

Data about the author

Grechko Gennady Aleksandrovich, master in ecology and environmental management of the Institute of land reclamation, water management and construction n.a. A.N. Kostyakov.

Russian State Agricultural Academy n.a. K.A. Timiryazev

Bolshaya Akademicheskaya str. 44, 127550, Moscow, Russia.

Рецензент: Лагутина Н. В., кандидат технических наук, доцент кафедры «Общей и инженерной экологии» РГАУ-МСХА им. К.А.Тимирязева

УДК 502.628

БЕЗРЕАГЕНТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ПУТЬ ЗАЩИТЫ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ОТ МИКРОЗАГРЯЗНЕНИЙ

Зубрилов С.П., Растрыгин Н.В.

Новые химические вещества высокой токсичности, попадающие в водные объекты, требуют новых подходов к их очистке. В статье представлена краткая характеристика современного состояния основных рек России. Обозначена проблема, связанная с поступлением в окружающую среду (в том числе в водные объекты) микрозагрязнителей. Указаны основные источники этих веществ и виды воздействия отдельных из них на организм человека. Дана оценка современных технологий очистки сточных вод, обоснована необходимость их модернизации с целью предотвращения загрязнения водной среды микрозагрязнителями. При этом в качестве основного направления модернизации рассматривается внедрение безреагентных технологий обработки воды.

Ключевые слова: микрозагрязнители, кавитация, очистка, сточные воды, водные объекты.

REAGENT-FREE TECHNOLOGIES: A WAY TO PROTECT WATER OBJECTS FROM MICRO-POLLUTION

Zubrilov S.P., Rastrygin N.V.

New chemicals of high toxicity entering water bodies require new approaches to their purification. The article presents a brief description of the current state of the main rivers of Russia. The problem connected with receipt in environment (including in water objects) of micro-pollutants is designated. The main sources of these substances and the types of impact of some of them on the human body are indicated. The assessment of modern technologies of sewage treatment is given, the necessity of their modernization for the purpose of prevention of pollution of the water environment by micro-pollutants is proved. At the same time, the introduction of reagent-free water treatment technologies is considered as the main direction of modernization.

Keywords: micro-pollutants, cavitation, purification, waste water, water bodies.

Институт водных проблем РАН в рамках гранта РФФИ с 2014 г. ведет совместно с другими организациями комплексное исследование динамики экологического состояния экосистем практически всех крупных рек России, особенно, зон их устьевых участков в соответствии с Руководящим документом РД.52.24.661-2004 [23]. На основе многолетних данных государственной службы наблюдения за состоянием окружающей среды (последние 30 лет) выявлена повсеместная тенденция к сдвигу состояния рек от «естественного», «равновесного» до «кризисного» и «критического» (рис. 1) [1]. Наблюдается ухудшение водного фактора в формировании здоровья человека [1-4].

Данные исследования проводятся в соответствии с традиционным санитарно-гигиеническим подходом, основным недостатком которого является отсутствие учета комбинированного кумулятивного (синергетического) действия различных веществ. Хотя практически все методики предусматривают учет аддитивного действия веществ по ЛПВ. Но это делается только по веществам, содержание которых превышает ПДК, а этот показатель на сегодняшний день установлен лишь для малой доли известных веществ, и практически не учитывается общая нагрузка на экосистемы, характеризующаяся рассеянным загрязнением большим числом веществ находящихся в низких (на уровне фоновых

или даже следовых) концентраций, то есть так называемыми микрозагрязнителями. Действие последних можно определить понятием синдром множественной химической чувствительности [5].



Рисунки 1. Общая характеристика состояния рек России [1]

Микрозагрязнители (ксенобиотики) являются результатом бесконтрольного роста выпуска химической продукции. Они обладают канцерогенным, мутагенным, эммуно- и психотоксичным, эмбрионотоксичным действиями, вызывают поражение иммунной и эндокринной систем человека [1-4,6-8]. В качестве основных источников этих веществ (рис. 2) принято рассматривать [5]: синтетические и натуральные гормоны; металлы и пластики; лакокрасочные, клеящие материалы, промышленные химикаты; репелленты, пестициды, гербициды, фунгициды; косметические средства; нанотехнологические материалы; фармацевтические препараты; антибактериальные средства, мыла, шампуни; антипирены.

Поступление их в воду может осуществляться по двум путям: прямому и косвенному. Прямой путь подразумевает наличие организованных сбросов различных категорий вод (системы водоотведения различного назначения). Такие источники загрязняющих веществ достаточно хорошо изучены, легко контролируемы и поддаются учету. Косвенный путь связан с наличием диффузионных сбросов поверхностных и грунтовых вод и осаждением компонентов газопылевых выбросов на поверхности водных объектов. Источники, обуславливающие названный путь поступления загрязняющих веществ малоизучены, практически не контролируются, учитываются по методикам, не дающим надежных результатов.

Наибольший вклад в загрязнение водных объектов вносят городские сточные воды. Технология их очистки в большинстве случаев предполагает три блока (рис. 3) [9-13]: механическая очистка, биологическая очистка, обеззараживание.

В качестве сооружений механической очистки применяются решетки, песколовки и первичные отстойники различных типов. При этом для повышения эффективности отстаивания используют коагулянты и флокулянты, что так же обеспечивает первичную дефосфотацию. В блок биологической очистки входят различные биореакторы (аэротенки, биологические фильтры и т.д.). Здесь реализуются процессы биохимического разложения органических веществ, нитри-денитрификации и вторичной дефосфотации. Блок обеззараживания предназначен для дезинфекции очищенных сточных вод (хлорирование, озонирование, УФ-обработка). Указанные процессы и сооружения не в состоянии обеспечить необходимую степень очистки от микрозагрязнителей, так как большинство из них, находясь в

тонкодиспергированном и растворенном состояниях, являются «биологически жесткими» веществами, то есть не подвержены биохимическому разложению.



Рисунок 2. Основные источники микрозагрязнителей [5]

Кроме того, применение реагентов (коагулянтов, флокулянтов, окислителей, сорбентов и т.д.) приводит к вторичному загрязнению водных объектов, которое выражается в остаточных концентрациях этих веществ и продуктах их взаимодействия с загрязняющими веществами. Таким образом, современные технологии очистки сточных вод являются источниками микрозагрязнителей [4, 14].

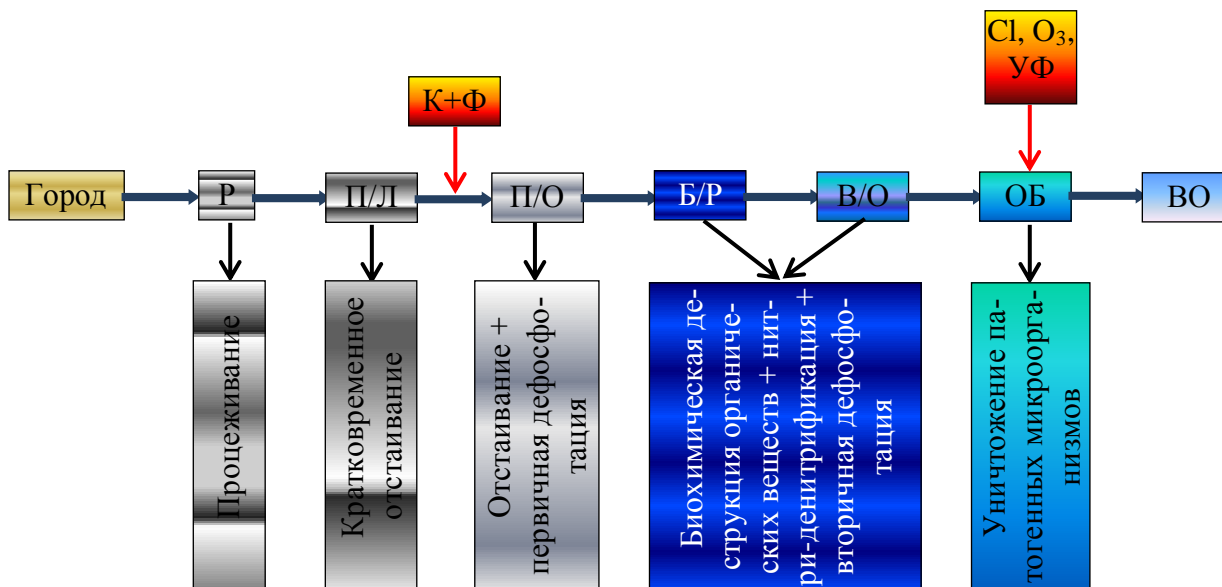


Рисунок 3. Принципиальная схема очистки городских сточных вод

Так же очистные сооружения должны обеспечивать эффект очистки по контролируемым показателям не выше установленных норм (ПДС). Что так же способствует формированию микрозагрязнителей.

Для удаления из сточных вод рассматриваемых веществ необходима многоступенчатая дорогостоящая очистка (рис. 4) [5].

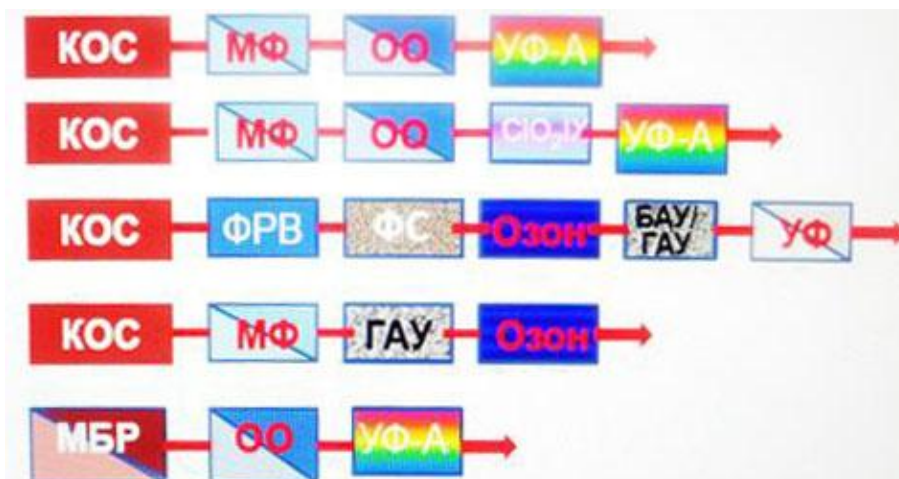


Рисунок 4. Принципиальные схемы доочистки сточных вод от микрозагрязнителей [5]

КОС – канализационные очистные сооружения; МФ – микрофльтрация; ОО – обратный осмос; УФ- ультрафиолетовое облучение; А – акустическое воздействие; СlO₂IX – хлорирование; ФРВ – флотация растворенным воздухом; ФС – фильтрование через среду; Озон – озонирование; БАУ – биологически активированный уголь; ГАУ – гранулированный активированный уголь; МБР – мембранный биореактор

Для реализации таких технологий требуются высокие финансовые затраты, на которые городские власти в настоящее время не готовы.

На наш взгляд, проблему вторичного загрязнения в процессах очистки загрязненных вод можно решить внедрением безреагентных технологий. Хотя термин «безреагентная технология» имеет широкое распространение, но четко он до сих пор не определен и соответственно имеет различные трактовки. С нашей точки зрения к таким технологиям следует относить методы обработки воды, основанные на воздействии на водные системы внешних физических полей и явлений, не допускающих применения не только реагентов в обычном понимании, но и других веществ или устройств, обеспечивающих очистку воды. Исходя из этого, нами выделены следующие группы безреагентных методов: электрообработка (электрокоагуляция, электрофлотация, электрохимическое окисление), основанная на процессе электролиза; ультразвуковая обработка (безкавитационная и кавитационная); ультрафиолетовое облучение; радиационная обработка; электрогидравлическая обработка; термическая обработка [4].

В настоящее время отсутствует единая теоретическая база рассматриваемых технологий (пожалуй, за исключением методов первой и последней групп), имеются только разрозненные теоретические проработки по результатам конкретных экспериментов. Однако даже это обстоятельство позволяет сделать ряд выводов о перспективах использования безреагентных технологий в процессах очистки загрязненных вод.

Электрообработка воды, основанная на процессах электролиза, давно широко используется для очистки загрязненных вод. Наиболее распространенными методами этой группы являются электрокоагуляция, электрофлотация и электрохимическое окисление. Названные методы достаточно хорошо изучены и широко применяются для очистки промышленных (производственных) сточных вод. Однако следует отметить их главные недостатки: высокую энергоемкость (плотность тока на электродах в среднем составляет 50–100 А/м², напряжение постоянного тока 12–36 В) и значительный расход металла электродов [11, 13].

Ультразвуковая обработка воды может осуществляться в двух режимах: безкавитационном и кавитационном. В первом случае при прохождении звуковой волны с частотой 22 кГц через слой загрязненной воды при мощности излучения около 50 Вт/см² нерастворенные частицы получают достаточно энергии для преодоления потенциального барьера, не позволяющего им сблизиться, в результате наблюдается эффект коагуляции (рис.5) [8]. Этим объясняется интенсификация процессов седиментации. Кроме того, установлено, что ультразвуковая обработка в безкавитационном режиме способствует более быстрому и эффективному перемешиванию растворов реагентов (в том числе и коагулянтов) и таким образом позволяет сократить их рабочие дозы [15].

Для обеспечения кавитационного режима ультразвуковой обработки необходимо обеспечить уровень излучаемой мощности не ниже 200 Вт/см². Как известно, кавитационные полости представляют собой парогазовые пузыри, образующиеся на «ядрах кавитации», под которыми понимаются

любые частицы нерастворенных примесей, снижающие поверхностное натяжение на границе раздела фаз «частица – вода». В процессе сжатия полости ее содержимое разогревается до температур порядка 2000–2500°K (это экспериментально подтверждено, а теоретические расчеты показывают возможность получения температуры до 10 000°K) [24]. На этом основаны процессы термической деструкции органических веществ, содержащихся в воде. Кроме того, в процессе сжатия кавитационных полостей на крупных частицах возникают кумулятивные струи, направленные в сторону этих частиц, что приводит к их диспергированию. Наблюдается также эффект дегазации воды с выделением растворенных газов в виде отдельных пузырьков, которые обеспечивают эффект флотации. В результате названных процессов происходит еще и обеззараживание воды [16–18].

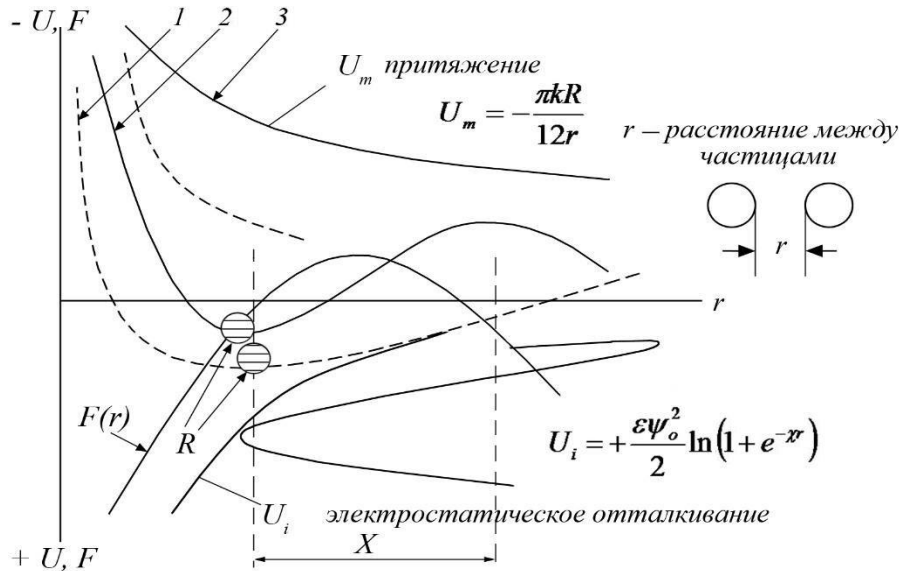


Рисунок 5. Схема взаимодействия двух частиц [4]

1 – система устойчива (имеет более высокий потенциальный барьер, но при отсутствии вторичного максимума); 2 – система имеет высокий потенциальный барьер и вторичный максимум; 3 – система неустойчива (между частицами преобладает энергия притяжения).

Таким образом, можно утверждать, что ультразвуковая обработка загрязненных вод в процессе их очистки может быть использована с целью коагулирования и флотации нерастворенных примесей, деструкции органических веществ и обеззараживания.

В качестве основных недостатков методов ультразвуковой обработки следует отметить высокие энергозатраты и недостаточную изученность воздействия ультразвука на водные системы. Немного снизить потребление энергии можно за счет использования гидродинамических устройств, например генераторов кавитации струйно-вихревого типа (с резонатором в виде двухзаходной архимедовой спирали [25] (рис. 6) [4] или с соплами [26]) или роторных аппаратов типа ГАРТ [6].

Ультрафиолетовое облучение загрязненных вод широко применяется с целью их обеззараживания, как при подготовке питьевых вод, так и при очистке сточных вод. Обработка осуществляется на частотах 260 ± 10 нм при дозах облучения 20–30 мДж/см² [4, 11, 13]. В качестве недостатков нужно отметить высокую энергоемкость и зависимость эффективности обеззараживания от прозрачности воды (расстояние между соседними лампами должно быть не более двух величин прозрачности обрабатываемой воды) [11, 13]. Повысить эффект обеззараживания воды можно путем сочетания ультрафиолетового облучения с ультразвуковой обработкой. На этом основана работа установок типа «Лазурь» [19].

Радиационное обеззараживание, основанное на воздействии проникающего ионизирующего излучения (коротковолнового рентгеновского и γ -излучения, потока высокоэнергетических заряженных частиц (электронов, протонов, дейтронов, α -частиц и ядер отдачи), а также быстрых нейтронов), т. е. радиолитиза, в последнее время становится достаточно распространенным методом обработки воды. В качестве источников излучения опробованы источники на радионуклидах (рис. 7) и электронные ускорители (рис. 8). Первичные продукты радиолитиза воды нарушают обмен веществ в бактериальной клетке [4, 20]. Применение таких методов требует строгого соблюдения мер безопасности обращения с источниками радиационного излучения и режимов обработки воды во избежание загрязнения окружающей среды и контроля уровня остаточного заражения обработанной воды.

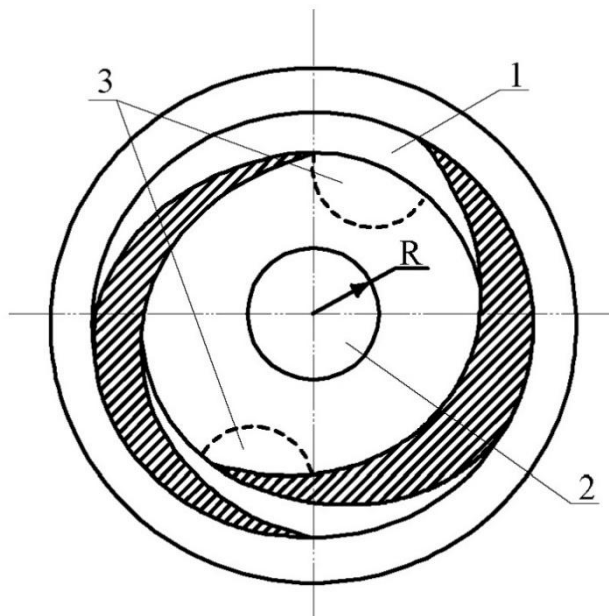


Рисунок 6. Каналы резонаторов генератора кавитации [4]

1 – направляющие; 2 – выходной патрубков; 3 – зоны кавитации.

Электрогидравлическая обработка подразумевает комбинированное воздействие на воду нескольких факторов: ультрафиолетового излучения, озонирования, импульсного электрического поля, а также различных активных частиц, в том числе и короткоживущих (атомарного кислорода, радикала OH). С этой целью электрический разряд осуществляется в водно-воздушном потоке (вода разбрызгивается в разрядной камере сверху вниз, а навстречу ей подается воздух) (рис. 9) [21]. Основным недостатком заключается в высоких энергозатратах.

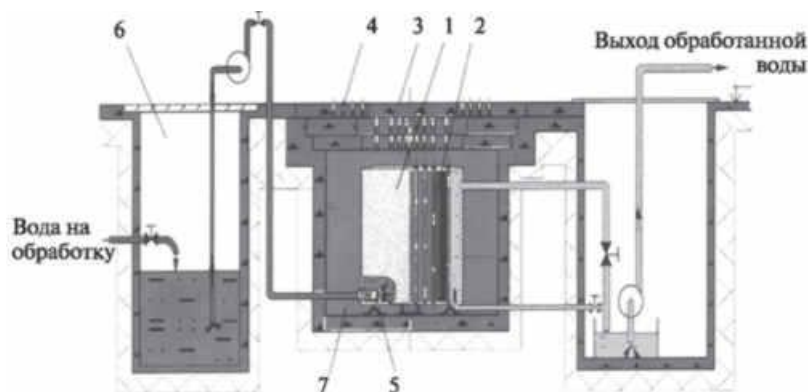


Рисунок 7. Схема модуля пилотной гамма-установки для пиковолновой обработки сточных вод на основе источников гамма-излучения с радионуклидами европия [27]

1 – реакционная камера; 2 – облучатель; 3 – защитные плиты; 4 – каналы с защитными пробками; 5 – гидроакустическое устройство; 6 – приемная емкость; 7 – камера облучения.

Термическая обработка воды может осуществляться с целью ее опреснения и обессоливания (дистилляция), удаления летучих растворенных веществ (эвапорация) и обеззараживания (нагревание воды при повышенном давлении в аппаратах типа автоклав) [11, 13]. Эти методы хорошо известны. Основным недостатком являются высокие энергозатраты.

Эффективным и перспективным методом очистки вод с заданными деструктивными свойствами, в дополнение к безреагентному, является генно-инжиниринговый. Он заключается в использовании методов рекомбинантной ДНК: соединений определенных катаболических последовательностей специфических генов, ответственных за деструкцию какого-либо звена молекулы ксенобиотика, обеспечивающего его устойчивость. Введение в гены быстрорастущих штаммов позволяет получить эффективные культуры, которые после помещения в биореакторы обеспечивают эффективную де-

токсикацию вод. Внедрение этих технологий в эти области требует знания возможных последствий, привлечения к подобным исследованиям квалифицированных специалистов (медиков, физиологов, радиологов, ботаников, зоологов и т. д.) [22].

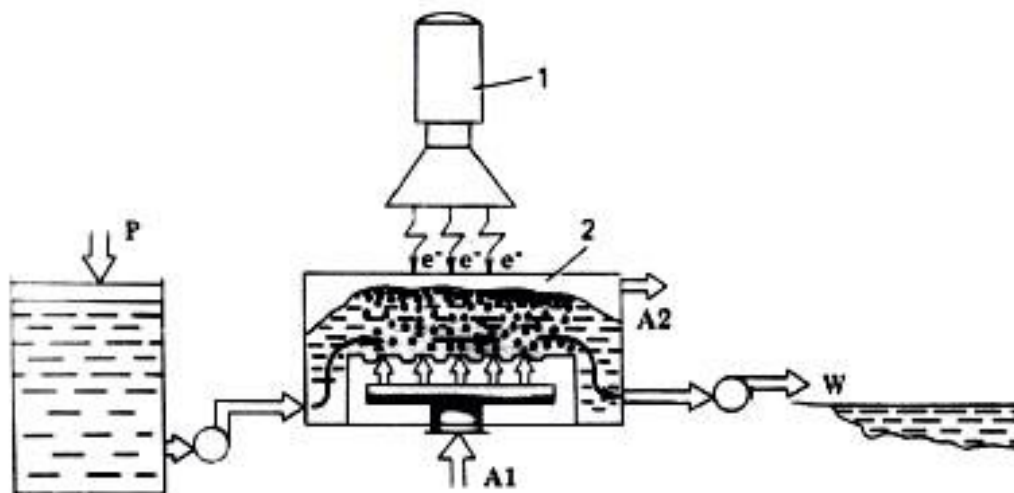


Рисунок 8. Технологическая схема радиационной обработки сточных вод с ускорителем электронов [27] 1 – ускоритель электронов; 2 – реакционная камера; P – резервуар для обрабатываемой воды; A1 – ввод озono-воздушной смеси; A2 – выход в общую вентиляцию; W – сброс обработанной воды.

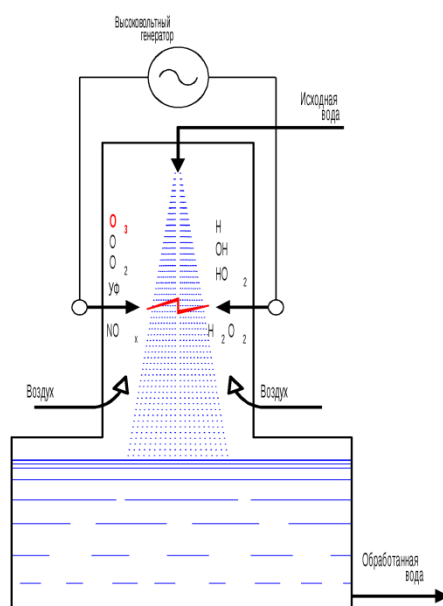


Рисунок 9. Схема электроразрядной установки [21].

На основании приведенных данных безреагентные технологии, несмотря на их основные недостатки (недостаточная изученность и высокие энергозатраты), на современном этапе развития науки и техники вполне могут составить альтернативу традиционным технологиям обработки воды, прежде всего на станциях малой производительности. Главное и неоспоримое их преимущество – отсутствие вторичного химического загрязнения.

Литература

1. Данилов-Данильян В.И. Определение новых типов ксенобиотиков с лекарственной активностью в источниках водоснабжения города Москвы / В.И. Данилов-Данильян и др. // Водоснабжение и санитарная техника. 2013. С. 17-25.
2. Баренбойм Г.М. Загрязнение природных вод лекарствами / Г.М. Баренбойм, М.А. Чиганова. - М.: Наука, 2015. – 285 с.

3. Брызгалов В.А. Изменчивость экологического состояния речных зон устьевых экосистем крупных рек России / В.А.Брызгалов, А.М. Никоноров // Вода: химия и экология. 2013. № 12.
4. Зубрилов С.П. Микрозагрязнители в питьевой воде городов. Безреагентная очистка воды: монография / С.П. Зубрилов. – СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2018. – 163 с.
5. Кискинен С. Вредное влияние фармацевтических препаратов на окружающую среду // Материалы научно-практического семинара «Влияние опасных веществ (гормонов, металлов и их соединений, органических веществ и пр.) на состояние водных объектов». ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга. - 2015.
6. Батаева А.Н. Перспективы применения низконапорной гидродинамической кавитации в процессах очистки сточных вод / А.Н. Батаева, Д.Г. Асеев, М.Р. Сизых, М.С. Хандархаева // Вода: химия и экология. 2011. № 9.
7. Технический доклад ВОЗ “Фармацевтические средства в питьевой воде”. – Женева, 2009.
8. Эльпинер Л.И. Медико-экологические аспекты современной гидрогеологии // Вода: химия и экология. 2016. № 1.
9. Отведение и очистка сточных вод Санкт-Петербурга / Коллектив авторов. – СПб.: Новый журнал, 2002. - 684 с.
10. Отведение сточных вод: пер. с нем. – СПб.: Новый журнал, 2012. - 528 с.
11. Пааль Л.Л. Справочник по очистке природных и сточных вод / Л.Л. Пааль, Я.Я. Кару, Х.А. Мельдер, Б.Н. Репин. - М.: Высшая школа, 1994. - 332 с.
12. Кульский Л.А. Справочник по свойствам, методам анализа и очистке воды: в 2 т. / Л.А. Кульский, И.Т. Гороновский, А.М. Когановский, М.А. Шевченко; [Отв. ред. А.Т. Пилипенко]. - Киев: Наукова Думка, 1980.
13. Технический справочник по обработке воды: в 2 т.: пер. с фр. – СПб.: Новый журнал, 2007.
14. Панкова Г.А. Деятельность ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» на снижение негативного воздействия на окружающую среду / Г.А. Панкова, О.Н. Врублевская, Д.В. Леонов // Журнал «Водоснабжение и санитарная техника» - 2016. - №7.
15. Багров, В.В. Возможность интенсификации окислительно-восстановительных процессов при очистке воды за счет использования эффекта кавитации. / В.В. Багров, Д.Р. Графов, А.В. Десятов, Н.Е. Кручинина, К.А. Куртербеков, Р.В. Якушин, Г.А. Нуразметов // Вода: химия и экология. 2013. № 12.
16. Десятов А.В. Исследование возможности обеззараживания воды воздействием холодной плазмы при кавитации в высокоскоростных потоках // Вода, химия и экология. 2015. № 9.
17. Растрыгин Н.В. Процессы сжатия кавитационного пузырька и термического окисления эмульгированных в воде нефтепродуктов // Экология. Охрана окружающей среды. Безопасность жизнедеятельности: Сб. научн. тр. – СПб.: СПГУВК, 1999. С 80-82.
18. Растрыгин Н.В. Пульсации кавитационных пузырьков в воде и возможные механизмы воздействия кавитационных пузырьков на эмульгированные частицы нефтепродуктов // Охрана окружающей среды. Сб. научн. тр. – СПб.: СПГУВК, 1993. С. 104-107.
19. Ульянов А.Н. Технология лазер – новый шаг в обеззараживании воды и стоков // Вода: химия и экология. 2009. № 3.
20. Пиакев А.К. Современное состояние применения ионизирующего излучения для охраны окружающей среды. I. Источники ионизирующего излучения. Очистка природной и питьевой воды. (Обзор) // Химия высоких энергий. 2000. Т. 34. № 1.-С. 3-15.
21. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л.А. Юткин. - Л.: Машиностроение, 1986. – 252 с.
22. Зубрилов С.П. Микрозагрязнители в питьевой воде городов // Вода и экология: проблемы и решения. 2018. № 3 (75). С. 9-18
23. РД 52.24.661-2004 Рекомендации. Оценка риска антропогенного воздействия приоритетных загрязняющих веществ на поверхностные воды суши / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). - М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006.
24. Растрыгин Н.В. Применение в судовой энергетической установке ультразвуковой кавитации для очистки нефтесодержащих вод: автореф. дисс. ... канд. тех. наук. СПб, 1997. 18 с.
25. Зубрилов С.П., Селиверстов В.М., Браславский М.И., Филиппов А.Н. Генератор кавитации: АС № 1236578 СССР, МКН 1983.
26. Афанасьев А.В., Варламов Г.П., Зубрилов С.П., Кардаков А.А., Кардаков В.А., Лимарь Н.Н., Липовецкий Д.С., Растрыгин Н.В. Патент № 2084681. Генератор кавитации-3, 1997.
27. Подзорова Е.А. Комбинированные радиационные методы очистки воды и сточных вод: автореф. ... дисс. докт. хим. наук. - М., 2001.

Данные об авторах:

Зубрилов Сергей Павлович, профессор кафедры химии и экологии, доктор технических наук.

e-mail: kaf_ovrb@gumrf.ru

Растрыгин Николай Васильевич, профессор кафедры химии и экологии, кандидат технических наук.

e-mail: rastryginv@gumrf.ru

*Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
Россия, 198035, Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7.*

Dana about the authors:

Zubrilov Sergey Pavlovich, Professor of the Department of chemistry and ecology, Doctor of technical Sciences, e-mail: kaf_ovrb@gumrf.ru

Rastrygin Nikolay Vasil'evich, Professor of the Department of chemistry and ecology, Candidate of technical Sciences, e-mail: RastryginNV@gumrf.ru

*Admiral Makarov state University of the sea and river fleet
Dvinskaya str., 5/7, Saint Petersburg, 198035, Russia*

Рецензент: Юрченко С.Г., профессор кафедры сельскохозяйственного строительства и экспертизы объектов недвижимости РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, кандидат технических наук, профессор.

УДК 628.357.2

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ПРИ ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОЙ
ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ПРУДА В УСЛОВИЯХ ЕГО ЗАИЛИВАНИЯ**

Плиева Т.Х., Заикина И.В., Тетдоев В.В.

При эксплуатации пруда происходит его заиливание, что резко ухудшает кислородный режим, увеличивает кислотность грунта и воды, снижает ценность водоема.

В статье на основе системного исследования определены альтернативы решения проблемы заиливания пруда и выбрана наиболее оптимальная технология очистки пруда, расположенного в Московской области, от иловых отложений. Проектируемые мероприятия в целом направлены на улучшение экологической ситуации территории.

Ключевые слова: системный анализ; системные исследования; альтернатива; пруд; технология очистки; экологическая ситуация

**USING SYSTEM ANALYSIS FOR CHOOSING THE OPTIMAL TECHNOLOGY TO CLEAN THE
POND UNDER THE CIRCUMSTANCES OF SILTING**

Plieva T.H., Zaikina I.V., Tetdov V.V.

Abstract: During the pond exploitation a process of silting is going that dramatically deteriorates oxygen conditions, increases the acidity of the soil and water, reduces the value of the pond.

On the basis of a system research in the working paper it is identified an alternative solution to the problem of siltation a pond and it is chosen the best technology of cleaning the pond, located in the Moscow region, from the silt. Projected activities are generally aimed at improving the environment area.

Keywords: system analysis; system researches; alternative, pond; cleaning technology; ecological situation.

В процессе эксплуатации прудов очень быстро происходит их загрязнение и заиливание. При накоплении донных отложений изменяются морфометрические показатели водного объекта, химические и биологические процессы в водной среде. Скорость образования, мощность, гранулометрический и химический состав донных отложений зависят от природно-антропогенных процессов, происходящих на водосборах, главным образом водно-эрозионных, а также совокупности процессов, которые происходят в самих водоёмах. В заиленных прудах нарушается кислородный режим, изменяется кислотность грунта и воды, падает его продуктивность как объекта для рыбоводства, снижается ценность водоема как рекреационного объекта [5, с. 129].

Пруд является сложной гидрозкосистемой и проблему очистки его от иловых накоплений следует рассматривать на основе системного подхода, позволяющего принять оптимальное решение. Широкое применение математических методов позволяет поднять общий уровень теоретических исследований, даёт возможность проводить их в более тесной связи с экспериментальными исследованиями [2].