

МИКРОЗАГРЯЗНИТЕЛИ В ПИТЬЕВОЙ ВОДЕ ГОРОДОВ

Зубрилов С. П.

MICROPOLLUTANTS IN CITY'S DRINKING WATER SUPPLY

Zubrilov S. P.

Аннотация

Введение: новые химические вещества высокой токсичности требуют новых подходов к их очистке. В статье представлена краткая характеристика современного состояния экосистем. 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. **Методы и материалы:** 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, в частности ультразвуковое, возбуждающее кавитацию (кавитационная обработка), и ультрафиолетовое облучения. Рассмотрен вопрос о возможности применения для очистки сточных вод от микрозагрязнителей кавитационной обработки. **Результат:** в краткой форме представлены теоретические и практические результаты многолетних исследований воздействия кавитации на водные системы. **Заключение:** приведены примеры успешного внедрения кавитационных технологий в практику очистки сточных вод. **Ключевые слова:** микрозагрязнители, кавитация, спиральная камера, очистка, сточные воды, водные объекты.

Введение

В работе [1] исследована динамика экологического состояния экосистем практически всех крупных рек России, особенно зон их устьевых участков. Исследования выполнены согласно рекомендациям по оценке риска антропогенного воздействия приоритетных загрязняющих веществ на поверхностные воды суши. Используются многолетние данные (за последние 30 лет) государственной службы наблюдения за состоянием окружающей среды (ГСМ). Отмечен повсеместный сдвиг состояния рек от «естественного», «равновесного» до «кризисного» и «критического».

С другой стороны [2], наблюдается ухудшение водного фактора на формирование здоровья

Abstract

Introduction: the article briefly describes the current state of ecosystems. The problem associated with the introduction of micro-pollutants into the environment (including water bodies) is indicated. The main sources of these substances and the types of effects of individual substances on the human body are indicated. **Methods and materials:** the estimation of modern technologies of wastewater treatment is given, the necessity of their modernization is proved with the purpose of prevention of pollution of the aquatic environment by micro-pollutants. At the same time, the introduction of non-reagent water treatment technologies, in particular ultrasonic, exciting cavitation (cavitation treatment), and ultraviolet irradiation is considered as the main direction of modernization. The issue of the possibility of cavitation treatment for sewage treatment from micro contaminants is considered. **Results:** the theoretical and practical results of long-term studies of the effect of cavitation on water systems are briefly presented. Examples of the successful introduction of cavitation technologies into the practice of wastewater treatment are given. **Conclusion:** possible future directions of the development of wastewater treatment technologies are indicated.

Keywords: micropollutants, cavitation, spiral camera, refining, wastewater, water bodies.

человека. Отмечается необходимость прекращения хлорирования в целях обеззараживания сточных вод, сбрасываемых в реки [3], сокращения поступления в водоемы азотосодержащих соединений, которые превращаются в организме человека в канцерогенные *n*-нитразоамины [4]. Следствие неконтрольного роста химической продукции — микрозагрязнители (ксенобиотики, новые загрязняющие вещества) — соединения сверхнизких концентраций, при длительном воздействии разрушающие, в частности, эндокринную систему человека (фармацевтические препараты, средства личной гигиены, следовые органические загрязнения, ксеноэстрогены, металлы, пластики антипирены, гормоны и т. д.) Это — канцерогенные, мутагенные, иммунно-

и психотоксичные, эмбрионотоксичные соединения.

В Евросоюзе выполнен комплексный анализ 10 000 микрозагрязнителей и утвержден список из 432 веществ, вызывающих поражение эндокринной системы человека и недопустимых в питьевой воде. По данным АЭС США 41 млн жителей США получают питьевую воду с ксенобиотиками.

В работах [5, 6] также отмечается повсеместное ухудшение вод рек России из-за их антропогенного загрязнения.

Методы и материалы

За последние 20 лет в 5 раз повысилась устойчивость к хлору и ультрафиолетовому обеззараживанию патогенной микрофлоры за счет мутаций. Достаточно отметить, что в США плотность УФ-потока для ультрафиолетового обеззараживания питьевой воды увеличена до 110 мДж/см² вместо 20 мДж/см², установленной санитарными нормами. Поэтому не случайным является повышенный интерес исследователей к безреагентным (физическим) методам обеззараживания сточных вод. Широкое внедрение дорогого ультрафиолетового обеззараживания воды показывает высокую эффективность этих методов. Они, в отличие от реагентных, не приводят ко вторичному загрязнению рек. В волжской воде, в очищенных стоках, от города к следующему по течению городу из-за повсеместного применения хлора увеличивается число антропогенных хлорорганических соединений, ПДК которых сложно отследить, обезвредить в процессах очистки. Кроме того, они дают вместе с пролонгированным свободным и, особенно, связным хлором целый комплекс вторичных более опасных канцерогенных токсичных хлорорганических веществ. К ним, например, относится бутилхлорид (ПДК = 0,004 мг/л). Очистка воды от бензина (ПДК = 0,1 мг/л), если бы хлор отсутствовал, была бы проще. Вынужденное насыщение хлором воды, текущей в изношенных водопроводных сетях городов, приводит к возникновению хлорорганических соединений, которые более опасны, чем хлор и органические соединения по отдельности. Например, хлорированные дифенолы, одним из которых является печально известный диоксин (ПДК = 0,00002 мг/л), хлорфенолы не задерживаются системами физико-химичес-

кой и биологической очистки. Аналогичная ситуация складывается с гипохлоритом натрия (NaOCl). Известно, что переход на гипохлорит натрия (ГХН) увеличивает образование тригалометанов, так как процесс их образования растянут до нескольких десятков часов (водородный показатель воды оказывается выше, чем при использовании молекулярного хлора).

Таким образом, побочные продукты хлорирования не соответствуют степени опасности для здоровья человека. Список крайне опасных хлорорганических соединений в питьевой водопроводной воде уже превысил 300 наименований, большинство которых в СанПиН не прописано. В таблице приведены загрязнения и вызываемые ими последствия для организма на человека.

Следует особо отметить вред, наносимый здоровью человека микробусинами и микропластиками. Первые только в США ежедневно смывается в канализацию 800 триллионов штук. Вторые, как и первые, стали хорошо известны как пища рыб, простейших, зоопланктона со всеми вытекающими последствиями для здоровья людей — участников пищевой цепи.

Технологический процесс очистки воды от микрозагрязнителей (МЗ) представляет собой сложную, многокаскадную, дорогостоящую схему (третичную доочистку после КОС, которые сейчас в РФ только 15 % всех стоков доводят до нормативно очищенных), в которой опять необходимо применять реагенты (озон, перекись водорода и т. д.), что неприемлемо в принципе. Также недостатком таких схем является неполнота очистки от МЗ, необходимость захоронения концентрата МЗ вдали от водных объектов. По составу он не менее опасен, чем радиоактивные отходы.

Результаты и обсуждение

В последнее время интенсивно исследуются кавитационные технологии [7–9].

При определенных условиях их перспективность была доказана нами еще в 1970-е годы, так как кавитация — комплекс различных воздействий, основа эффективных наукоемких технологий; широкий спектр физико-химических воздействий при кавитационной обработке воды придает этому методу универсальный характер [10]. В [23] показана экономическая предпочтительность кавитационных технологий по инте-

Ксенобиотики в косметических средствах

№ п/п	Название	Среднее количество химикатов	Наиболее опасные вещества	Возможные побочные эффекты
1	Шампунь	15	Лаурилсульфат натрия	Раздражение, поражение глаз
2	Парфюмерия	250	Бензальдегид	Раздражение горла, глаз, поражение почек
3	Лосьон	32	Метилпарабен	Сыпь, гормональные нарушения
4	Дезодорант	15	Изопропилмиристрат	Головные боли, раздражение легких, глаз, кожи
5	Лак для волос	11	Октиноксад	Аллергия, гормональные нарушения
6	Крем-основа	24	Полиметилметакрилат	Аллергия, нарушения в иммунной системе (рак)
7	Румяна	16	Этилпарабен	Сыпь, гормональные нарушения
8	Искусственный загар	22	Этилпарабен	Сыпь, гормональные нарушения
9	Губная помада	33	Полиметилметакрилат	Возможен рак
10	Тени для век	26	Полиэтилентерефталат	Бесплодие, рак
11	Лак для ногтей	31	Фталаты	Нарушаются репродуктивные функции

гральному параметру затрат при внедрении метода (кавитация — 162, ультрафиолет — 261, хлорирование — 482, озонирование — 1600).

Очевидно, что в разных кавитационных полях (у твердой стенки или в объеме жидкости, фокусируемых вихревыми ультразвуковыми генераторами кавитации, сферическими концентраторами, в объеме кипящей жидкости или в гидродинамическом потоке и т. д.) характер окислительно-восстановительных реакций, физико-химических процессов и выход продуктов реакций в результате распада молекул воды и участия примесей будет различен. Схема, предложенная в [11] по синфазному «импульсному» выходу продуктов химических реакций, является упрощенной. Она, в частности, не учитывает взаимодействия между пузырьками в фазах расширения и сжатия кавитационного поля [12]. Достаточно привести один пример. Эффекты кавитации (например, ультразвуковой при частоте 22 кГц) или в поле пульсирующего (14–80 Гц) большого деформированного пузыря (без потери и с потерей сферической симметрии) различны. Возбуждение и ионизация молекул могут осуществляться или в результате электронного удара (электрические теории эффектов при кавитации), или ударов первого рода Франка – Герца (тепловые теории).

Общая схема химических превращений (рис. 1) должна, как нам представляется, состоять из четырех основных этапов, которые проходят несколько стадий с числом промежуточных и устойчивых соединений от десятков до нескольких десятков тысяч.

Выход конечных продуктов, с учетом энергии взаимодействия, количества растворенных газов при обработке дистиллированной воды ультразвуком при частоте 22 кГц: исходные вещества в других концентрациях, а также перекись водорода, окислы азота, амины, формальдегид. При низких частотах ультразвука (например, 8 кГц) кавитационные пузырьки имеют большие размеры, чем при частоте 22 кГц с большим гидродинамическим кавитационным воздействием и меньшим химическим выходом.

На рис. 2 обобщены данные выхода продуктов химических реакций при ультразвуковой кавитационной обработке воды с равновесным газосодержанием при данных температуре и давлении. Возникает колебательная окислительно-восстановительная система, в которой при дегазации водного раствора происходит колебание содержания кислорода, расходуемого на образование перекиси водорода (заметим, что дистиллированная вода — это раствор, содержащий даже ПАВ [19]).

Перекись водорода является основой для появления азотной, а далее азотистой кислот, количество которых после нескольких часов воздействия ультразвуком имеет несколько максимумов.

Однако в некоторых последних работах слабо отражен накопленный большой опыт по кавитационным технологиям по очистке вод [11–13]. (Есть редкие исключения, например [20–22].) Не решен главный вопрос — создание износостойкого устройства большой производительности, совмещающего гидродинамическую и акустическую кавитацию без генераторов УЗГ.

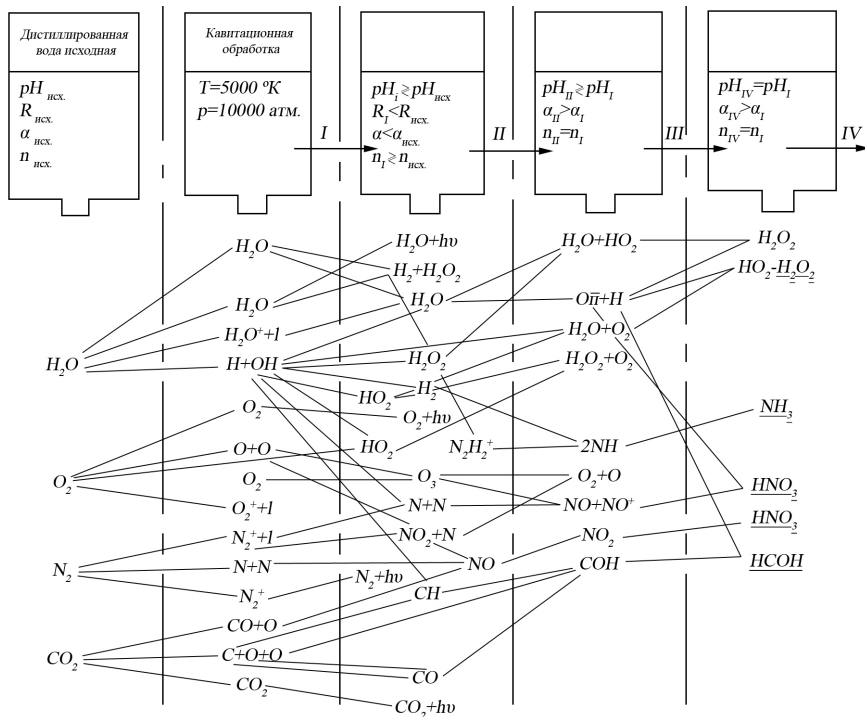


Рис.1. Схема химических превращений в воде под действием кавитации

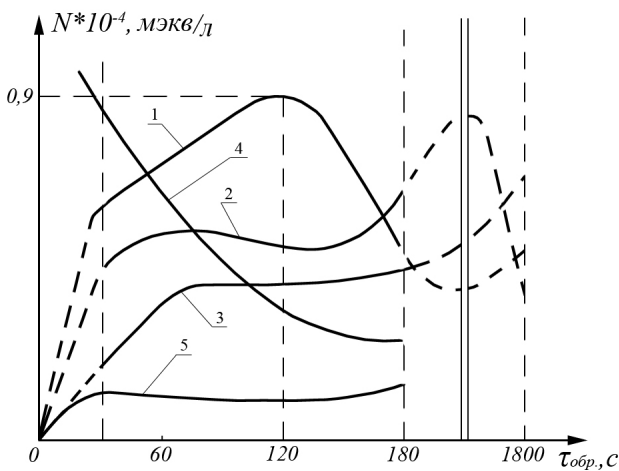


Рис. 2. Изменение содержания основных примесей в воде при кавитационной ультразвуковой обработке с разной продолжительностью: 1 — H_2O_2 ; 2 — HNO_2 ; 3 — HNO_3 ; 4 — HCO_3^- , CO_2 , N_2 ; 5 — O_2

Одно из возможных решений по промышленному внедрению кавитационных технологий для очистки сточных вод — это использование гидродинамических установок вихревого типа [14]. В них обеспечивается ультразвуковая (22 кГц) кавитация и сохранность рабочих поверхностей генераторов кавитации за счет соответствующей

организации обтекания спиральной камеры, обеспечивающей перемещение кавитационной зоны от стенок устройства (рис. 3) [15, 16]. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Как известно, существуют два основных принципа звукообразования в жидкости: неустойчивое состояние упругих границ, ограничивающих поток жидкости, и неустойчивость стационарного течения жидкости при неподвижных твердых границах потока. На использовании первого принципа основаны конструкции известных прототипов различных жидкостных свистков с упругими пластинами. К недостаткам этих аппаратов относится кавитационное разрушение упругих пластин.

Второй принцип получения ультразвуковых колебаний в жидкости применяется редко из-за сложностей, связанных с явлением неустановившегося гидродинамического течения и соответствующим расчетом параметров такого гидродинамического генератора, теоретические основы работы которого до сих пор окончательно не установлены. Исходные данные и результаты выводов, полученные при рассмотрении математической модели звукообразования в жидко-

стях вследствие нестационарности ее течения, следующие.

Звук в нестационарном гидродинамическом потоке подразделяется на истинный и псевдозвук. Звуковые колебания, возникающие вследствие сжимаемости жидкости, называют истинным звуком, а нестационарные гидродинамические пульсации давления в потоке относят к псевдозвуку.

Характерным примером псевдозвуковых колебаний является дорожка Кармана — периодическая цепочка вихрей, сходящих с обтекаемого тела. Для неподвижного наблюдателя гидродинамические пульсации давления в потоке от такой цепочки вихрей могут рассматриваться как звуковые. Псевдозвуковые колебания могут существовать в несжимаемой жидкости и являются первопричиной возникновения истинного звука. Такой подход при изучении звуковых колебаний в жидкостях и газах с неподвижными твердыми границами позволяет описать гидродинамическое и звуковое поля в рамках идеальной несжимаемой и сжимаемой (соответственно) жидкости и газа.

В общем случае гидродинамика вихревой камеры смесителя или генератора должна изучаться в рамках модели вязкой несжимаемой жидкости, математическим описанием которой в первом приближении является уравнение Навье — Стокса. В модели Навье — Стокса вихреобразование может происходить лишь на твердых границах течения, а затем диффундировать в поток. При больших числах Рейнольдса ($Re = wd/\nu$, где d — характерный геометрический размер; w — геометрический размер; ν — скорость) этот процесс происходит в тонком пограничном слое, за пределами которого течение может приниматься безвихревым либо вихревым, но с определенным заданным распределением вихрей.

Несмотря на то что в моделях невязкой жидкости исключается возможность генерации завихренности, они удовлетворительно описывают течения с заданным распределением вихрей. Это распределение вихрей обычно постулируется исходя из интегральных свойств течения. Такие течения рассчитываются на основе решения уравнений движения жидкости в форме Эйлера в заданной области течения, ограниченной твердыми стенками в случае безотрывных течений или твердыми и свободными границами в случае отрывных течений.

Проточная часть вихревой камеры гидродинамического генератора ультразвука (рис. 3) состоит из неподвижных элементов: входного и выходного устройств, направляющего аппарата. Течение идеальной жидкости в проточной части гидродинамического генератора формируется из трех потоков: потенциального с расходом Q , циркуляционного, возникающего вследствие циркуляции Γ вокруг лопаток направляющего аппарата, вихревого с угловой скоростью ν , образующегося вблизи оси вихревой камеры.

В рассматриваемых моделях кинетическая энергия потока переходит в энергию вихревого движения.

В реальном потоке жидкости вихревое движение возникает в пограничных слоях на поверхностях вихревой камеры и лопаток направляющего аппарата, которые сносятся в поток, причем с острых задних кромок направляющего аппарата вихри сходят поочередно с нагнетающей и подсасывающей поверхностей лопатки, образуя чередующуюся по направлению вращения цепочку вихрей. Этот процесс приводит к пульсациям давления в потоке и является первопричиной возникновения ультразвуковых колебаний.

В результате рассмотрения математической модели гидродинамики вихревой камеры генератора ультразвуковых колебаний установлено, что вдоль струи жидкости в вихревой камере продольные ультразвуковые колебания распространяются без затухания. Для описания таких колебаний применима модель сжимаемой жидкости без учета теплопроводности и вязкости.

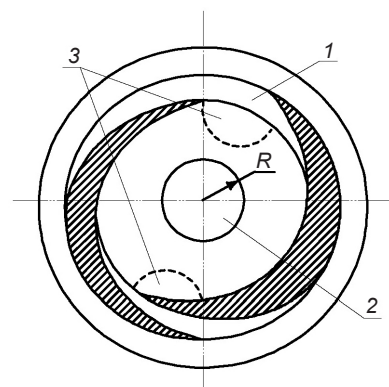


Рис. 3. Каналы резонаторов смесителя: 1 — направляющие; 2 — выходной патрубок; 3 — зоны кавитации

Однако вязкость играет принципиальную роль в процессе возникновения параллельных течений, разделяемых вихревой пеленой. В этом случае вектор плотности потока энергии уже не совпадает с направлением скорости. Так, вблизи твердых стенок вектор плотности потока диссипируемой энергии перпендикулярен скорости. Поэтому при анализе течений, содержащих вихревые зоны, необходимо, как и в случае гидродинамического течения, принимать некоторые допущения.

Обычно принимают постулаты Чаплыгина и Жуковского о плавном безотрывном обтекании задних кромок профилей и плавном безударном натекании на переднюю кромку профиля. Тогда в зоне вихревого течения, расположенной у оси вихревой камеры, создаются условия для возникновения поперечной акустической волны.

Для возникновения устойчивых ультразвуковых колебаний из незначительных по интенсивности пульсаций давления нестационарного гидродинамического потока необходима обратная связь между струями. Максимальные пульсации давления, как известно, наблюдаются у острых кромок направляющего аппарата вихревой камеры. Для создания усилия необходима обратная связь. В гидродинамическом генераторе она осуществляется через боковую поверхность струи, являющейся проводником ультразвука. При этом если струя имеет длину порядка длины волны ультразвука, то происходит усиление ультразвуковой волны. Длина волны связана с частотой соотношением

$$\lambda = \frac{A_0}{-f},$$

где λ — длина волны; f — частота, Гц; c_0 — скорость распространения волны, м/с.

Таким образом, в квазистационарном случае в гидродинамическом генераторе возникает стоячая ультразвуковая волна, через которую, образно говоря, прокачивается жидкость (скорость гидродинамического течения намного меньше скорости звука). Плотность потока мощности, передаваемая по каналу и расходуемая на поддержание ультразвуковых колебаний и нагревание жидкости, определяется из выражения

$$q = \frac{N}{S} = \frac{\Delta p Q}{S},$$

где Δp — перепад давления, Па; Q — расход жидкости, м³/с; S — площадь, м²; N — плотность потока.

Однако расчеты по приведенным формулам следует считать приближенными, так как при возникновении в жидкости кавитации существенно меняется структура потока: он становится двухфазовым. Возникает рассеяние волны на кавитационных пузырьках, что существенно для ультразвуковых колебаний высоких частот, поскольку образуются акустические течения и «разрыхления» жидкости, в результате чего изменяются ее плотность, сжимаемость и, следовательно, скорость распространения звука. Учет этих явлений в вихревой камере в настоящее время может быть выполнен на основе эксперимента. Однако ясно, что скорость звука будет уменьшаться, снижая тем самым частоту ультразвуковых колебаний и увеличивая коэффициент затухания.

Второй вопрос, в нашем случае, прокачка больших объемов стоков, соответствующая производительности очистных сооружений, нами была решена количеством генераторов кавитации на общем коллекторе установки. Рабочее давление (6 атмосфер) обеспечивается высоконапорным насосом.

Подробные данные о кавитационной гидродинамической установке по обработки промстоков ДСК-3 (Санкт-Петербург) приведены в [17]. Аналогичные установки были смонтированы на автопредприятии «Турист» (Санкт-Петербург), металлургическом комбинате (Череповец).

Генераторы кавитации ЛИВТ запатентованы за рубежом, успешно внедрены для улучшения качества топлив на судах [18], строительных растворов и бетонов с кавитационной обработкой воды затворения [19].

В работе [19] осуществлена идея по размещению излучателей ультразвука на стенках рабочей емкости, в которой совмещены сразу несколько технологических процессов. Эта идея успешно развита в последующих исследованиях обеззараживания питьевой воды, бытовых и промышленных стоков ультразвуком, ультрафиолетом и акустическими колебаниями. Все эти физические факторы действуют также одновременно в объеме корпуса установки (рис. 4) [10].

Энергетические затраты для очистки сточных вод не превышает 0,02 кВт·ч/м³. Предлагаемая технология применяется на объектах промышленного и сельскохозяйственного назначения, станциях водоподготовки, водохранилищах,



Рис. 4. Ультразвуковая кавитационная установка, совмещенная с ультрафиолетовой обработкой для обеззараживания питьевой воды

- пос. Федотово Вологодской области
- сточная вода
- 3600 м³/сутки
- пуск в 2008 году
- исключено дозирование хлора



Рис. 5. Пример оборудования очистных станций с применением кавитации и ультрафиолета

бассейнах в России, Великобритании, Новой Зеландии, Австралии, ЮАР, Анголе, Сингапуре и Южной Корее в течение последних восьми лет. Все бактерицидные установки экологически безопасны и сертифицированы на споры, вирусы, простейшие и бактерии (до 10⁶ ед./л). Результаты сертификационных испытаний приведены

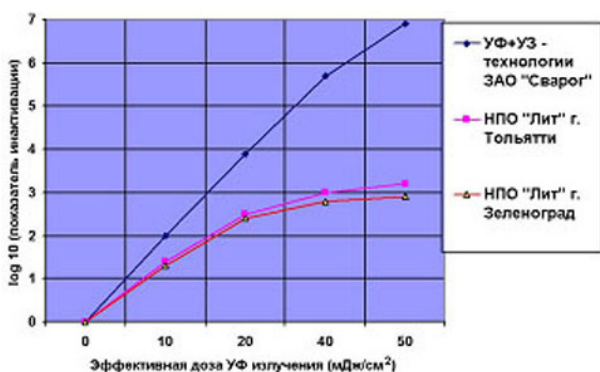


Рис. 6. Логарифм показателя инактивации E-coli кавитационно-УФ обработкой воды по сравнению с традиционной УФ-обработкой

в официальных протоколах специализированных центров, имеющих Госаккредитацию в области микробиологии. Установки прошли тестовые испытания в ЮАР, Новой Зеландии, Австралии.

На югозападных очистных сооружениях Водоканала Санкт-Петербурга проведены пробные опыты, результаты которых приведены на графиках (рис. 7, 8) [30]. На рис. 8 видно, что увеличение числа ультразвуковых излучателей с 4-х до 8-ми существенно повысило эффект обеззараживания.

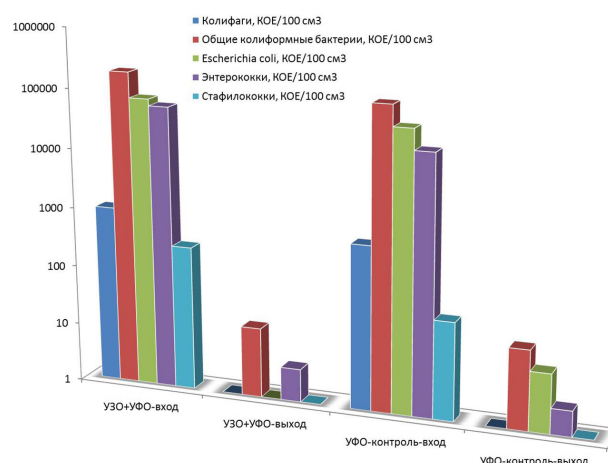


Рис. 7. Результаты микробиологических показателей при кавитационной обработке сточной воды на установке КОС-ОВ-5 на Юго-Западных очистных сооружениях Водоканала Санкт-Петербурга четырьмя магнитострикционными ультразвуковыми излучателями в проточном потоке стока

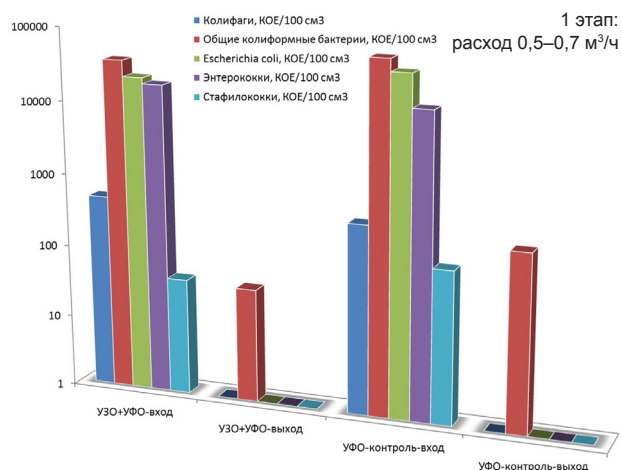


Рис. 8. Результаты микробиологических показателей при кавитационной обработке сточной воды на установке УОВ-СВ-5 на Юго-Западных очистных сооружениях Водоканала Санкт-Петербурга 8-ю магнитострикционными ультразвуковыми излучателями в проточном потоке стока

Заключение

Подведем некоторые итоги:

1. Новые химические вещества высокой токсичности требуют новых подходов по их очистке

2. Такой шанс дают безреагентные методы, которые хорошо внедряются и подробно опубликованы

3. Следует отметить, что исследования кавитационных технологий так или иначе затрагивают фундаментальные вопросы кавитации, без которых невозможно решить прикладные задачи экологии. Уровень наших знаний о кавитации существенно расширился. Фундаментальным положением продолжает оставаться возможность концентрации энергии при кавитации и на этой основе получение высокоэффективных наукоемких технологий: термоядерных кавитационных реакций, управления свойствами материалов, целенаправленного инициирования ферментативных или каталитических реакций в живых клетках, а также деструкции макромолекул и их полимеризации и т. д. Однако новые вещества (лекарства и т. д.) должны легко подвергаться утилизации и распаду, а не стать новыми МЗ.

4. Эффективным и перспективным методом очистки вод с заданными деструктивными свойствами 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 детоксикацию 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.).

Литература

1. Брызгалов, В. А., Никоноров, А. М., Решетняк, О. С. (2013). Изменчивость экологического состояния речных зон устьевых экосистем крупных рек России. *Вода: химия и экология*, № 12, сс. 15–21.
2. Росгидромет (2006). РД 52.24.661—2004. *Рекомендации по оценке риска антропогенного воздействия приоритетных загрязняющих веществ на поверхностные воды суши*. М.: Метеоагентство Росгидромета, 22 с.
3. Эльпинер, Л. И. (2009). Влияние водного фактора на формирование здоровья человека. *Вода: химия и экология*, № 3, сс. 6–10.
4. Эльпинер, Л. И. (1983). *Проблемы питьевого водоснабжения в США*. М.: Наука, 168 с.
5. Эльпинер, Л. И., Бейм, В. М. (1982). Экологические аспекты современной гигиены воды. *Водные ресурсы*, № 2, сс. 3–19.
6. Черников, Н. А., Бегунов, П. П., Дюба К. М. (2012). Еще раз к вопросу о законодательной базе в области водоснабжения и водоотведения. *Вода и экология: проблемы и решения*, № 2–3, сс. 6–12.
7. Рахманин, Ю. А. (ред.) (2011). *Итоги и перспективы научных исследований по проблемам экологии человека и гигиены окружающей среды*. М.: Центр стратегического планирования, 280 с.
8. Багров, В. В., Графов, Д. Р., Десятов, А. В. (2013). Возможность интенсификации окислительно-восстановительных процессов при очистке воды за счет использования эффекта кавитации. *Вода: химия и экология*, № 12, сс. 35–37.
9. Батоева, А. Н., Асеев, Д. Г., Сизых, М. Р., Хандархаева, М. С. (2011). Перспективы применения низконапорной гидродинамической кавитации в процессах очистки сточных вод. *Вода: химия и экология*, № 9, сс. 27–31.
10. Ульянов, А. Н. (2009). Технология «лазурь» – новый шаг в обеззараживании воды и стоков. *Вода: химия и экология*, № 3, сс. 11–15.
11. Зубрилов, С. П. (1989). *Физическая активация растворов*. Л.: Внешторгиздат, 187 с.
12. Маргулис, М. А. (1984). *Основы звукохимии: химические реакции в акустических полях*. М.: Высшая школа, 272 с.
13. Зубрилов, С. П. (2008). *Физико-химические свойства воды и прикладные аспекты гидродинамической кавитации*. СПб.: СПГУВК, 111 с.
14. Ивченко, В. М., Кулагин, В. А., Немчин, А. Ф. (1990). *Кавитационная технология*. Красноярск: КГУ, 200 с.
15. Зубрилов, С. П., Селиверстов, В. М., Браславский, М. И., Филиппов, А. Н. (1983). *Генератор кавитации*. Патент № 1233578.
16. Зубрилов, С. П. (1993). *Очистка органо-металлосодержащих сточных вод на заводах передвижными установками по безреагентным технологиям*. СПб.: СПГУВК, 78 с.
17. Растрьгин, Н. В. (1997). *Применение в судовой энергетической установке ультразвуковой кавитации для очистки нефтесодержащих вод*. Канд. техн. наук. Санкт-Петербург.
18. Зубрилов, С. П., Селиверстов, В. М., Браславский, М. И. (1989). *Ультразвуковая кавитационная обработка топлив на судах*. Л.: Судостроение, 80 с.
19. Зубрилов, С. П., Зубрилов, А. С. (1997). *Способ очистки загрязненных вод*. Патент № 2078048.
20. Сиротюк, М. Г. (1970). Стабилизация газовых пузырьков в воде. *Акустический журнал*, т. 16, вып. 2, сс. 286–290
21. Сиротюк, М. Г. (2008). *Акустическая кавитация*. М.: Наука, 271 с.

22. Кулагин, В. А. (2004). *Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации*. Д-р. техн. наук. Красноярск.

23. Криволицкий, А. С. (2007). *Повышение эффективности работы тепловых сетей за счет кавитационной обработки воды*. Канд. техн. наук. Красноярск.

24. Евстигнеев, В. В. (2012). *Совершенствование технологии кондиционирования сточных вод энергетических систем и комплексов*. Канд. техн. наук. Красноярск.

25. Шиян, Л. Н. (2004). *Химия воды и водоподготовка*. Томск: ТПУ, 72 с.

26. Всемирная организация здравоохранения (2011). *Фармацевтические средства в питьевой воде*. [online] Доступ по ссылке: http://www.who.int/water_sanitation_health/emerging/info_sheet_pharmaceuticals/ru/ [дата обращения 09.01.2018]

27. Баренбойм, Г. М., Чиганова, М. А. (2015). *Загрязнение природных вод лекарствами*. М.: Наука, 285 с.

28. Зубрилов, С. П. (2015). *Питьевая вода городов. Технологии очистки вод*. СПб.: ГУМРФ, 154 с.

29. Зубрилов, С. П., Потапов, И. О., Яковлев, А. В. (2017). *Комплексное использование водных объектов*. СПб.: ГУМРФ, 136 с.

30. Доильницын, В.А. (2017). *Комбинированный способ обеззараживания очищенных сточных вод*. В: Семинар ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» 17.04.2017, СПб, сс. 48–56

References

1. Bryzgalo, V. A., Nikonorov, A. M., Reshetnyak, O. S. (2013). *Izmenchivost' ehkologicheskogo sostoyaniya rechnyh zon ust'veykh ehkositsem krupnyh rek Rossii* [Variability of ecological state of river zones of estuarial ecological systems of big rivers of Russia]. *Voda: himiya i ehkologiya*, № 12, pp. 15–21. (in Russian).

2. Rosgidromet (2006). RD 52.24.661—2004. *Rekomendacii po ocenke riska antropogennogo vozdejstviya prioritetnyh zagryaznyayushchih veshchestv na poverhnostnye vody sushi* [Recommendations on assessing risk of human-induced impact of priority contaminants on surface waters of dry land]. М.: Meteoagenstvo Rosgidrometa, 22 p. (in Russian).

3. Elpiner, L. I. (2009). *Vliyanie vodnogo faktora na formirovanie zdorov'ya cheloveka* [Influence of aqueous factor on human health formation]. *Voda: himiya i ehkologiya*, № 3, pp. 6–10. (in Russian).

4. Elpiner, L. I. (1983). *Problemy pit'evogo vodosnabzheniya v SSHA* [Problems of potable water supply in the USA]. М.: Nauka, 168 p. (in Russian).

5. Elpiner, L. I., Bejm, V. M. (1982). *Ekologicheskie aspekty sovremennoj gigieny vody* [Environmental aspects of present-day water hygiene]. *Vodnye resursy*, № 2, pp. 3–19. (in Russian).

6. Chernikov, N. A., Begunov, P. P., Dyuba K. M. (2012) *Eshche raz k voprosu o zakonodatel'noj baze v oblasti vodosnabzheniya i vodoootvedeniya* [Revisiting regulatory framework once again in the field of water supply and water removal]. *Water and Ecology*, № 2–3, pp. 6–12. (in Russian).

7. Rahmanin, YU. A. (red.) (2011). *Itogi i perspektivy nauchnyh issledovanij po problemam ehkologii cheloveka i gigieny okruzhayushchej sredy* [Final results and prospects of scientific investigations on problems of human ecology

and hygiene of environment]. М.: Centr strategicheskogo planirovaniya, 280 p. (in Russian).

8. Bagrov, V. V., Grafov, D. R., Desyatov, A. V. (2013). *Vozmozhnost' intensifikacii okislitel'no-vostanovitel'nyh processov pri oчитске vody za schet ispol'zovaniya ehffekta kavitacii* [Possibility of intensifying oxidation and reduction processes during water treatment due to use of cavitation effect]. *Voda: himiya i ehkologiya*, № 12, pp. 35–37. (in Russian).

9. Batoeva, A. N., Aseev, D. G., Sizyh, M. R., Handarhaeva, M. S. (2011) *Perspektivy primeneniya nizkonapornoj gidrodinamicheskoy kavitacii v processah oчитskih stochnyh vod* [Prospects of using low-pressure hydrodynamic cavitation in the processes of waste water treatment]. *Voda: himiya i ehkologiya*, № 9, pp. 27–31. (in Russian).

10. Ul'yanov, A. N. (2009). *Tekhnologiya lazur' – novyj shag v obezrazhivaniy vody i stokov* [Sky-blue technology is a new step in decontamination of water and drains.]. *Voda: himiya i ehkologiya*, № 3, pp. 11–15. (in Russian).

11. Zubrilov, S. P. (1989). *Fizicheskaya aktivaciya rastvorov* [Physical activation of solutions.]. L.: Vneshtorgizdat, 187 p. (in Russian).

12. Margulis, M. A. (1984). *Osnovy zvukohimii: himicheskie reakcii v akusticheskikh polyah* [Fundamentals of sonochemistry: chemical reactions in acoustic fields]. М. Vysshaya shkola, 272 p. (in Russian).

13. Zubrilov, S. P. (2008) *Fiziko-himicheskie svoystva vody i prikladnye aspekty gidrodinamicheskoy kavitacii* [Physical and chemical properties of water and applied aspects of hydrodynamic cavitation]. SPb.: SPGUVK, 111 p. (in Russian).

14. Ivchenko, V. M., Kulagin, V. A., Nemchin, A. F. (1990). *Kavitacionnaya tekhnologiya* [Cavitation technology]. Krasnoyarsk: KGU, 200 p. (in Russian).

15. Zubrilov, S. P., Seliverstov, V. M., Braslavskij, M. I., Filippov, A. N. (1983). *Generator kavitacii* [Cavitation generator]. Patent № 1233578. (in Russian).

16. Zubrilov, S. P. (1993). *Oчитska organo-metallosoderzhashchih stochnyh vod na zavodah peredvizhnymi ustanovkami po bezreagentnym tekhnologiyam* [Treatment of organics- and metal-containing waste at the factories using mobile plants according to reagentless technologies]. SPb.: SPGUVK, 78 p. (in Russian).

17. Rastrygin, N. V. (1997). *Primenenie v sudovoj ehnergeticheskoy ustanovke ul'trazvukovoy kavitacii dlya oчитskii neftesoderzhashchih vod* [Application of ultrasound cavitation in ship power plant for treatment of petroliferous water]. kand. tekhn. nauk. Sankt-Peterburg. (in Russian).

18. Zubrilov, S. P., Seliverstov, V. M., Braslavskij, M. I. (1989). *Ul'trazvukovaya kavitacionnaya obrabotka topliv na sudah* [Ultrasound cavitation treatment of fuel at the ships]. L.: Sudostroenie, 80 p. (in Russian).

19. Zubrilov, S. P., Zubrilov, A. S. (1997). *Sposob oчитski zagryaznennyh vod* [Method of treatment of contaminated water]. Patent № 2078048. (in Russian).

20. Sirotyuk, M. G. (1970). *Stabilizaciya gazovyh puzyr'kov v vode* [Stabilization of gas bubbles in water]. *Akusticheskij zhurnal*, vol. 16, issue. 2, pp. 286-290. (in Russian).

21. Sirotyuk, M. G. (2008). *Akusticheskaya kavitaciya* [Acoustic cavitation]. М.: Nauka, 271 p. (in Russian).

22. Kulagin, V. A. (2004). *Metody i sredstva tekhnologicheskoy obrabotki mnogokomponentnyh sred s*

ispol'zovaniem ehffektov kavitacii [Methods and techniques of process treatment of multi-component media with the use of cavitation effects], d-r. tekhn. nauk. Krasnoyarsk. (in Russian).

23. Krivoluckij, A. S. (2007). *Povyshenie ehffektivnosti raboty teplovyh setej za schet kavitacionnoj obrabotki vody* [Enhancement of efficiency of heat networks functioning due to cavitation water treatment]. kand tekhn. nauk. Krasnoyarsk. (in Russian).

24. Evstigneev, V. V. (2012). *Sovershenstvovanie tekhnologii kondicionirovaniya stochnyh vod ehnergeticheskikh sistem i kompleksov* [Improvement in techniques of conditioning waste water of power-generation systems and complexes]. kand. tekhn. nauk. Krasnoyarsk. (in Russian).

25. Shiyan, L. N. (2004). *Himiya vody i vodopodgotovka* [Chemistry of water and water conditioning and purification]. Tomsk: TPU, 72 p. (in Russian).

26. Vsemirnaya organizaciya zdavoohraneniya (2011). *Farmaceuticheskie sredstva v pit'evoj vode* [Pharmaceutical means in potable water]. [online] Available at: http://www.who.int/water_sanitation_health/emerging/info_sheet_pharmaceuticals/ru/ [accessed on 09.01.2018]

27. Barenbojm, G. M., Chiganova, M. A. (2015). *Zagryaznenie prirodnyh vod lekarstvami* [Contamination of natural water with drugs]. M.: Nauka, 285 p. (in Russian).

28. Zubrilov, S. P. (2015). *Pit'evaya voda gorodov. Tekhnologii ochistki vod* [Potable water for cities. Water treatment techniques]. SPb.: GUMRF, 154 p. (in Russian).

29. Zubrilov, S. P., Potapov, I. O., Yakovlev, A. V. (2017). *Kompleksnoe ispol'zovanie vodnyh ob'ektov* [Complex use of water bodies]. SPb.: GUMRF, 136 p. (in Russian).

30. Doil'nicyn, V.A. (2017). *Kombinirovannyj sposob obezzarazhivaniya ochishchennyh stochnyh vod* [Combined method for decontamination of treated waste water]. In: Seminar of State Unitary Enterprise *Vodokanal of St. Petersburg*, 17.04.2017, 48–56 pp. (in Russian).

Автор

Зубрилов Сергей Павлович, д-р техн. наук, профессор
Государственный Университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова
E-mail: kaf_ovrb@gumrf.ru

Author

Zubrilov Sergey Pavlovich, Dr. of Engineering, professor
Federal State Budget Educational Institution Admiral
Makarov State University of maritime and inland shipping
E-mail: kaf_ovrb@gumrf.ru