

УДК 628.162

А. Л. ВАСИЛЬЕВ¹, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой водоснабжения, водоотведения, инженерной экологии и химии; **А. С. БАЛОБАНОВ^{1,2}**, аспирант, руководитель проектов

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ
ПРОЦЕССОВ КОАГУЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД В
СИСТЕМАХ ВОДОПОДГОТОВКИ**

¹ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-87; эл. почта: k_viv@nngasu.ru

²ООО «НПЦ ПромВодОчистка».

Россия, г. Н. Новгород, ул. Яблонева, д. 20, литера КК1, П1.

Тел.: (831) 262-16-01; эл. почта: info@prom-water.ru

Ключевые слова: водоподготовка, качество воды, ультразвук, коагуляция, модернизация.

В статье изложен анализ использования ультразвуковых излучателей в системах водоподготовки.

Основу воздействия ультразвука составляет явление кавитации. При распространении акустических волн низкой частоты (20–40 кГц) в жидкости возникают зоны переменного давления. В фазах разрежения образуются и растут микропузырьки газа или пара, которые затем в фазах сжатия подвергаются быстрому схлопыванию (имплозии). Этот процесс сопровождается генерацией экстремальных локальных условий: температура достигает нескольких тысяч градусов, давление – сотен атмосфер. Порождаемые при этом ударные волны и интенсивные гидродинамические микропотоки оказывают комплексное влияние на водную систему [1].

Прежде всего, происходит механическая дезинтеграция – разрушение крупных агрегатов загрязняющих веществ, хлопьев и коллоидных комплексов. Это приводит к высвобождению мелких частиц и значительному увеличению площади поверхности контакта для последующего взаимодействия с коагулянтами. Параллельно возникающие акустические течения обеспечивают эффект интенсивного микроперемешивания, интенсифицируя массообмен и распределение реагентов в объеме.

Механическая дезинтеграция частиц в воде под действием ультразвука представляет собой сложный процесс, обусловленный синергетическим воздействием ряда высокоэнергетических физических явлений, инициируемых ультразвуковой кавитацией [2].

В момент имплозии (схлопывания) микропузырьков генерируются мощные ударные волны, создающие в жидкости зоны резкого перепада давления. Эти волны оказывают на частицы и хлопья мгновенное механическое давление, превышающее прочность внутренних связей в агрегатах, что приводит к их



раскалыванию. Одновременно, в непосредственной близости от поверхностей частиц, схлопывание пузырьков становится асимметричным, порождая направленные гидродинамические микроструи со скоростью в сотни метров в секунду. Эти струи действуют как микроскопические гидравлические тараны, вызывая локальную эрозию и буквально «сбивая» фрагменты с более крупных образований.

Параллельно энергия ультразвука возбуждает в объеме жидкости интенсивные акустические течения и турбулентные микропотоки. Находясь в этих потоках, частицы испытывают значительные сдвиговые (тангенциальные) усилия, которые растягивают и разрывают рыхлые флоккулы, особенно те, что образованы полимерными мостиками или гидроксидами металлов. Дополнительным фактором является резонансное колебание самих частиц в звуковом поле, приводящее к циклическим деформациям и последующему усталостному разрушению их структуры при длительном воздействии. Эффект усиливается за счет интенсификации взаимных соударений частиц, которые в ультразвуковом поле приобретают высокую кинетическую энергию, приводящую к дробящим, а не агломерирующим столкновениям [3].

Наконец, сопутствующий кавитации локальный мгновенный нагрев создает в микрообъемах значительные тепловые напряжения из-за разного теплового расширения компонентов сложных частиц, что способствует их растрескиванию и расслоению.

Таким образом, механическая дезинтеграция – это не простой разлом, а результат комплексного воздействия, при котором ударные волны, микроструи, сдвиговые силы, резонансные колебания и соударения превращают объем обрабатываемой воды в реактор для эффективного диспергирования и разрушения агрегированных загрязнений.

С кавитацией связаны и важные физико-химические эффекты. Ударные волны способны дестабилизировать двойной электрический слой, окружающий коллоидные частицы, снижая их электростатический потенциал и предрасполагая к агломерации. В некоторых условиях при схлопывании пузырьков возможен радиоллиз воды с образованием высокореакционных гидроксильных радикалов (ОН), способствующих окислению растворенной органики. Кроме того, ультразвук может вызывать солюбилизацию органических загрязнений, переводя их из связанного, трудноудаляемого состояния в более доступную для коагуляции или окисления форму.

Совокупность описанных выше механизмов создает мощный синергетический эффект применительно к коагуляции. Предварительная или совмещенная ультразвуковая обработка исходной воды выполняет роль технологического активатора. Дезинтеграция сложных органических комплексов (например, гуминовых веществ) и дестабилизация коллоидной системы позволяют существенно снизить оптимальные дозы коагулянтов, так как уменьшается «конкуренция» за активные центры реагента и повышается эффективность его использования.

Интеграция ультразвука в процесс коагуляции реализуется как технология физико-химической активации, где ультразвуковое воздействие не заменяет, а синергетически усиливает традиционную реагентную обработку, оптимизируя ее на всех ключевых стадиях. Практическое воплощение этой интеграции может



быть выражено через последовательное или совмещенное применение ультразвука, которое коренным образом меняет ход процесса.

На этапе предварительной подготовки воды ультразвуковая обработка выполняет роль дезинтегратора и модификатора загрязнений. Мощные кавитационные микроструи и ударные волны эффективно дробят крупные органические агрегаты (например, гуминовые комплексы), коллоидные скопления и взвешенные частицы, увеличивая их удельную поверхность. Параллельно за счет физико-химических эффектов происходит частичная дестабилизация двойного электрического слоя частиц и солубилизация трудноудаляемых органических веществ. Это создает принципиально иную, более подготовленную среду для введения коагулянта: снижается «конкурентная нагрузка» на реагент, а его активные центры получают доступ к большему количеству более мелких и реакционноспособных мишеней, что позволяет существенно снизить оптимальную дозу коагулянта – на 20–40 % в зависимости от состава воды.

На стадии собственно коагуляции и хлопьеобразования интеграция может быть как последовательной, так и одновременной. При совместном воздействии акустические течения и микроперемешивание, индуцируемые ультразвуком, обеспечивают мгновенное и гомогенное распределение коагулянта в объеме, исключая локальные пере- или недодозы. Это ускоряет стадии нейтрализации заряда и образования первичных микророзродышей. Далее, в фазе агрегации, ультразвук играет парадоксальную, но управляемую роль: оптимально дозированное воздействие интенсифицирует столкновения частиц за счет гидродинамических сил, способствуя формированию хлопьев. При этом, благодаря предварительной дестабилизации, образуются более плотные и компактные хлопьевидные структуры с улучшенными седиментационными характеристиками. Важно отметить, что параметры ультразвука (мощность, время) на этой стадии должны быть тщательно подобраны, чтобы избежать обратного эффекта – разрушения уже сформировавшихся хлопьев.

Таким образом, интеграция ультразвука выражается в его многоточечном встраивании в технологическую цепочку: от предобработки сырой воды для снижения реагентопотребления, через интенсификацию смешения и дозирования, до управления морфологией и скоростью осаждения хлопьев. Технически это реализуется установкой проточных ультразвуковых реакторов-активаторов на линии подачи воды перед камерой хлопьеобразования или непосредственно в ней. В результате процесс коагуляции становится не только более экономичным, но и более управляемым, быстрым и эффективным, обеспечивая стабильно высокое качество осветления даже при колебаниях состава исходной воды.

Интенсифицированное микроперемешивание способствует более быстрому и равномерному распределению коагулянта, что ускоряет стадии нейтрализации заряда и образования микродисперсных зародышей хлопьев [4]. Последующая стадия хлопьеобразования (флокуляция) также протекает эффективнее: кавитационные микропотоки увеличивают частоту и энергию столкновений частиц, что ведет к формированию более плотных, быстрооседающих хлопьев. Это, в свою очередь, сокращает время отстаивания и улучшает характеристики осветленной воды [5].

Практические аспекты, примеры и ограничения использования ультразвука в процессах водоподготовки раскрывают его потенциал как технологического инструмента, одновременно обозначая границы его экономической и технической



целесообразности [6]. С практической точки зрения ключевыми параметрами, требующими точной настройки, являются частота, удельная энергия ($\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$), время экспозиции и конструкция реактора. Как правило, для целей интенсификации коагуляции достаточно низкочастотного диапазона (20–40 кГц) и кратковременного воздействия (от 10 секунд до 2–3 минут), что позволяет встраивать ультразвуковые модули непосредственно в потоковые линии смешения или перед камерами хлопьеобразования. Технологически это реализуется с помощью проточных реакторов, оснащенных пьезоэлектрическими или магнитострикционными излучателями (сонотродами), часто объединенными в каскад для обработки больших объемов. Важнейшим аспектом является энергоэффективность: удельные энергозатраты должны быть тщательно соотнесены с достигаемым эффектом снижения дозы коагулянта и улучшения качества очистки.

Конкретные примеры успешного применения, хотя и более распространенные в области обработки осадков, демонстрируют принципиальную работоспособность метода. Например, в ряде пилотных проектов на станциях подготовки питьевой воды предварительная ультразвуковая обработка воды с высокой цветностью и мутностью позволила снизить дозу коагулянта (например, сульфата алюминия) на 25–30 % при одновременном сокращении времени отстаивания на 15–20 % [7]. Совмещение ультразвука с введением флокулянта привело к формированию более крупных и плотных хлопьев, что улучшило показатели осаждения. Эти примеры подтверждают, что ультразвук может служить эффективным инструментом для оптимизации работы существующих очистных сооружений без их кардинальной реконструкции.

Однако внедрению метода препятствуют существенные ограничения. На первом месте стоят высокие капитальные и эксплуатационные затраты, связанные с приобретением мощных генераторов, износостойких излучателей и необходимостью значительного расхода электроэнергии, что делает экономику проекта чувствительной к тарифам [8]. Вторым серьезным барьером является сложность масштабирования и управления: эффективность сильно зависит от изменчивого состава воды – колебания pH , минерализации, концентрации и типа загрязнений требуют адаптации режимов, что усложняет автоматизацию [9]. Также существуют технологические риски: передозировка ультразвуковой энергии или неправильно выбранная частота могут привести к чрезмерной дисперсии загрязнений, что затруднит их последующую коагуляцию и ухудшит осаждаемость. Кроме того, долгосрочная надежность оборудования в условиях постоянной работы с абразивными взвесями и проблема кавитационной эрозии самих излучателей требуют дополнительных решений [8, 10].

Таким образом, практическое применение ультразвука в водоподготовке – это поиск баланса между его неоспоримым активирующим потенциалом и экономико-инженерными ограничениями. Его использование наиболее оправдано в качестве точечного решения на конкретных проблемных участках (например, при сезонном ухудшении качества сырой воды) или в комбинации с другими передовыми методами, где синергия может компенсировать высокие удельные затраты. Для широкого промышленного внедрения необходимы дальнейшие разработки в области энергоэффективных излучателей, интеллектуальных систем адаптивного контроля и накопление большего массива данных долгосрочной эксплуатации на реальных объектах.

Экспериментальные исследования, проведенные с использованием ультразвука частотой 22 кГц, подтвердили значимое улучшение ключевых показателей коагуляции при обработке поверхностных вод. Практические результаты демонстрируют, что ультразвуковое воздействие интенсивностью 3–10 Вт/см² в течение 1–5 минут в комбинированных схемах с коагулянтами позволяет сократить дозу реагентов на 50 % без ухудшения качества очистки. Наибольший синергетический эффект наблюдается при использовании с сульфатом алюминия: эффективность удаления мутности возрастает на 25–35 %, при этом остаточная мутность снижается с 17, мг/л до 2,1 мг/л против 2,8 мг/л при полной дозе коагулянта без ультразвука, а с хлоридом железа – повышает удаление мутности более чем на 30 % (рис. 1).

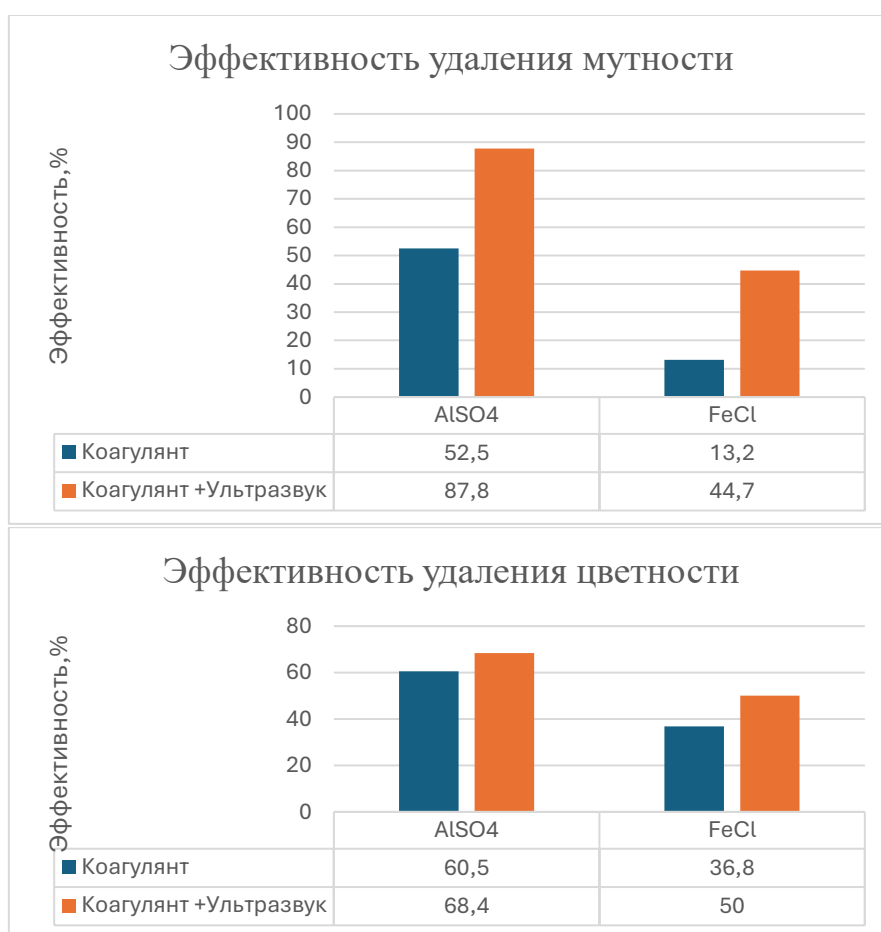


Рис. 1. Эффективность коагуляции с использованием ультразвука

Технологически значимым результатом является ускорение процесса: время начала флокуляции сокращается на 2–4 минуты, а общая продолжительность осаждения уменьшается на 20 минут. Это позволяет оптимизировать гидравлический режим очистных сооружений. Кроме того, формируются более плотные и крупные хлопья (до 2,25 мм), что улучшает их седиментационные свойства (рис. 2).

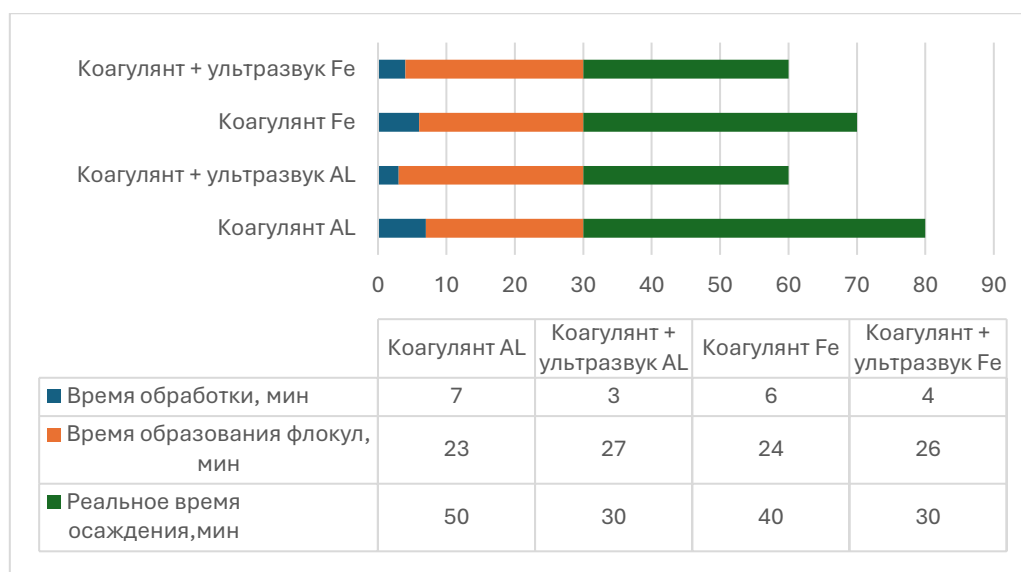


Рис. 2. Влияние ультразвукового воздействия на процесс коагулирования

Важным практическим аспектом является модификация структуры осадка: при совместном использовании ультразвука и сульфата алюминия происходит разделение фаз шлама с образованием зон свободной воды и компактных агрегатов твердой фазы. Это облегчает последующее обезвоживание осадка и сокращает объемы его утилизации (рис. 3).

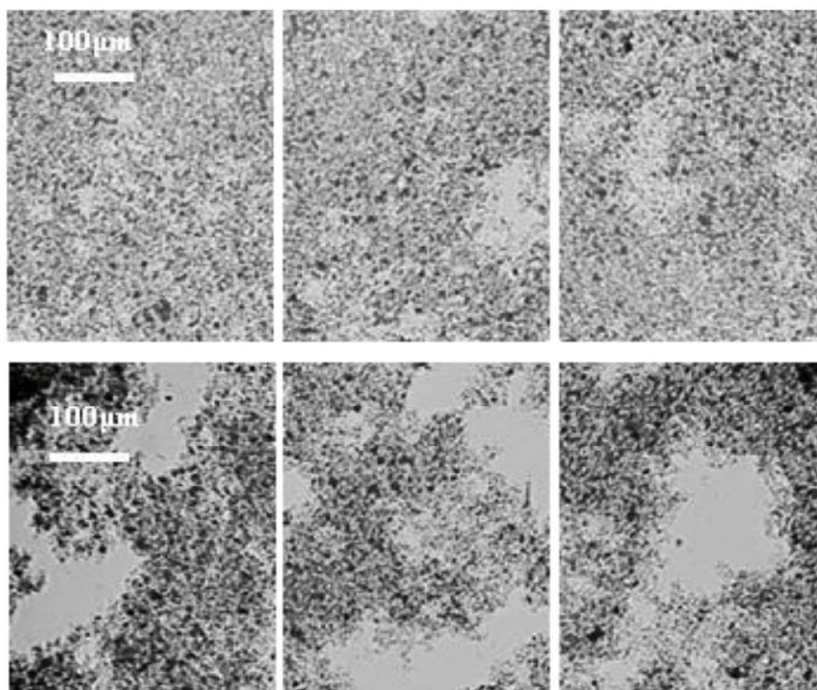


Рис. 3. Структура осадка после коагуляции сульфатом алюминия без использования ультразвука (первый ряд изображений) и с использованием ультразвука (второй ряд изображений)



В качестве основного метода использовался стандартный лабораторный тест на коагуляцию с алюминием в качестве коагулянта. Ключевым элементом была предварительная ультразвуковая обработка образцов перед добавлением коагулянта. Для оценки эффективности использовались два взаимодополняющих метода: измерение оптической плотности суспензии при длине волны 560 нм, которая имела линейную корреляцию с концентрацией клеток, и прямой микроскопический подсчет клеток. Дополнительно фиксировался показатель мутности обработанной воды.

Выводы об эффективности ультразвука для удаления мутности:

1. Высокая эффективность кратковременного воздействия: наиболее значимый вывод – для существенного улучшения последующей коагуляции достаточно крайне малого времени ультразвуковой обработки – всего 1–5 секунд. Оптимальная мощность в условиях эксперимента составила 48 Вт при частоте 22 кГц. Это указывает на то, что основной механизм – не длительное разрушение, а мгновенная дестабилизация загрязнений и потеря плавучести, что приводит к быстрому осаждению и облегчает их захват коагулянтном.

2. Синергизм с коагуляцией и снижение реагентной нагрузки: Ультразвуковая предобработка показала синергетический эффект с коагуляцией. При низких дозах коагулянта (0,4–0,8 мг/л) эффективность удаления возрастала более чем на 20 %. Для достижения целевого уровня удаления в 90 % доза коагулянта сокращалась на две трети (с 1,8 мг/л до 0,6 мг/л). Это прямое подтверждение реагентосберегающего потенциала ультразвука, что полностью согласуется с выводами из предыдущих материалов по коагуляции поверхностных вод.

3. Прямое улучшение показателя мутности: Исследование напрямую продемонстрировало, что ультразвуковая обработка значительно повышает эффективность снижения мутности в процессе коагуляции. Тренд был аналогичен удалению водорослей: наибольший прирост эффективности наблюдался при низких дозах коагулянта. Например, при дозе коагулянта 2 мг/л удаление мутности увеличилось с 42 % до 85 %.

4. Оптимальные параметры и ограничения. Определены ключевые оптимальные параметры: время 1–5 с, мощность ~ 48 Вт, (оптимальный для гидролиза солей алюминия). Частота в исследованном диапазоне (22–1320 кГц) не оказывала существенного влияния на результат. Критическим ограничением является недопустимость длительной обработки, так как это приводит к полному разрушению флоккул. Образующиеся мелкие фрагменты плохо осаждаются и могут ухудшать качество очищенной воды, что также коррелирует с выводами по обработке осадков, где чрезмерная интенсификация ультразвука ухудшала обезвоживание.

Ультразвук действует как многофакторный активатор, одновременно разрушая сложные агрегаты, усиливая массоперенос, модифицируя поверхность частиц и интенсифицируя химические реакции. Это позволяет оптимизировать традиционные методы водоподготовки (коагуляцию, флокуляцию, окисление) при снижении реагентной нагрузки и времени обработки.

Эффективность зависит от параметров УЗ (частота, мощность, время экспозиции), состава воды и конструктивных особенностей реактора. Высокие энергозатраты требуют тщательного расчета экономической целесообразности.

Ультразвуковая обработка, особенно в формате кратковременного предварительного воздействия (сонации), является высокоэффективным методом



интенсификации коагуляции для удаления мутности из поверхностных вод. Ее применение позволяет достичь глубокой очистки при значительном снижении доз реагентов, что соответствует принципам экономической эффективности и экологической безопасности. Ключом к успешному внедрению является строгое соблюдение оптимальных, научно обоснованных параметров обработки, исключающих разрушительное воздействие на загрязняющие частицы.

Ультразвуковая обработка представляет собой многофункциональный физический метод, способный существенно интенсифицировать процесс коагуляции поверхностных вод. Действуя через комплекс кавитационных, механических и физико-химических механизмов, ультразвук позволяет оптимизировать традиционную технологию, двигаясь в направлении «зеленой химии» за счет снижения реагентной нагрузки. Для успешной реализации этого потенциала необходимы дальнейшие прикладные исследования, направленные на разработку энергоэффективных аппаратных решений и создание адаптивных систем управления ультразвуковым воздействием в реальном времени в зависимости от качества исходной воды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Эффекты мощного ультразвукового воздействия на структуру и свойства наноматериалов : учебное пособие / О. Л. Хасанов, Э. С. Двилис, В. В. Полисадова, А. П. Зыкова. – Томск : ТПУ, 2009. – 148 с.
2. Маргулис, М. А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция / М. А. Маргулис. – Москва : Химия, 1986. – 285 с.
3. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В. Н. Хмелев, А. Н. Сливин, Р. В. Барсуков [и др.]. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203 с. – ISBN 978-5-9257-0187-4.
4. Мюллер, Г. В. Теория коагуляции полидисперсных систем / Г. В. Мюллер // Коагуляция коллоидов / под редакцией А. И. Рабиновича, П. С. Васильева. – Москва ; Ленинград : ОНТИ, 1936. – С. 7–40.
5. Кавитационная обработка воды. Свойства воды и эффективность обработки / Ю. М. Аверина, Н. А. Моисеева, Д. А. Шувалов [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2018. – Т. 32, № 14 (210). – С. 17–19.
6. Викулина, В. Б. Очистка воды коагуляцией под действием ультразвукового поля / В. Б. Викулина, П. Д. Викулин // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 10. – С. 116–119.
7. Васильев, А. Л. Опыт применения ультразвуковых колебаний в технологии водоподготовки / А. Л. Васильев, Е. В. Воробьева // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии : Сборник статей 79-ой всероссийской научно-технической конференции, Самара, 18–22 апреля 2022 года / под редакцией М. В. Шувалова, А. А. Пищулева, А. К. Стрелкова. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2022. – С. 538–544.
8. Хмелев, В. Н. Выявление причин снижения эффективности применения ультразвуковых аппаратов / В. Н. Хмелев, С. В. Левин, С. С. Хмелев [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. – 2014. – № 1 (5). – С. 48–50.
9. Applications of Ultrasonic Emulsification. In: Ultrasonic Production of Nano-emulsions for Bioactive Delivery in Drug and Food Applications / T.S.H. Leong, S. Manickam, G.J.O. Martin, W. Li, M. Ashokkumar. – Springer : Briefs in Molecular Science, 2018. – DOI 10.1007/978-3-319-73491-0_1.



10. Ultrasonic nano-emulsification - A review / M. Seyed, M.-G. Mohsen, G.-G. Roghayeh, M. Massoud, S. Pedram Safarpoura, Z. Majid // Ultrasonics - Sonochemistry. – 2019. – 52. – P. 88–105.

VASILEV Aleksey Lvovich¹, doctor of technical sciences, professor, holder of the chair of water supply, sewage, engineering ecology and chemistry; BALOBANOV Aleksandr Sergeevich^{1,2}, lead engineer technologist

USING ULTRASONIC TECHNOLOGY TO INTENSIFY COAGULATION PROCESSES OF SURFACE WATER IN WATER TREATMENT SYSTEMS

¹Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 430-54-87; e-mail: k_viv@nngasu.ru

²NPTs PromVodOchistka LLC.

20, Yablonevaya St., Nizhny Novgorod, Russia.

Tel.: (831) 262-16-01; e-mail: info@prom-water.ru

Key words: water treatment, water quality, ultrasound, coagulation, modernization.

This article presents an analysis of the use of ultrasonic emitters in water treatment systems.

REFERENCES

1. Khasanov O. L., Dvilis E. S., Polisadova V. V., Zykova A. P. Effekty moshchnogo ul'trazvukovogo vozdeystviya na strukturu i svoystva nanomaterialov [Effects of powerful ultrasonic exposure on the structure and properties of nanomaterials] : uchebnoe posobie [textbook]. Tomsk, TPU, 2009, 148 p.
2. Margulis M. A. Zvukhkhimicheskie reaktsii i sonoluminestsentsiya [Sonochemical reactions and sonoluminescence]. Moscow, Khimiya, 1986, 285 p.
3. Khmelev V. N., Slivin A. N., Barsukov R. V. [et al.] Primenenie ultrazvuka vysokoy intensivnosti v promyshlennosti [Application of high-intensity ultrasound in industry]. Biysk, Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta, 2010, 203 p. ISBN 978-5-9257-0187-4.
4. Myuller G. V. Teoriya koagulyatsii polidispersnykh sistem [Theory of coagulation of polydisperse systems]. Koagulyatsiya kolloidov [Coagulation of colloids]. pod redaktsiey A. I. Rabinovicha, P. S. Vasileva. Moscow ; Leningrad, ONTI, 1936, P. 7–40.
5. Averina Yu. M., Moiseeva N. A., Shuvalov D. A. [et al.] Kavitatsionnaya obrabotka vody. Svoystva vody i effektivnost obrabotki [Cavitation water treatment. Water properties and treatment efficiency]. Uspakhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii [Advances in Chemistry and Chemical Technology]. 2018, Vol. 32, № 14 (210), P. 17–19.
6. Vikulina V. B., Vikulin P. D. Ochistka vody koagulyatsiey pod deystviem ultrazvukovogo polya [Water purification by coagulation under the action of an ultrasonic field]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. 2016, № 10, P. 116–119.
7. Vasilev A. L., Vorobeva E. V. Opyt primeneniya ultrazvukovykh kolebaniy v tekhnologii vodopodgotovki [Experience in the application of ultrasonic vibrations in water treatment technology]. Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Stroitel'stvo i stroitelnye tekhnologii [Traditions and innovations in construction and architecture. Construction and construction technologies] : Sbornik statey 79-oy vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Samara, 18-22 aprelya 2022. pod redaktsiey M. V. Shuvalova, A. A. Pishchuleva,



A. K. Strelkova. Samara, Samarskiy gosudarstvenny tekhnicheskiy universitet, 2022, P. 538–544.

8. Khmelev V. N., Levin S. V., Khmelev S. S. [et al.] Vyyavlenie prichin snizheniya effektivnosti primeneniya ultrazvukovykh apparatov [Identification of the reasons for the decrease in the efficiency of using ultrasonic devices]. Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik [South Siberian Scientific Bulletin]. 2014, № 1 (5), P. 48–50.

9. Leong T.S.H., Manickam S., Martin G.J.O., Li W., Ashokkumar M. Applications of Ultrasonic Emulsification. In: Ultrasonic Production of Nano-emulsions for Bioactive Delivery in Drug and Food Applications. Springer: Briefs in Molecular Science, 2018. DOI 10.1007/978-3-319-73491-0_1.

10. Seyed M., Mohsen M.-G., Roghayeh G.-G., Massoud M., Pedram Safarpoura S., Majid Z. Ultrasonic nano-emulsification - A review. Ultrasonics - Sonochemistry. 2019. 52. P. 88–105.

© А. Л. Васильев, А. С. Балобанов, 2026

Получено: 22.04.2026 г.