



DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-4-400-408

EDN: NEHIJZ

УДК 628.2:626.8

Научная статья / Research article

Экологизация обработки природных вод, содержащих растворенные органические вещества

Т.Ю. Попова, В.Л. Головин, В.Н. Волкова  *Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация* vladavibi@bk.ru

Аннотация. Представлен опыт эксплуатации водоочистных комплексов, проведен анализ опасных последствий предварительного хлорирования при обесцвечивании природных вод, рассмотрены механизмы воздействия хлорсодержащих компонентов на органические примеси, содержащиеся в неочищенной воде. Определена необходимость предварительной обработки воды до предхлорирования, обеспечивающей обязательную деструкцию комплексорганических соединений. Обоснованы принципы предварительной обработки природных вод в биологически активной среде, что позволит исключить образование токсичных веществ и патогенных микроорганизмов.

Ключевые слова: очистка воды, растворенные органические вещества, цветность, опасность бактериологического загрязнения, токсичные продукты

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

История статьи: поступила в редакцию 11.04.2024; доработана после рецензирования 15.05.2024; принята к публикации 15.08.2024.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Попова Т.Ю., Головин В.Л., Волкова В.Н. Экологизация обработки природных вод, содержащих растворенные органические вещества // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 4. С. 400–408. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-4-400-408>



Intensification of storm water treatment of wood transferring wood termination facilities

Tatyana Yu. Popova, Viktor L. Golovin, Vladislava N. Volkova  

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

 vladavibi@bk.ru

Abstract. The study presents the experience of operating water treatment plants, analyzes the dangerous consequences of pre-chlorination during the discoloration of natural waters, and examines the mechanisms of action of chlorine-containing components on organic impurities contained in untreated water. The necessity of pretreatment of water before prechlorination, which ensures the mandatory destruction of organo-complex compounds, has been determined. The principles of pretreatment of natural waters in a biologically active environment are substantiated, which will eliminate the formation of toxic substances and pathogenic microorganisms.

Keywords: water purification, dissolved organic substances, chromaticity, danger of bacteriological contamination, toxic products

Authors' contribution. All authors made an equal contribution to the preparation of the publication.

Article history: received 11.04.2024; revised 15.05.2024; accepted 15.08.2024.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Popova TYu, Golovin VL, Volkova VN. Intensification of storm water treatment of wood transferring wood termination facilities. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2024;32(4):400–408. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-4-400-408>

Введение

Мировая практика очистки высокоцветных природных вод в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения показывает, что в последние годы даже при усложнении технологий не удается в полной мере добиться достаточно полного устранения из воды опасных примесей. Одной из причин указанной проблемы оказывается недостаточный учет трансформации различных химических веществ, применяемых при водоподготовке активно взаимодействующих с растворенными органическими веществами (РОВ), часть которых определяет окрашивание воды – цветность. При этом образующиеся в процессе очистки воды токсичные вещества и бактериологические продукты часто могут быть не менее опасными, чем известные природные и антропогенные загрязнители водоемов [1; 2].

Таким образом, становится очевидным, что при использовании традиционных технологий очистки воды, в которых основой является применение химических компонентов – хлора при первичном хлорировании (предхлорировании), коагулянтов, флокулянтов и других реагентов, не в полной мере учитывается природа водных примесей, а результат взаимодействия может существенно изменить свойства воды вплоть до появления в ней токсичных веществ [3]. Следовательно, актуальной становится задача экологизации

водоподготовки как совершенствования и рационального использования технологий, отвечающих современным требованиям по обеспечению требуемого качества очищаемой воды при исключении рисков образования опасных продуктов и сохранении всех основных свойств окружающей среды.

Материалы и методы

В мировой практике водоподготовки до последнего времени для обработки высокоцветных вод, содержащих растворенные органические вещества (РОВ), преимущественно используются реагентные методы очистки с предварительным хлорированием и осветлением воды в отстойниках или осветлителях со слоем взвешенного осадка при фильтровании ее через зернистые загрузки. Однако опыт применения таких технологий показывает, что в большинстве случаев эффективность очистки оказывается крайне низкой [3; 4].

Ранее считалось, что исключение образования хлорорганических соединений в питьевой воде возможно посредством применения вместо первичного хлорирования УФ-облучения [5]. Причем отмечалось, что это решение применимо для исходной воды поверхностных источников с небольшим содержанием органических загрязнений. Такой вывод может быть основан только на предположении об угнетающем действии УФ-облучения на микробиом, присутствующий в воде, содержащей РОВ, и при отсутствии хлорреагентов хлорорганические соединения не образуются. При этом на снижение концентрации РОВ УФ-облучение оказывать влияние не может. Деструктивно влиять на сложные устойчивые РОВ могут только ферменты микроорганизмов, которые обязательно присутствуют в обрабатываемой воде. При этом численность микроорганизмов по закону толерантности Шелфорда всегда соответствует объему «пищевых продуктов» в среде. Кроме того, не следует забывать о том, что при использовании УФ-обеззараживания с определенной энергетической мощностью также существует риск формирования токсичных и мутагенных продуктов при трансформации различных соединений, присутствующих в обрабатываемой воде [5].

Предварительная дезинфекция методом озонирования продолжительное время рассматривалась вполне уместным вариантом даже при обработке природных вод, содержащих РОВ [6]. Однако, как выясняется, при этом образуются еще более токсичные, по сравнению с хлорорганикой, озонорганические соединения и не гарантируется отсутствие активных видов микроорганизмов. Следовательно, не исключена биокоррозия металлических конструкций и образование канцерогенных компонентов на основе РОВ. Механизм воздействия озона на содержащиеся в воде органические соединения видоизменяет их с образованием канцерогенных веществ, которые могут оказывать отрицательное воздействие на здоровье человека [7]. При озонировании в водопроводных разводящих трубопроводах обнаруживается также эффект интенсификации развития болезнетворных микроорганизмов, источником которого служат биоразлагаемые органические соединения [8–10]. Кроме того,

известно, что озон в обслуживании более опасный токсичный ингредиент, чем хлор, он усиливает процессы коррозии, может взрываться, требует подготовленного обслуживающего персонала и специальных мер безопасности [11–13].

Результаты и их обсуждение

Технология предварительного удаления РОВ должна в обязательном порядке включать мероприятия эффективной деструктивной обработки – активного воздействия на сложные комплексоорганические вещества, обеспечивая их элиминирование. При этом она должна быть достаточно простой и малозатратной. Таким образом, деструктивные воздействия на РОВ с целью их извлечения должны проводиться до поступления воды в очистные устройства на стадии предварительной очистки. Усиление деструкции РОВ возможно при искусственно создаваемых оптимальных условиях иммобилизации микроорганизмов в специальных устройствах – биореакторах, в которых формируется специфичный микробиом. При этом следует иметь в виду, что количественный и качественный состав микроорганизмов будет всегда формироваться и видоизменяться в соответствии с изменяющимися условиями среды – воды, содержащей РОВ.

Биореакторы можно размещать непосредственно в водохранилищах или в помещениях на территории в пределах водоочистных комплексов. Важным условием работы биореакторов является создание оптимальных условий для иммобилизованного микробиома, которые определяются хеостатным режимом. Оптимальные условия метаболической активности иммобилизованных микроорганизмов в биореакторах могут быть созданы за счет применения сетчатых носителей с развитой поверхностью, конструкция таких устройств разработана в АО ДальНИИГиМ [10]. В этих биокатализаторах обеспечивается равномерная проточность в рабочей зоне питательного субстрата – обрабатываемой воды, содержащей органику, а также самопроизвольный сброс избыточной биомассы и упрощенная регенерация насадки. Механизм расщепления комплексоорганических соединений с участием микроорганизмов достаточно сложен и, в частности, объясняется тем, что некоторые микроорганизмы для обеспечения своей жизнедеятельности используют органическую часть молекулы или энергию реакций преобразования таких соединений. Подобные микроорганизмы в ходе своего метаболизма используют для обеспечения своей жизнедеятельности органическую часть сложных соединений и при этом для разрушения молекул этих соединений – некоторые продукты метаболизма, например перекись водорода, чем существенно «экономят» энергию для обеспечения этого процесса.

Обеспечивать регулирование видового состава микробиома в биореакторах с целью снижения риска развития патогенной и потенциально патогенной микрофлоры возможно за счет введения в очищаемую воду микробиологических препаратов, включающих штаммы только непатогенных видов,

например «Эм-Био Аква», производимого в Приморском крае. Причем необходимо обеспечить их численное преимущество, что позволит подавить конкурирующие виды, представленные в том числе патогенными и потенциально патогенными микроорганизмами. Следует отметить, что биотрансформация РОВ с участием микроорганизмов проходит на молекулярном уровне и, как считается, скорость протекания таких процессов существенно (на несколько порядков) выше по сравнению с физико-химическими методами деструкции.

Предварительная обработка воды непосредственно в водохранилище [6] обладает некоторыми преимуществами, поскольку образующийся осадок остается в водохранилище и не поступает на очистные сооружения. В свободном объеме при введении микробиологических препаратов существенно замедлен процесс деструкции РОВ, что особенно заметно при низкой мутности воды и подтверждается результатами исследований на натурном объекте.

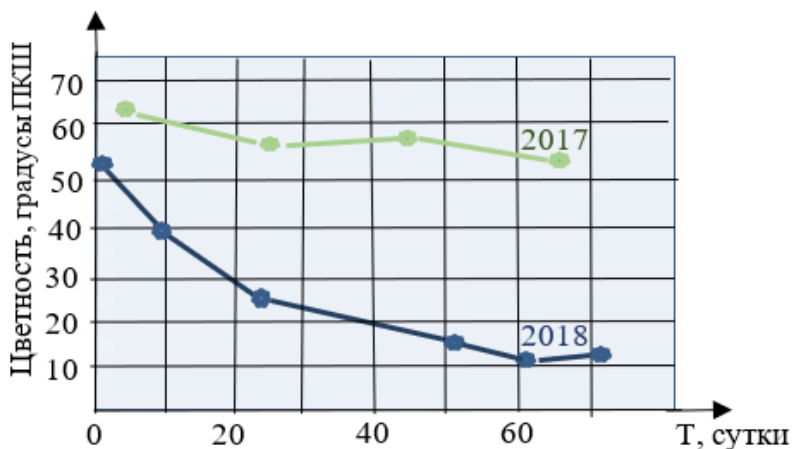
Исследования по снижению РОВ с помощью препарата «Эм-Био Аква» проводились на искусственно образованном для рекреационных целей пруду в одном из микрорайонов п. Лучегорска (Приморский край) [6; 13]. Пруд представляет собой слабопроточный водоем глубиной до 1,5 м и общим объемом до 3,2 тыс. м³. Продолжительное время в теплый период года вода в нем имела повышенную цветность в пределах 50–60 градусов ПКШ, что свидетельствовало о наличии в воде растворенной органики, при этом присутствовал запах до 4–6 баллов. Препарат «Эм-Био Аква» общим объемом до 200 л вносился однократно относительно равномерным разбрызгиванием по поверхности пруда. Одновременно в воду пруда рассредоточено вносились глиняные шаровидные окатыши (clay gall). При проводимом эксперименте в пруд было внесено 230 глиняных окатышей (около 1 окатыша на 10 м²), что примерно в 20 раз меньше установленной практикой нормы. Шаровидные окатыши – ЭМ-колотки, получаемые из глины, замешанной на микробиологическом препарате с добавлением патоки (питательный продукт), в которых интенсивно развиваются непатогенные микроорганизмы, содержащиеся в «Эм-Био Аква». При размещении глиняных окатышей в водной среде они оказываются длительно действующим источником поступления в воду микроорганизмов, способных обеспечить деструкцию РОВ.

Определение цветности после внесения препарата показало, что только после 30–60 сут цветность понизилась до 10–20 градусов ПКШ. Для сравнения приведен график цветности за тот же сезон (июль-август) 2017 г., когда препарат не вносился и цветность оставалась относительно высокой за весь теплый период года (рис.).

Результаты эксперимента доказывают, что при тщательном обосновании регламента и дозы микробиологического препарата вполне реально проводить предварительную обработку воды непосредственно в водохранилище. Следует отметить, что при существенно заниженной концентрации препарата «Эм-Био Аква» отмечена достаточно высокая эффективность снижения РОВ, даже если судить только по окрашивающим воду веществам. При этом

отмечен также и эффект дезодорации воды в пруду – за 20–30 суток уровень запаха снизился вдвое с 4–5 до 2 баллов.

Взаимодействие микроорганизмов с РОВ в пределах емкости водохранилища (в свободном объеме) обеспечивает выделение и накопление осадка в придонной его части. При этом необходимо исключить попадание в воду водохранилища патогенных бактерий и вирусов. Если донный осадок в водоеме имеет достаточно большое содержание микроорганизмов, а концентрация РОВ в воде больше, чем в осадке, то он оказывается «поставщиком» этих микроорганизмов в водную среду.



Изменение цветности воды в пруду п. Лучегорска при внесении микробиологического препарата «Эм-Био Аква»
Источник: составлено Т.Ю. Поповой.

Повлиять на состав микробиома донного осадка и сформировать в нем непатогенную микрофлору возможно, например, посредством внесения глиняных шаровидных окатышей, изготавливаемых на основе препарата «Эм-Био Аква» (ЭМ-колобков). Таким образом регулируется численность и видовой микробиологический состав донного ила и снижается риск бактериологического заражения воды патогенными видами. Причем, как показали экспериментальные исследования на ряде водоемов Приморского края, донный осадок самоуплотняется в основном за счет высвобождения связанной воды вследствие деструктивного воздействия микроорганизмов и мощность илистого слоя может снижаться в 4–6 раз.

Видовой состав микробиома и количество микроорганизмов (C_M) – биомассы, например, на единицу объема аппарата (биореактора или водохранилища) зависят от большого числа факторов, и прежде всего от питательной ценности субстрата – концентрации РОВ в воде ($C_{РОВ}$) и форм этих веществ ($A_{РОВ}$), от температуры (t), концентрации водородных ионов (pH), величины мутности воды (M), от скорости потока (V), продолжительности взаимодействия – времени контакта (T) РОВ с микробиологически активной средой. Следует также учитывать значимость объема реакторов (W_p) и их геометрии.

ческих параметров, поскольку они определяют активность смешивания продуктов и примесей, направленность потоков и режим вытеснения. Кроме того, определенное значение имеют и некоторые другие менее важные характеристики биореакторов. Значимость указанных факторов может изменяться в зависимости от типа биореакторов и условий их размещения, а механизм реакции допустимо представить функциональной зависимостью в следующем виде:

$$C_M = f \cdot (C_{\text{РОВ}}, A_{\text{РОВ}}, t, \text{pH}, M, V, T, W_p). \quad (1)$$

В теории реакторов механизм реакции обычно считается известным, поэтому применяется формальная кинетика, и несмотря на то, что в нашем случае процесс биотрансформации РОВ нельзя считать достаточно изученным, рассматривать этот процесс придется на моделях с учетом макрокинетических представлений о биохимических реакциях. При этом необходимо принимать во внимание ряд факторов, обычно в кинетике не учитываемых, принципиально связанных с протеканием реакции в объеме реактора, в частности разнопланового взаимодействия конкурирующих антагонистических видов микроорганизмов. Проведенный эксперимент позволяет установить, что в водохранилище (или в пруду) процессы проходят преимущественно в свободном объеме и при размещении на дне глиняных шаровидных окатышей непатогенные микроорганизмы постоянно поступают водоем, который работает как биореактор с прерывным режимом. Функциональная зависимость (1) и анализ результатов эксперимента позволяет сделать только предварительные выводы о том, что избранный подход в решении проблем деструкции РОВ и управления качественным составом микробиома вполне приемлем в практике водоподготовки – предварительной очистки воды.

В частности, необходимо определить основные расчетные характеристики и оптимальные дозы микробиологического препарата, необходимого для деструкции РОВ и регулирования видового состава микробиома в реакторах и водохранилищах. Как известно, нелинейность этих систем является причиной предпочтения численных методов решения. Математическое моделирование, широко применяемое в количественной микробиологии, с учетом переменных концентраций РОВ в субстрате – исходной воде и анализ с использованием систем дифференциальных уравнений дают возможность обосновать основные условия применения предлагаемой технологии предварительной обработки воды.

Заключение

При очистке природных вод, содержащих РОВ, следует учитывать важнейшие особенности, связанные с опасностью предварительного хлорирования. Такая опасность возникает по двум главным причинам. Во-первых, потому, что хлорреагенты образуют устойчивые к деструкции комплексорганические соединения. Во-вторых, встраиваясь в структуру

сложных молекул РОВ, хлорреагенты теряют свои дезинфицирующие свойства и обеззараживающий потенциал их существенно снижается. Образующиеся в процессе очистки воды токсичные и канцерогенные вещества, а также бактериологические продукты часто могут оказаться не менее опасными, чем известные природные загрязнители водоемных источников.

Присутствие в воде РОВ, представляющих собой питательную ценность для микроорганизмов, показывает активное заселение этой среды бактериями различных видов, а конкурентная борьба этих видов и мутагенные свойства микрофлоры приводят к образованию в очищаемой воде микробиоты непредсказуемого состава и степени опасности.

Применение биокатализаторов с иммобилизованными микроорганизмами для обработки природных, в частности высокоцветных, вод, содержащих РОВ, на первом этапе их очистки позволит достичь существенного экономического эффекта благодаря снижению эксплуатационных затрат. Такая предварительная обработка воды, обеспечит снижение доз коагулянта при отстаивании или осветлении, улучшит работу фильтров или осветлителей за счет повышения эффекта сорбции минерализованных загрязнителей; продлит срок службы системы подачи – распределения воды за счет снижения интенсивности либо полного прекращения процессов биокоррозии в трубопроводах, а также обеспечит улучшение органолептических свойств воды за счет отсутствия токсичных хлорорганических соединений и других ингредиентов, связанных с применением повышенных доз коагулянта.

Список литературы

- [1] *Войтов Е. Л.* Очистка маломутных природных вод с высоким содержанием органических соединений для питьевого водоснабжения: автореферат дис. ... д-ра технических наук: 05.23.04. Новосибирск, 2012. 35 с.
- [2] *Канивец У.С.* Реагентная предобработка маломутных цветных вод в технологической схеме с осветлителем со взвешенным осадком // *Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сборник материалов семинара молодых ученых XXV Международной научной конференции*, Москва, 20–22 апреля 2022 года. Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2022. С. 91–96.
- [3] *Войтов Е.Л., Сколубович Ю.Л., Рудяк В.Я., Дегтярев В.В., Чиркунов Ю.А.* Инновационная технология подготовки подземных вод для питьевого водоснабжения поселков Западной Сибири // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2023. № 7 (775). С. 105–118.
- [4] *Хецуриани Е.Д., Манюшкин Д.К., Хецуриани Т.Е., Бондаренко В.Л.* Предупреждение загрязнения воды хлорорганическими соединениями при очистке природных вод // *Научные основы создания и реализации современных технологий здоровьесбережения: материалы IX Международной научно-практической конференции*, Ростов-на-Дону, 18 ноября 2022 года / *ФГБОУ ВО «Ростовский государственный медицинский университет» Минздрава России; ФГБНУ «Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции»*. Часть 1. Волгоград: Общество с ограниченной ответственностью «СФЕРА», 2022. С. 209–213.

- [5] Кирпиченкова Е.В., Джикия И.З., Колодина Д.В., Онищенко Г.Г. Гигиеническая эффективность ультрафиолетового обеззараживания воды в централизованных системах питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения (систематический обзор) // Гигиена и санитария. 2024. Т. 103, № 2. С. 104–112. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-2-104-112>
- [6] Golovin V.L., Popova T.Y., Medved P.V., Bezborodov S.A. Treatment Features of High-Color Natural Waters // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International science and technology conference “Earth science”. 2021. Vol. 666. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042039>
- [7] Колошницын З.Н., Ушакова И.Г. Возможности включения методов биологической предочистки в технологические схемы водоподготовки сибирских рек // Каталог выпускных квалификационных работ ФГБОУ ВО Омский ГАУ: серия «Природообустройство и водопользование»: сборник работ. Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2022.
- [8] Васильев А.Л. Разработка технологий и установок для производства питьевой воды из поверхностных источников с использованием озона: дис. ... д-ра техн. наук. Специальность 05.23.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов». Нижний Новгород, 2011. 390 с.
- [9] Васильев А.Л., Тарасов А.С., Гусева Л.Д. Современные методы обеззараживания питьевой воды // Приволжский научный журнал. 2022. № 3 (63). С. 83–89.
- [10] Патент № 2161594 С2 Российская Федерация, МПК C02F 1/64, C02F 3/34. Способ очистки подземных вод от устойчивых форм железа: № 99102891/12; заявл. 15.02.1999; опубл. 10.01.2001 / Головин В. Л., Марченко А. Ю.; заявитель: Государственное предприятие «Дальневосточный научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации».
- [11] Gutjahr S., Bork J., Hahn H.J. Grundwasserfauna als Indikator für komplexe hydrogeologische Verhältnisse am westlichen Kaiserstuhl // Grundwasser. 2013. Vol. 18. P. 173–184.
- [12] Boone S., Vigo C., Boone T.J., Byrne C., Ferrario J. Per- and polyfluoroalkyl substances in source and treated drinking waters of The United States // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 653. P. 359–369. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.245>
- [13] Popova T., Golovin V., Medved P. Microbiological Treatment of High-Coloring Natural Waters // International science and technology conference “FarEastCon-2019” IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020. Vol. 753. Article no. 052042. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/753/5/052042>

Сведения об авторах:

Попова Татьяна Юрьевна, старший преподаватель, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет, Российская Федерация, 690922, г. Владивосток, о. Русский, пос. Аякс, 10. E-mail: popova.tyu@dvfu.ru

Головин Виктор Леонтьевич, кандидат технических наук, доцент, профессор, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет, Российская Федерация, 690922, г. Владивосток, о. Русский, пос. Аякс, 10. E-mail: golovin.vl@dvfu.ru

Волкова Владислава Николаевна, кандидат технических наук, старший преподаватель, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет, Российская Федерация, 690922, г. Владивосток, о. Русский, пос. Аякс, 10. ORCID: 0000-0001-9078-9858. E-mail: vladavibi@bk.ru