

## **ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

УДК 628.161+681.3

**М. В. Коновальчик, канд. техн. наук, Д. А. Петухов, В. И. Логачев**

**Автомобильно-дорожный институт**

**ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка**

### **ПУТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ ВОДЫ БЕЗРЕАГЕНТНЫМИ МЕТОДАМИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

*Рассмотрены основные способы повышения эффективности коагуляционных процессов очистки воды с выделением наиболее значимых из них. Выполнено теоретическое и практическое обоснование применения физических полей (магнитной обработки и ультразвукового облучения) для интенсификации процесса коагуляции примесей при очистке воды. Выполнены исследования по влиянию ультразвукового облучения на интенсивность и эффективность коагуляции (осветления воды). Получены зависимости высоты слоя осветления воды от времени облучения ультразвуком соответствующей частоты.*

**Ключевые слова:** интенсификация коагуляции, физическое поле, магнитная обработка, ультразвуковое облучение, подбор частоты ультразвука, длительность облучения

#### **Постановка проблемы**

Практически во всех процессах очистки природных и сточных вод имеется необходимость удаления взвешенных веществ. Наиболее распространенным способом удаления последних являются коагуляционные методы осаждения. Наиболее распространенными коагулянтами в настоящее время являются соли алюминия и железа, которые принадлежат к группе неорганических коагулянтов. Последние являются традиционными при очистке от коллоидно-дисперсных веществ, а также обеспечивают достаточно высокую эффективность при относительно невысокой стоимости.

Коагуляционная очистка зависит от вида и дозы коагулянта, длительности осаждения, концентрации взвешенных веществ и т. д. Наиболее используемым коагулянтом является технический сульфат алюминия.

Агрегация коллоидных частичек, которые образуются в процессе гидролиза коагулянтов, происходит постепенно в течение достаточно длительного времени. Вначале в результате броуновского движения образуются агрегаты с недостаточной для выпадения из раствора массой. Это стадия скрытой коагуляции [1, 2].

При достижении предела агрегации, при котором образуются хлопья достаточно крупного размера способные оседать под действием гравитационных сил, наступает следующая стадия, т. е. седиментация.

Появлению хорошо заметных хлопьев предшествует стадия образования сверхмицеллярных структур, т. е. наблюдается возникновение рыхлой сетки, включающей большое количество дисперсионной среды (воды) [2]. Далее сетка постепенно разрывается на отдельные оседающие хлопья.

Известно, что образование указанной выше структуры зависит от солевого состава воды, а также ее pH. Увеличение концентрации хлоридов и гидрокарбонатов повышает устойчивость возникающих структур. Сульфаты, наоборот, понижают ее. В результате чего в первом случае образуются крупные рыхлые хлопья, а во втором – мелкие. На размер образующихся хлопьев и в тоже время на их структуру оказывает влияние pH воды. Так, например, образовавшиеся продукты гидролиза солей алюминия в кислой среде образуют круп-

ные, но более рыхлые хлопья, чем в щелочной, где структурные свойства определяются присутствующими в больших количествах  $\text{OH}^-$  и  $\text{HCO}_3^-$  ионами. При этом наиболее плотные и тяжелые хлопья формируются для продуктов гидролиза сульфата алюминия, в пределах рН 5,5–7,5, для продуктов гидролиза солей железа – в пределах 6–7 и 8–9,5 [2].

Изменяя водородный показатель и минеральный (солевой) состав воды, можно влиять на плотность, и в определенной степени оптимизировать условия образования и осаждения хлопьев. При этом коагулирование визуально будет происходить следующим образом. После смешения раствора коагулянта с водой в первое время никаких изменений не происходит. Затем появляется опалесценция, и вслед за этим вода мутнеет от образования огромного количества мелких хлопьев. Затем они укрупняются, и постепенно начинается процесс их осаждения. При этом всегда стремятся сократить время образования хлопьев (легкооседающих) для ускорения процесса осаждения. Данный процесс определяется частотой столкновений и сцепления между наиболее мелкими уже агрегированными «комплексами» [1]. Также необходимо отметить, что подвижность частичек зависит от температуры и перемешивания [2].

Однако Л. А. Кульским было установлено, что замедление при низкой температуре гидролиза солей-коагулянтов не может быть причиной уменьшения скорости хлопьеобразования, так как время протекания гидролиза обычно не превышает 1 мин. Также отмечается, что вероятной причиной является повышенная гидратация частичек, поэтому увеличивается их размер и уменьшается подвижность, что ведет к снижению количества столкновений. Применение перемешивания может в определенной степени это компенсировать [2].

Одними из основных свойств, которые определяют скорость и, в тоже время, полноту выделения коагулированной взвеси в осадок, при применении различных методов сепарации являются плотность и прочность хлопьев, а также их адгезионная активность.

Для нашего региона, который в данный момент времени испытывает острую необходимость в чистой воде для обеспечения населения, возникает первоочередная необходимость улучшения этих параметров, особенно при очистке вод относительно малой мутности. Обычно в практике водоочистки для этой цели применяют ряд методов, которые создают возможность улучшения технологических свойств имеющихся взвесей и ускоряют их агрегацию, т. е. интенсифицируют процесс коагулирования.

Возможные методы интенсификации обычно делятся на реагентные и безреагентные.

К реагентным относятся те, при которых вода обрабатывается дополнительными реагентами: окислителями, регуляторами величины рН воды, флокулянтами, замутнителями на минеральной основе.

Безреагентные – это методы, реализуемые без применения дополнительных реагентов: различные методы перемешивания воды; частичный возврат уже отработанного осадка; совмещение обработки воды коагулянтами с воздействием физическими полями – магнитным, электромагнитным, электрическим, а также ультразвуковым облучением.

Необходимо отметить, что использование физических воздействий (физических полей) на процесс обработки воды коагулянтами не всегда может приводить к повышению эффективности процессов. Воздействие электрического поля на дисперсную систему (которая коагулирует под влиянием электролитов) бывает трудно отличить от побочных процессов, сопровождающих электролиз (анодного растворения металла, выделения газов и т. д.) [2]. Однако воздействие электрического поля может ускорять коагуляцию дисперсных примесей воды и продуктов гидролиза коагулянтов. В поле постоянного тока ускоряются, например, процессы хлопьеобразования и осаждения коагулированной взвеси, полученной при обработке сульфатом алюминия мутных вод; повышается степень очистки воды от органических и неорганических примесей [3].

В последнее время достаточно много внимания уделяется магнитной обработке воды и удивительным эффектам, которые могут быть достигнуты ее применением в самых различных областях техники. Так, например, даже после кратковременного воздействия маг-

нитного поля в воде увеличивается скорость многих химических реакций, ускоряется кристаллизация растворенных веществ, интенсифицируются процессы адсорбции, улучшается слипание твердых частиц примесей и выпадение их в осадок [1].

Воздействие магнитного поля на воду, в конечном счете, сказывается на поведении находящихся в ней примесей, хотя до сих пор сущность этих явлений абсолютно точно не выяснена [3, 4].

При этом в настоящее время получено достаточно экспериментальных данных по магнитной обработке воды: обнаружено, что под влиянием магнитного поля происходит временная деформация гидратных оболочек ионов, изменяется их распределение в воде. Не исключено, что роль ионов при магнитной обработке воды может быть также связана с возникновением электрического тока или пульсацией давления. Однако наиболее важными являются исследования влияния магнитного поля непосредственно на структуру ассоциатов воды, которое может привести к деформации водородных связей или перераспределению молекул воды во временных ассоциативных образованиях, что также влечет за собой изменение физико-химических характеристик протекающих в ней процессов. Нужно отметить, что магнитная обработка воды оказалась весьма эффективной прежде всего при борьбе с накипью [3, 4].

Также имеется достаточно сведений, что магнитная обработка способствует выпадению неорганических солей из воды. В некоторых западных странах и России запатентованы методы опреснения морской и соленой воды, в которых значительную роль играет ее магнитная обработка.

Известно, что эффект ускорения кристаллизации и уменьшения размеров кристаллов, выпадающих из магнитной воды, используется и в совершенно других областях, например, в строительной индустрии. Так, например, затворение цемента магнитной водой не только сокращает сроки твердения, но и придает большую прочность и повышает его стойкость к агрессивным воздействиям.

При работе с мелкодисперсными частицами используется способность омагниченной воды ускорять слипание и осаждение частиц с последующим образованием крупных хлопьев, т. е. интенсифицировать коагуляционный процесс.

Омагничивание успешно применяется на некоторых водопроводных станциях (особенно при большой мутности природных вод), а также при обработке промышленных стоков, что позволяет интенсифицировать осаждение мелкодисперсных загрязнений [2, 3].

Так, например, имеются самые разнообразные данные о действии магнитных полей на структуру и свойства водно-дисперсных систем: изменяются их плотность, вязкость, поверхностное натяжение, растворимость, рН, проводимость и другие показатели. На рис. 1 показана зависимость вязкости и поверхностного натяжения воды от напряженности магнитного поля. Некоторые авторы указывают на увеличение вязкости до 10 % [2, 3].

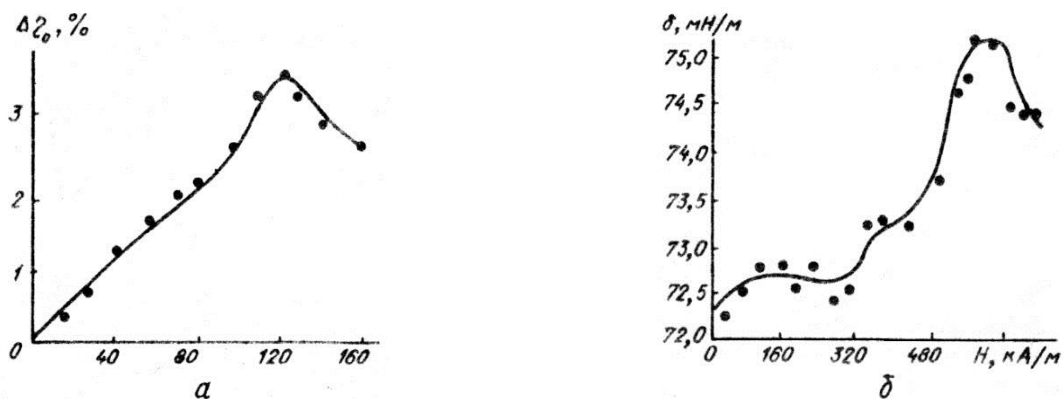


Рисунок 1 – Зависимость вязкости  $\Delta\eta_0$  и поверхностного натяжения воды  $\delta$  от напряженности магнитного поля  $H$

Магнитная обработка при коагулировании водных растворов (поверхностной воды) изменяет свойства продуктов гидролиза: уменьшается структурно-механическая гидратация и потенциал частиц; на 30–40 % возрастает сорбционная емкость продуктов гидролиза коагулянтов по отношению к гуминовым веществам [2, 4]. Так, например, при очистке вод, содержащих минеральные взвеси, увеличивается плотность и гидравлическая крупность хлопьев коагулированной взвеси, повышается производительность отстойников и осветлителей со взвешенным осадком, несколько снижается мутность осветленной воды. Магнитная обработка окрашенной воды увеличивает плотность коагулированной взвеси, а также интенсифицирует коагуляцию.

Достаточно значимые результаты дает применение одновременно с коагулянтами низкочастотных (около 50 Гц) механических колебаний: седиментация может ускоряться примерно в 2 раза. Действие ультразвука приводит к гибели некоторых бактерий, зоопланктона и водорослей, разрушению фенолов. Это содействует успешной коагуляции. Данный способ с каждым днем набирает все большую актуальность и начинает постепенно использоваться в разных странах [5]. Так, например, использование ультразвукового облучения на фильтровальных станциях предусматривает обработку воды после добавления коагулянта, что существенно ускоряет процесс коагуляции и приводит к ряду иных положительных эффектов. Рассмотрим этот процесс подробно.

**Целью данной работы** является исследование и обоснование целесообразности применения безреагентных методов с использованием воздействия физических полей в процессах очистки воды на примере коагуляционного осветления.

### **Изложение основного материала**

Исследования по влиянию акустических колебаний на процессы протекания химических реакций были известны уже достаточно давно. В частности звуковые и ультразвуковые колебания могут оказывать влияние на протекание некоторых химических реакций за счет, например, эмульгирования, диспергирования некоторых компонентов, дегазации, предотвращения осаждения или коагуляции [6, 7]. В молекулярной акустике часто используют гиперзвуковые колебания с частотой выше 1 ГГц, однако в звукохимии их не применяют.

Создаваемые излучателями акустические колебания приводят к образованию в облучаемой среде областей повышенного и пониженного давления (звукового давления), причем расстояние между соседними областями сжатия или растяжения равно длине волны. Это мгновенное состояние перемещается в среде со скоростью равной скорости звука  $c$  (для волны, которая перемещается). Каждая частица среды при этом лишь колеблется со скоростью и амплитудой сдвига  $a$  около положения равновесия.

Возмущение в среде (для простого случая), которое распространяется вдоль координаты  $x$ , описывается одномерным волновым уравнением:

$$\frac{\partial^2 a}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} = 0, \quad (1)$$

где  $a$  – смещение частицы среды;  
 $t$  – время.

Аналогичные уравнения можно записать для мгновенных значений звукового давления в данный момент времени, колебательной скорости частицы среды и плотности среды. Более подробное теоретическое обоснование влияния акустических колебаний на процессы агрегации приведены в нашей работе [8], поэтому ниже отметим самое основное.

Кипение жидкости обычно происходит, когда над ее свободной поверхностью давление снижается до величины, которая равна упругости ее насыщенного пара. Быстрое (почти мгновенное) снижение давления в жидкости, которое приводит к возникновению кавитации,

может осуществляться разными способами. Так, например, распространение в жидкости ультразвуковых волн может приводить к возникновению кавитации вследствие создания в жидкости отрицательного давления.

Необходимо отметить, что в настоящее время отсутствуют общие принципы классификации видов кавитации. По происхождению (факторам, которые ее вызывают) выделяют кавитацию гидродинамическую (уменьшение давления за счет движения при развитой турбулентности и т. п.) и акустическую (изменение знака давления при колебаниях частиц жидкости).

При кавитации первого типа пузырьки могут достигать больших размеров (около нескольких сантиметров), а вот при распространении акустических волн звуковое давление меняет знак с частотой поля, и потому акустическая кавитация характеризуется весьма малыми размерами образующихся пузырьков.

Особенностью кавитации является локальное концентрирование относительно невысокой средней энергии акустического поля в очень малых объемах (практически в точке), что приводит к исключительно высокой плотности энергии. Так, например, Маргулис рассчитал, что в момент схлопывания кавитационной полости (т. е. когда диаметр ее минимален) плотность энергии может достигать  $900 \text{ eВ/нм}^3$ .

Кавитационные процессы были теоретически обоснованы еще в сороковых годах XX ст. Это теории Френеля, Харви, Дегруа-Бальдо, а также новая электрическая теория Маргулиса [7], сформулированная относительно недавно, в которой главная роль отводится механизму образования заряженных частиц на поверхности кавитационной полости. В момент сжимания последней возникает электрический пробой и полость исчезает. Несмотря на то, что теории микрозарядов в некоторой степени смогли объяснить ряд экспериментальных результатов, физическая картина процессов более сложна.

Анализируя экспериментальные данные звукохимии, ученые выдвинули гипотезу, что механизм непрямого действия ультразвука аналогичен действию радиации. Молекулы воды распадаются на радикалы Н и ОН, которые, образуясь в середине кавитационной полости, переходят в жидкую фазу и реагируют с растворенными в ней веществами. Эта гипотеза позже была подтверждена экспериментально.

Согласно большинству экспериментальных данных скорости хода разных физико-химических процессов кавитации пропорциональны интенсивности акустических колебаний [5, 8–13]. Звукохимические реакции начинаются лишь после достижения некоторой пороговой мощности, при которой возникает кавитация. В тоже время при достижении больших интенсивностей значительно уменьшается скорость звукохимических реакций, что сопровождается снижением интенсивности сонолюминисценции и эрозийной активности образующихся волн. Кавитация вызывает высокую локальную концентрацию энергии акустического поля, которое вызывает появление свободных радикалов, активирует поверхность катализаторов, диспергирует растворенный газ, а также эффективно локально концентрирует энергию колебаний, которая дает возможность использовать ее для инициирования и интенсификации химических реакций.

Для создания ультразвуковых колебаний в обрабатываемом объеме воды используются магнитострикционные и пьезокерамические излучатели, подключенные к генератору колебаний, позволяющие получать ультразвук низких частот от десятков герц до сотен килогерц, который в основном и используется в процессах очистки воды. Во многих электромеханических устройствах ультразвуковая энергия получается за счет превращения электрической, для чего используются главным образом разные пьезокерамические материалы. При включении генератора пьезометрический излучатель начинает вибрировать и производить упругие волны, которые вызывают явление кавитации.

Весьма значимым аспектом является влияние размера частиц на необходимую частоту ультразвукового облучения. Если распределение частиц гидрозоля полидисперсное, а относительная скорость частиц в акустическом поле зависит от их плотности и диаметра, а также от частоты и интенсивности облучения, то и характеристики акустического поля должны отвечать

свойствам частиц. Интенсивность звука влияет (увеличивает) на относительную скорость движения частиц гидрозоль. Важным параметром гидрозоля, который характеризует эффективность его коагуляции, является характеристическая частота  $F_0$ , которую можно определить по формуле:

$$F_0 = \frac{3\mu}{2\pi \cdot \rho \cdot R^2}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости дисперсионной среды, при 20 °С составляет  $1,002 \cdot 10^{-3}$  Н·с/м<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность дисперсной фазы/частиц,  $1,1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;

$R$  – радиус частицы.

Приведенная формула иллюстрирует, что для воздействия на частицы определенного размера необходима соответствующая частота облучения.

Естественно, что загрязнители могут быть разной степени дисперсности и состава, однако очень часто одним из загрязнителей естественных вод являются, например, гумусовые кислоты (гуминовая и фульвокислоты). Размеры этих загрязнителей порядка 1–2 мкм. Следовательно, в начале обработки воды целесообразно использовать частоту ультразвука, соответствующую именно этому радиусу. При этом некоторые авторы отмечают, что можно использовать и достаточно высокую частоту (около 1 МГц) [5]. Вычислим требуемую частоту ультразвуковых колебаний для частиц радиусом 1 мкм и 1,5 мкм по формуле (2).

$$F = \frac{3 \cdot 1,002 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,1 \cdot 10^3 \cdot (1 \cdot 10^{-6})^2} = 435,2 \text{ кГц},$$

$$F = \frac{3 \cdot 1,002 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,1 \cdot 10^3 \cdot (1,5 \cdot 10^{-6})^2} = 193,4 \text{ кГц}.$$

Под воздействием ультразвукового облучения и коагуляции размеры частиц (скоплений частиц) увеличиваются (до 500 мкм и более), потому для дальнейшего действия следует использовать низшие частоты, что подтверждает мнение авторов [6, 7], которые используют частоту около 40 кГц, хотя нами опытным путем установлена целесообразность применения частоты 32 кГц. Далее следует снижать частоту в зависимости от параметров взвеси. Определим необходимую частоту для агрегатов крупных размеров (радиусом 250 и 500 мкм, 1000 мкм) по формуле (2).

$$F = \frac{3 \cdot 1,002 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,1 \cdot 10^3 \cdot (250 \cdot 10^{-6})^2} = 6,96 \text{ Гц},$$

$$F = \frac{3 \cdot 1,002 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,1 \cdot 10^3 \cdot (500 \cdot 10^{-6})^2} = 1,74 \text{ Гц},$$

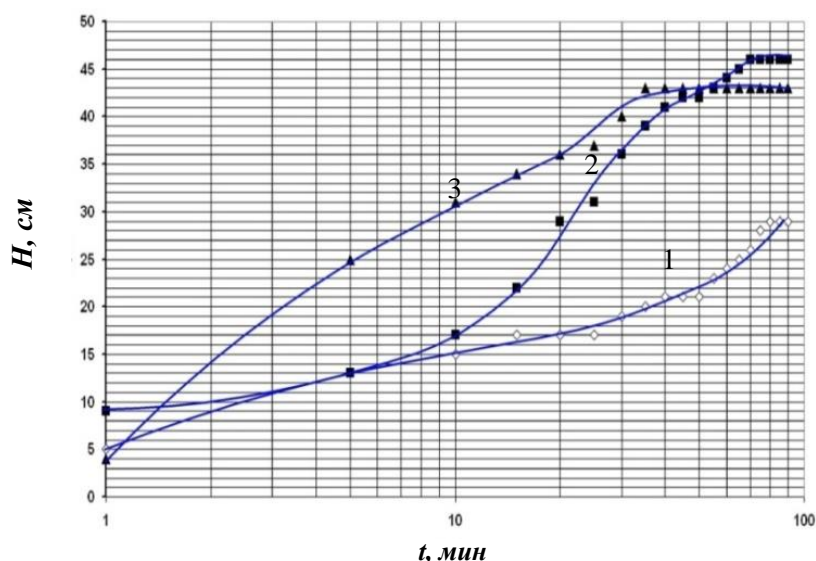
$$F = \frac{3 \cdot 1,002 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,1 \cdot 10^3 \cdot (1 \cdot 10^{-3})^2} = 0,435 \text{ Гц}.$$

Следует отметить, что указанная частота является низкой. Она может быть реализована за счет медленно вращающихся мешалок.

### **Результаты эксперимента**

В исследовании была использована вода из поверхностных источников. Измерение уровня осветления воды (прозрачности) проводилось через каждые 5 минут. Прозрачность в данном случае является показателем эффективности способа осветления воды. Был использован самый распространенный коагулянт – сульфат алюминия  $Al_2(SO_4)_3$ . Доза коагулянта составляла 1 мг-экв/л (15 мл  $Al_2(SO_4)_3$  с концентрацией 100 мг-экв/л).

Для проведения опытов были использованы ультразвуковые устройства с разной частотой колебаний, формируемых излучателями. Облучение раствора разными частотами показало результаты, которые показаны на графике зависимости эффективности коагуляции от частоты ультразвука (рис. 2).



1 – 21 кГц; 2 – 32 кГц; 3 – 200 кГц

Рисунок 2 – Зависимость длительности и эффективности (высоты осветления  $H$ ) коагуляции от частоты ультразвукового облучения

Проведенные эксперименты показали, что облучение частотой 200 кГц является наиболее эффективным, однако его действие постепенно снижается и прекращается (рис. 2). Это объясняется с тем, что ультразвуковые волны данной частоты прекращают «видеть» хлопья, потому в дальнейшем следует использовать значительно низшие частоты.

Также были проведены эксперименты с комбинированием разных частот и времени облучения. Результаты представлены следующими графическими зависимостями (рис. 3).

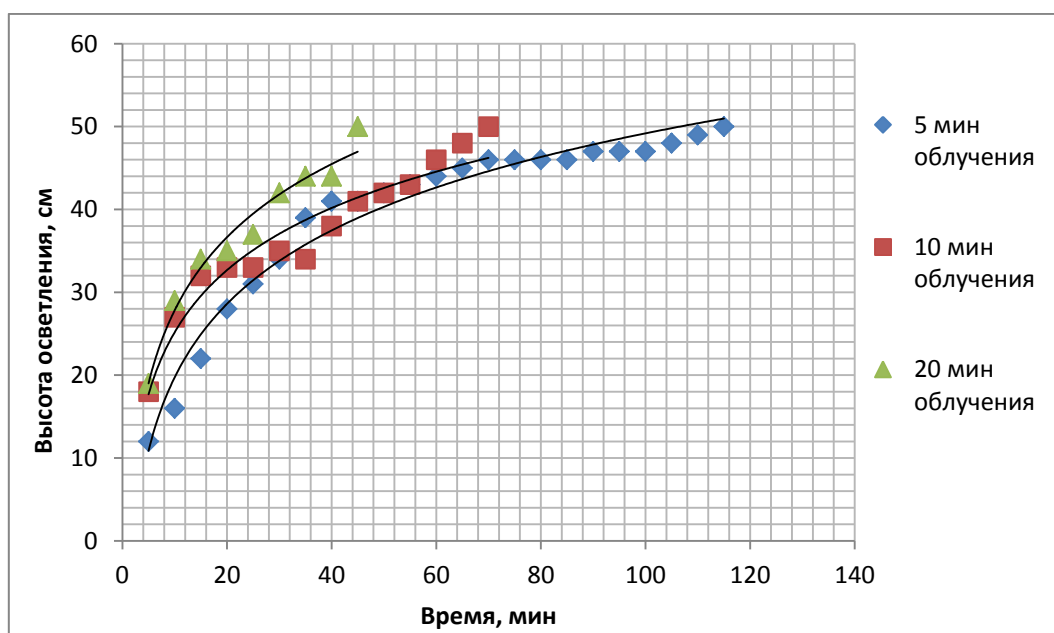


Рисунок 3 – Зависимость эффективности коагуляции (высоты осветления  $H$ ) от длительности обработки  $t$  воды ультразвуком

Таким образом, общее время пребывания воды в осветителях представляет:

1. Эксперимент: 5 мин. облучения ультразвуком и 115 мин. осветления, т. е. суммарное время составило 120 мин.

2. Эксперимент: 10 мин. облучения ультразвуком и 70 мин. осветления, т. е. суммарное время составило 80 мин.

3. Эксперимент: 20 мин. облучения ультразвуком и 45 мин. осветления, т. е. суммарное время составило 65 мин.

В результате проведенных экспериментов были получены следующие зависимости для разного времени облучения ультразвуком:

– облучение в течение 5 мин:

$$H = 12,72 \cdot \ln(t) - 1,47 \text{ при } (R^2 = 0,97);$$

– облучение в течение 10 мин:

$$H = 10,81 \cdot \ln(t) + 0,29 \text{ при } (R^2 = 0,93);$$

– облучение в течение 20 мин:

$$H = 12,76 \cdot \ln(t) - 9,7 \text{ при } (R^2 = 0,97);$$

где  $H$  – высота осветления столба воды в цилиндре, см;

$t$  – время осаждения, мин.

$R^2$  – достоверность аппроксимации.

Таким образом, с помощью полученных зависимостей можно определить и спрогнозировать будущие параметры коагуляционного процесса.

В промышленных условиях общее время пребывания воды в осветителях составляет около двух часов, т. е. уменьшая общее время пребывания воды в осветителях почти в два раза, можно вдвое сократить площадь под оборудование, что в современных условиях на производстве является важным показателем. Важно также отметить, что описанные выше эффекты достигаются даже при относительно низких температурах исходной воды, однако это уже предмет отдельного исследования.

### **Выводы**

1. Выделены основные наиболее значимые способы повышения эффективности коагуляционных процессов очистки воды.

2. Теоретически и практически обосновано применение физических полей (магнитной обработки и ультразвукового облучения) для интенсификации процесса коагуляции примесей при очистке воды. Обосновано применение ультразвука для облучения поверхностной воды загрязненной взвешенными веществами различной степени дисперсности. Показано, что определенному размеру частиц должна соответствовать своя частота облучения, длина волны которой будет способна воздействовать на них.

3. Выполнены исследования по влиянию ультразвукового облучения на интенсивность и эффективность коагуляции (осветления воды) при использовании разных частот ультразвука с учетом размера частиц и последующей их агрегации.

4. Получены математические зависимости высоты слоя (осветления) от времени облучения ультразвуком соответствующей частоты.

5. Полученные экспериментальные данные дают возможность существенно сократить время пребывания воды в осветителях и повысить эффективность производственных процессов очистки воды.



### **Список литературы**

1. Кульский, Л. А. Чистая вода и перспективы ее сохранения / Л. А. Кульский. – Киев : Наукова думка, 1978. – 227 с.
2. Кульский, Л. А. Магнитное поле и процессы водообработки : монография / Л. А. Кульский, С. С. Душкин. – Киев : Наукова думка, 1988. – 112 с. – ISBN 5-12-001155-1.
3. Антонов, С. Н. Аппараты магнитной обработки воды. Проектирование, моделирование и исследование : монография / С. Н. Антонов, А. И. Адошев, И. К. Шарипов, В. Н. Шемякин. – Ставрополь, 2014. – 220 с.
4. Классен, В. И. Вода и магнит / В. И. Классен. – Москва : Наука, 1973. – 111 с.
5. Stepniak, L. Ultrasonic Energy as an Agent to Aid Water Treatment in the Coagulation Process. – Текст : электронный / L. Stepniak, E. Stańczyk-Mazanek // *Energies*. – 2022. – № 15(5186). – P. 1–13. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/14/5186>.
6. Маргулис, М. А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях) / М. А. Маргулис. – Москва : Высшая школа, 1984. – 272 с.
7. Маргулис, М. А. Химическое действие низкочастотных акустических колебаний / М. А. Маргулис, Л. М. Грундель // Доклады АН СССР. – 1982. – № 4, Т. 265. – С. 914–917.
8. Коновальчик, М. В. Исследование и обоснование использования ультразвукового облучения в коагуляционных процессах очистки воды / М. В. Коновальчик, С. П. Высоцкий // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2020. – № 12(42). – С. 124–130.
9. Пирсол, И. Кавитация / И. Пирсол // Пер. с англ. Ю. Ф. Журавлева ; под ред., с предисл. и доп. Л. А. Эпштейна. – Москва : Мир, 1975. – 95 с.
10. Френкель, Я. И. Об электрических явлениях, связанных с кавитацией, обусловленной ультразвуковыми колебаниями в жидкости / Я. И. Френкель // Журнал физической химии. – 1940. – № 3, Т. 14. – С. 305–308.
11. Yonghyeon, L. Ultrasonic Aggregation for Removal of Fine Particles From Mine Drainage Treatment Process / L. Yonghyeon, J. Park, M. Cui, J. Khim // *Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics*. – 2013. – Vol. 34. – November. – P. 383–384.
12. Wen-jie, H. Algae Removal by Ultrasonic Irradiation-Coagulation / H. Wen-jie, L. Guibai, L. Heng, N. Jun // *Desalination*. – 2009. – Vol. 239. – Issues 1-3. – P. 191–197.
13. Mahvi, AH. Application of Ultrasonic Technology for Water and Wastewater Treatment / AH Mahvi // *Iranian J Publ Health*. – 2009. – № 2. – Vol. 38. – P. 1–17.

***М. В. Коновальчик, Д. А. Петухов, В. И. Логачев***

***Автомобильно-дорожный институт***

***ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка***

**Пути интенсификации процессов очистки воды безреагентными методами**

**за счет применения физических полей**

Рассмотрены основные способы повышения эффективности процессов очистки воды при коагуляционных процессах осаждения. Выделены наиболее значимые способы повышения эффективности коагуляционных процессов очистки воды. Отмечены их преимущества и недостатки.

Дано теоретическое и практическое обоснование применения физических полей (магнитной обработки и ультразвукового облучения) для интенсификации процесса коагуляции примесей при очистке воды. Теоретически обосновано применение ультразвука для облучения водных растворов (в частности поверхностной воды загрязненной взвешенными веществами различной степени дисперсности). Показано, что определенному размеру частиц, находящихся в загрязненной воде, должна соответствовать своя частота облучения, длина волны которой будет способна воздействовать на них в конкретный момент времени.

Выполнены исследования по влиянию ультразвукового облучения на интенсивность и эффективность коагуляции (осветления воды) при использовании разных частот ультразвука с учетом размера частиц и последующей их агрегации. Получены математические зависимости (с достаточно высокой достоверностью) высоты слоя осветления воды от времени облучения ультразвуком соответствующей частоты. Показано, что полученные экспериментальные данные дают возможность существенно сократить время пребывания воды в осветлителях и повысить эффективность производственных процессов очистки воды.

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ КОАГУЛЯЦИИ, ФИЗИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, МАГНИТНАЯ ОБРАБОТКА, УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ОБЛУЧЕНИЕ, ПОДБОР ЧАСТОТЫ УЛЬТРАЗВУКА, ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ОБЛУЧЕНИЯ**

*M. V. Konovalchik, D. A. Petukhov, V. I. Logachev*  
*Automobile and Road Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka*  
**Intensification Ways of Water Purification Processes by Reagentless Methods through the Use of  
 Physical Fields**

The main ways of increasing the efficiency of water purification processes in the sedimentation coagulation processes are considered. The most significant ways to improve the efficiency of the water purification coagulation processes are identified. Their advantages and disadvantages are noted.

The theoretical and practical substantiation of the physical fields use (magnetic treatment and ultrasonic irradiation) for intensifying the process of the impurities coagulation in water purification is given. The ultrasound use for the irradiation of aqueous solutions (in particular, surface water contaminated with suspended solids of various degrees of dispersion) is theoretically substantiated. It is shown that a certain size of particles in polluted water must correspond to its own irradiation frequency, the wavelength of which will be able to act on them at a particular point in time.

Studies on the ultrasonic irradiation effect on the intensity and efficiency of the coagulation (water clarification) using different frequencies of the ultrasound, taking into account the particle size and their subsequent aggregation, are carried out. Mathematical dependences (with sufficiently high reliability) of the water clarification layer height on the irradiation time with the ultrasound of the corresponding frequency are obtained. It is shown that the obtained experimental data make it possible to significantly reduce the water residence time in clarifiers and increase the efficiency of industrial water purification processes.

COAGULATION INTENSIFICATION, PHYSICAL FIELD, MAGNETIC TREATMENT, ULTRASONIC IRRADIATION, ULTRASONIC FREQUENCY SELECTION, IRRADIATION DURATION

**Сведения об авторах:**

**М. В. Коновальчик**

SPIN-код РИНЦ: 1616-9285  
 ORCID ID: 0000-0002-3943-2922  
 ResearcherID: I-2733-2016  
 Телефон: +7 (949) 364-33-43  
 Эл. почта: max.k30@mail.ru

**Д. А. Петухов**

Телефон: +7 (949) 338-40-91  
 Эл. почта: d.petukhov@e.adidonntu.ru

**В. И. Логачев**

Телефон: +7 (949) 389-39-79  
 Эл. почта: v.logachev@e.adidonntu.ru

*Статья поступила 15.11.2022*

© М. В. Коновальчик, Д. А. Петухов, В. И. Логачев, 2022

*Рецензент: В. В. Лихачева, канд. техн. наук, доц., АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»*