззараживания воды. Когда вопросы дополнительного энергопотребления для управления технологическим процессом и износом материалов генераторов гидродинамической кавитации будут решены, потенциал такой технологии значительно возрастет [27].

Выводы. На протяжении долгого времени вопрос сельскохозяйственного использования животноводческих стоков привлекал внимание агрономов, экономистов и врачей. Он всегда вызывал острые и долгие дискуссии. Излишняя боязнь применения животноводческих стоков с санитарной точки зрения была помехой правильному эколого-экономическому решению этого вопроса. И на сегодняшний день, благодаря достижениям науки и развитию инновационных технологий, появилась перспектива очистки и обеззараживания животноводческих стоков и других видов сточных вод с использованием эффекта кавитации.

Анализ имеющихся исследований кавитационной очистки и обеззараживания жидких сред показал, что использование кавитационных гене-

раторов для обработки сточных вод является новой перспективной, энергетически малозатратной, безотходной и безреагентной технологией, которая позволяет на выходе получать чистую, обеззараженную воду, а в случае с животноводческими стоками еще и богатую биогенными элементами, имеющими удобрительную ценность.

Преимущества кавитационного метода перед общепринятыми способами обеззараживания вод (хлорирование, озонирование и т. д.) заключаются в экономическом и экологическом аспектах, так как при кавитационном обеззараживании исключается применение дополнительных токсических элементов, которые могут негативно влиять на организм человека и требуют значительных затрат на их приобретение.

Что касается преимуществ кавитационного метода очистки сточных вод перед общепринятыми способами, то здесь выделяют компактность установки, она не требует наличия больших площадей, а также в зависимости от вида поступающей на очистку воды может заменять несколько стадий водоподготовки (механическую, биологическую и обеззараживание), а может использоваться в комбинированной системе очистки, что больше подходит для сложных и высококонцентрированных сточных вод.

Недостатками кавитации можно считать небогатый опыт применения в производственных масштабах и изученность в более узком направлении применения, а именно в очистке и обеззараживании животноводческих стоков. Для использования очищенных и обеззараженных методом кавитации животноводческих стоков в увлажнительно-удобрительном поливе сельскохозяйственных культур необходимо более глубокое изучение данного метода как в лабораторных, так и в натуральных условиях.

Список источников

1. Кавитационная обработка воды. Свойства воды и эффективность обработки / Ю. М. Аверина, Н. А. Моисеева, Д. А. Шувалов, Н. П. Нырков, А. Ю. Курбатов // Успехи в химии и химической технологии. 2018. Т. 32, № 14. С. 17–19.
2. Криволуцкий А. С., Кулагин В. А. Изменение окислительно-восстановитель-

ного потенциала воды в результате кавитационной обработки // Вестник КрасГАУ. 2007. № 2. С. 139–146.

3. Кулагин В. А., Кулагина Т. А., Шеленкова В. В. Феноменологическая модель гидродинамического кавитационного воздействия на водные системы // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2019. 12(7). С. 818–829.

4. Интенсификация процессов биологической очистки сточной воды предприятий пищевого комплекса на основе эффектов гидродинамической кавитации / О. Г. Дубровская, В. А. Кулагин, Т. А. Курилина, А. И. Матюшенко // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2018. 11(5). С. 584–590.

5. Математическое моделирование кавитационных процессов при кондиционировании промышленных сточных вод / О. Г. Дубровская, В. А. Кулагин, Е. С. Сапожникова, Ф.-Ч. Ли, Ц. Ли, Ч.-И. Чжэн // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2018. № 3. С. 369–376.

6. Дубровская О. Г., Кулагин В. А. Безреагентная очистка промышленных сточных вод, содержащих тяжелые металлы на основе технологии гидродинамической кавитации // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2019. 12(4). С. 460–467.

7. Особенности влияния эффектов кавитации на физико-химические свойства воды и стоков / В. А. Кулагин, Е. С. Сапожникова, О. П. Стебелева, Л. В. Кашкина, Ч.-И. Чжэн, Ц. Ли, Ф.-Ч. Ли // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2017. № 5. С. 605–614.

8. Дубровская О. Г., Кулагин В. А., Сапожникова Е. С. Современные компоновки технологических схем очистки сточных вод с использованием кавитационной технологии // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2018. № 2. С. 217–223.

9. Кавитационные технологии в пищевой промышленности / Д. А. Ярмаркин, Л. С. Прохасько, А. Н. Мазаев, Б. К. Асенова, О. В. Зинина, Р. В. Залилов // Молодой ученый. 2014. № 8(67). С. 312–315.

10. Расчет параметров кавитационного устройства для жидких пищевых сред / Л. С. Прохасько, Р. В. Залилов, О. В. Зинина, Б. К. Асенова // АПК России. 2016. № 1. С. 96–104.

11. Пат. 2527851 Российская Федерация, МПК С 05 F 3/00. Кавитационный способ обеззараживания жидкого навоза и помета и технологическая линия для безотходного приготовления органоминеральных удобрений / Петраков А. Д., Радченков С. М.; патентообладатели Петраков А. Д., Радченков С. М. № 2013109863/13; заявл. 05.03.13; опубл. 10.09.14, Бюл. № 25. 13 с.

12. Безотходная технология обеззараживания и переработки навозов и стоков [Электронный ресурс]. URL: <https://kavut.ru/безотходная-технология-обеззаражива/> (дата обращения: 10.03.2021).

13. Пат. 2735961 Российская Федерация, МПК С 05 F 3/00, В 82 В 3/00, В 82 Y 40/00. Кавитационный способ обеззараживания жидких органических отходов и приготовления органоминеральных удобрений / Костенко М. Ю., Наумов К. С., Бышов Н. В., Борычев С. Н., Рембалович Г. К., Полищук С. Д., Безносюк Р. В., Чурилов Д. Г., Тумаков С. Н.; патентообладатель Ряз. гос. агротехнол. ун-т им. П. А. Костычева. № 2019138106; заявл. 25.11.19; опубл. 11.11.20, Бюл. № 32. 6 с.

14. Климов В. Я. Критика кавитационной очистки сточных вод различной природы [Электронный ресурс]. URL: https://cliff72.1c-umi.ru/realizovano/kritika_kavitacionnoj_ochistki_stochnyh_vod_razlichnoj_prirody/ (дата обращения: 10.03.2021).

15. Gogate P. R. Application of cavitation reactors for water disinfection: current status and path forward // Journal of Environmental Management. 2007, Dec. Vol. 85, iss. 4. P. 801–815. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.07.001>.

16. Jyoti K. K., Pandit A. B. Hybrid cavitation methods for water disinfection: simultaneous use of chemicals with cavitation // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2003. Vol. 10, iss. 4–5. P. 255–264. [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(03\)00095-6](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(03)00095-6).
17. Ковальчук А. Н., Ковальчук Н. М., Кузин В. А. Развитие эффекта пастеризации при обеззараживании навоза методом кавитации // *Эпоха науки*. 2015. № 4. С. 40.
18. Обеззараживание [Электронный ресурс]. URL: <https://dewa.tech/applications/obezzarajivanie/> (дата обращения: 10.03.2021).
19. Петрякова О. Д., Гудач М. В. Оценка преимуществ кавитационного обеззараживания и разработка кавитационного устройства нового типа // *Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева*. 2011. № 12. С. 163–168.
20. Bagal M. V., Gogate P. R. Wastewater treatment using hybrid treatment schemes based on cavitation and Fenton chemistry: A review // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014. Vol. 21, iss. 1. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.07.009>.
21. Balasundaram B., Harrison S. T. L. Study of physical and biological factors involved in the disruption of *E. coli* by hydrodynamic cavitation // *Biotechnology Progress Journal* [Electronic resource]. 2008. URL: <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1021/bp0502173> (date of access: 10.03.2021). <https://doi.org/10.1021/bp0502173>.
22. Balasundaram B., Harrison S. T. L. Disruption of Brewers' yeast by hydrodynamic cavitation: Process variables and their influence on selective release // *Biotechnology and Bioengineering*. 2006. Vol. 94(2). P. 303–311. <https://doi.org/10.1021/bp0502173>.
23. Balasundaram B., Pandit A. B. Selective release of invertase by hydrodynamic cavitation // *Biochemical Engineering Journal*. 2001. Vol. 8. P. 251–256. [https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(01\)00114-0](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(01)00114-0).
24. Shear-induced hydrodynamic cavitation as a tool for pharmaceutical micropollutants removal from urban wastewater / M. Zupanc, T. Kosjek, M. Petkovšek, M. Dular, B. Kompare, B. Širok, M. Stražar, E. Heath // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014. Vol. 21. P. 1213–1221. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.10.025>.
25. Removal of pharmaceuticals from wastewater by biological processes, hydrodynamic cavitation and UV treatment / M. Zupanc, T. Kosjek, M. Petkovšek, M. Dular, B. Kompare, B. Širok, Ž. Blažeka, E. Heath // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2013. № 20. P. 1104–1112. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.12.003>.
26. Eutrophic water purification efficiency using a combination of hydrodynamic cavitation and ozonation on a pilot scale / W.-X. Li, Ch.-D. Tang, Zh.-L. Wu, W.-M. Wang, Y.-F. Zhang, Y. Zhao, G. Cravotto // *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. Vol. 22. P. 6298–6307. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3889-1>.
27. Hydrodynamic cavitation in combination with the ozone, hydrogen peroxide and the UV-based advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter from drinking water / M. Čehovin, A. Medic, J. Scheideler, J. Mielcke, A. Ried, B. Kompare, A. Žgajnar Gotvajn // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017. Vol. 37. P. 394–404. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.01.036>.

References

1. Averina Yu.M., Moiseeva N.A., Shuvalov D.A., Nyrkov N.P., Kurbatov A.Yu., 2018. *Kavitatsionnaya obrabotka vody. Svoystva vody i effektivnost' obrabotki* [Cavitation water treatment. Water properties and treatment efficiency]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Success in Chemistry and Chemical Technology], vol. 32, no. 14, pp. 17-19. (In Russian).
2. Krivolutskiy A.S., Kulagin V.A., 2007. *Izmenenie oksiditel'no-vosstanovitel'nogo potentsiala vody v rezul'tate kavitatsionnoy obrabotki* [Change of oxidation-reduction potential of water as a result of cavitation treatment]. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU], no. 2, pp. 139-146. (In Russian).

3. Kulagin V.A., Kulagina T.A., Shelenkova V.V., 2019. *Fenomenologicheskaya model' gidrodinamicheskogo kavitatsionnogo vozdeystviya na vodnye sistemy* [Phenomenological model of hydrodynamic cavitation impact on water systems]. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, no. 12(7), pp. 818-829. (In Russian).

4. Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Kurilina T.A., Matyushenko A.I., 2018. *Intensifikatsiya protsessov biologicheskoy ochistki stochnoy vody predpriyatiy pishchevogo kompleksa na osnove effektiv gidrodinamicheskoy kavitatsii* [Intensification of biological wastewater treatment processes for food industry enterprises on the basis of hydrothermodynamic cavitation]. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, no. 11(5), pp. 584-590. (In Russian).

5. Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Sapozhnikova E.S., Lee F.-Ch., Lee C., Zheng C.-I., 2018. *Matematicheskoe modelirovanie kavitatsionnykh protsessov pri konditsionirovanii promyshlennykh stochnykh vod* [Mathematical modeling of cavitation processes in conditioning of industrial wastewater]. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, no. 3, pp. 369-376. (In Russian).

6. Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., 2019. *Bezreagentnaya ochistka promyshlennykh stochnykh vod, sodержashchikh tyazhelye metally na osnove tekhnologii gidrodinamicheskoy kavitatsii* [Reagent-free treatment of industrial waste water containing heavy metals based on hydro-thermodynamic cavitation technology]. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, no. 12(4), pp. 460-467. (In Russian).

7. Kulagin V.A., Sapozhnikova E.S., Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Zheng Ch.-I., Li Ts., Lee F.-Ch., 2017. *Osobennosti vliyaniya effektiv kavitatsii na fiziko-khimicheskie svoystva vody i stokov* [Features of influence of cavitation effects on the physical and chemical properties of water and wastewater]. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, no. 5, pp. 605-614. (In Russian).

8. Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Sapozhnikova E.S., 2018. *Sovremennyye komponenty tekhnologicheskikh skhem ochistki stochnykh vod s ispol'zovaniem kavitatsionnoy tekhnologii* [Modern layouts of technological schemes for sewage purification using impulse cavitation technology]. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, no. 2, pp. 217-223. (In Russian).

9. Yarmarkin D.A., Prokhas'ko L.S., Mazaev A.N., Asenova B.K., Zinina O.V., Zalilov R.V., 2014. *Kavitatsionnyye tekhnologii v pishchevoy promyshlennosti* [Cavitation technologies in food industry]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], no. 8(67), pp. 312-315. (In Russian).

10. Prokhas'ko L.S., Zalilov R.V., Zinina O.V., Asenova B.K., 2016. *Raschet parametrov kavitatsionnogo ustroystva dlya zhidkikh pishchevykh sred* [Calculation of the hydrodynamic cavitation device parameters for liquid food environments]. *APK Rossii* [Agro-Industrial Complex of Russia], no. 1, pp. 96-104. (In Russian).

11. Petrakov A.D., Radchenkov S.M., 2014. *Kavitatsionnyy sposob obezzarazhivaniya zhidkogo navoza i pometa i tekhnologicheskaya liniya dlya bezotkhodnogo prigotovleniya organomineral'nykh udobreniy* [Cavitation Method for Disinfection of Liquid and Poultry Manure and Technological Line for Waste-free Preparation of Organic Fertilizers]. Patent RF, no. 2527851. (In Russian).

12. *Bezotkhodnaya tekhnologiya obezzarazhivaniya i pererabotki navozov i stokov* [Waste-free technology for disinfection and processing of manure and wastewater], available: <https://kavut.ru/wasteless-technology-decontamination/> [accessed 10.03.2021]. (In Russian).

13. Kostenko M.Yu., Naumov K.S., Byshov N.V., Borychev S.N., Rembalovich G.K., Polishchuk S.D., Beznosyuk R.V., Churilov D.G., Tumakov S.N., 2020. *Kavitatsionnyy sposob obezzarazhivaniya zhidkikh organicheskikh otkhodov i prigotovleniya organomineral'nykh udobreniy* [Cavitation Method of Disinfection of Liquid Organic Waste and Preparation of Organic Fertilizers]. Patent RF, no. 2735961. (In Russian).

14. Klimov V.Ya. *Kritika kavitatsionnoj ochistki stochnykh vod razlichnoy prirody* [Criticism of cavitation treatment of waste waters of various nature], available: https://cliff72.1c-umi.ru/realizovano/kritika_kavitacionnoj_ochistki_stochnykh_vod_razlichnoj_prirody/ [accessed 10.03.2021]. (In Russian).

15. Gogate P.R., 2007. Application of cavitational reactors for water disinfection: current status and path forward. *Journal of Environmental Management*, Dec., vol. 85, iss. 4, pp. 801-815, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.07.001>.

16. Jyoti K.K., Pandit A.B., 2003. Hybrid cavitation methods for water disinfection: simultaneous use of chemicals with cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 10, iss. 4-5, pp. 255-264, [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(03\)00095-6](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(03)00095-6).

17. Kovalchuk A.N., Kovalchuk N.M., Kuzin V.A., 2015. *Razvitie effekta pasterizatsii pri obezzarazhivanii navoza metodom kavitatsii* [Development of the effect of pasteurization in the disinfection of manure by the cavitation method]. *Epokha nauki* [Epoch of Science], no. 4, p. 40. (In Russian).

18. *Obezzarazhivanie* [Disinfection], available: <https://dewa.tech/applications/obezzarazhivanie/> [accessed 10.03.2021]. (In Russian).

19. Petryakova O.D., Gudach M.V., 2011. *Otsenka preimushchestv kavitatsionnogo obezzarazhivaniya i razrabotka kavitatsionnogo ustroystva novogo tipa* [Assessment of the advantages of cavitation disinfection and development of a new type of cavitation device]. *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V. N. Tatishcheva* [Bull. of Volzhskiy University named after V.N. Tatishchev], no. 12, pp. 163-168. (In Russian).

20. Bagal M.V., Gogate P.R., 2014. Wastewater treatment using hybrid treatment schemes based on cavitation and Fenton chemistry: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 21, iss. 1, pp. 1-14, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.07.009>.

21. Balasundaram B., Harrison S.T.L., 2008. Study of physical and biological factors involved in the disruption of *E. coli* by hydrodynamic cavitation. *Biotechnology Progress Journal*, available: <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1021/bp0502173> [accessed 10.03.2021], <https://doi.org/10.1021/bp0502173>.

22. Balasundaram B., Harrison S.T.L., 2006. Disruption of Brewers' yeast by hydrodynamic cavitation: Process variables and their influence on selective release. *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 94(2), pp. 303-311, <https://doi.org/10.1021/bp0502173>.

23. Balasundaram B., Pandit A.B., 2001. Selective release of invertase by hydrodynamic cavitation. *Biochemical Engineering Journal*, vol. 8, pp. 251-256, [https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(01\)00114-0](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(01)00114-0).

24. Zupanc M., Kosjek T., Petkovšek M., Dular M., Kompare B., Širok B., Stražar M., Heath E., 2014. Shear-induced hydrodynamic cavitation as a tool for pharmaceutical micropollutants removal from urban wastewater. *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 21, pp. 1213-1221, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.10.025>.

25. Zupanc M., Kosjek T., Petkovšek M., Dular M., Kompare B., Širok B., Blažeka Ž., Heath E., 2013. Removal of pharmaceuticals from wastewater by biological processes, hydrodynamic cavitation and UV treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, no. 20, pp. 1104-1112, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.12.003>.

26. Li W.-X., Tang Ch.-D., Wu Zh.-L., Wang W.-M., Zhang Y.-F., Zhao Y., Cravotto G., 2015. Eutrophic water purification efficiency using a combination of hydrodynamic cavitation and ozonation on a pilot scale. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 22, pp. 6298-6307, <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3889-1>.

27. Čehovin M., Medic A., Scheideler J., Mielcke J., Ried A., Kompare B., Žgajnar Gotvajn A., 2017. Hydrodynamic cavitation in combination with the ozone, hydrogen peroxide and the UV-based advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter from drinking water. *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 37, pp. 394-404, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.01.036>.

Экология и водное хозяйство. 2021. Т. 3, № 2. С. 61–74.
Ecology and water management. 2021. Vol. 3, no. 2. P. 61–74.

Информация об авторах

Е. В. Комарова – аспирант, младший научный сотрудник;
А. В. Слабунова – старший научный сотрудник, кандидат технических наук;
С. Е. Харитонов – аспирант-заочник.

Information about the authors

E. V. Komarova – Postgraduate Student, Junior Researcher;
A. V. Slabunova – Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences;
S. E. Haritonov – Postgraduate Student.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.04.2021; одобрена после рецензирования 18.05.2021; принята к публикации 25.05.2021.

The article was submitted 15.04.2021; approved after reviewing 18.05.2021; accepted for publication 25.05.2021.