

Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2026. № 1. С. 71–79.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 544.576

DOI: 10.22227/2311-1518.2026.1.71-79

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Леонид Иванович Соколов^{1,2}, Ирина Михайловна Смирнова²,
Людмила Михайловна Воропай³

¹ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Российская Федерация;

² Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ – РГГРУ); г. Москва, Российская Федерация;

³ Вологодский государственный университет (ВоГУ); г. Вологда, Российская Федерация

Ультразвук и акустическая кавитация обеспечивают эффективную обработку сложных сточных вод гальванического производства за счет каталитических процессов и высокой скорости смешивания ударными волнами, которая сопровождается сонохимическими реакциями. Исследовано состояние вопроса о процессах, связанных с ультразвуком и акустической кавитацией, с точки зрения физико-химической модели, позволяющей прогнозировать и контролировать результат. Изучены влияние энергетических ультразвуковых эффектов на степень очистки сточных вод гальванического цеха и кинетика процессов при разной продолжительности озвучивания в двух типах ультразвуковых реакторов. Показано, что механизм ультразвукового воздействия включает увеличение удельной поверхности образующихся нерастворимых компонентов стока и ее активацию. Установлены изменения значений pH, электропроводности, концентраций катионов и анионов, температуры сточных вод в зависимости от продолжительности озвучивания при частоте 20–22 кГц, интенсивностью от 1,5 до 10 Вт/см². Проведены исследования эффективности видоизменения степени окисления ионов тяжелых металлов (Fe^{+3} , Cr^{+3}) из сточных вод с использованием ультразвукового воздействия.

Ключевые слова: гальваническое производство, сточная вода, катионы, анионы, ультразвук, кавитация

Для цитирования: Соколов Л.И., Смирнова И.М., Воропай Л.М. Интенсификация процесса доочистки сточных вод гальванического производства с использованием ультразвукового воздействия // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2026. № 1. С. 71–79. DOI: 10.22227/2311-1518.2026.1.71-79

INTENSIFICATION OF THE PROCESS OF POST-TREATMENT OF WASTEWATER FROM ELECTROPLATING USING ULTRASONIC EXPOSURE

Leonid I. Sokolov^{1,2}, Irina M. Smirnova², Lyudmila M. Voropai³

¹ Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN); Moscow, Russian Federation;

² Russian State Geological Exploration University named after Sergo Ordzhonikidze (MGRI – RGGRU); Moscow, Russian Federation;

³ Vologda State University (VSU); Vologda, Russian Federation

Ultrasound and acoustic cavitation ensure efficient treatment of complex wastewater from galvanic production due to catalytic processes and high mixing rate by shock waves, which is accompanied by sonochemical reactions. The state of the issue of processes related to ultrasound and acoustic cavitation is considered from the point of view of a physico-chemical model that allows predicting and controlling the result. The influence of energetic ultrasonic effects on the degree of wastewater treatment in the galvanic workshop and the kinetics of processes with different duration of sounding in two types of ultrasonic reactors are studied. It is shown that the mechanism of ultrasonic action includes an increase in the specific surface area of the formed insoluble components of the drain and its activation. Changes in pH, electrical conductivity, cation and anion concentrations, and wastewater temperature have been established depending on the duration of voicing at a frequency of 20–22 kHz and an intensity from 1.5 to 10 W/cm². Studies have been conducted on the effectiveness of removing heavy metal ions (Fe^{+3} , Cr^{+3}) from wastewater using ultrasonic exposure.

Keywords: electroplating, waste water, cations, anions ultrasound, cavitation

For citation: Sokolov L.I., Smirnova I.M., Voropai L.M. Intensification of the process of post-treatment of wastewater from electroplating using ultrasonic exposure. *Biosphere Compatibility: Man, Region, Technology*. 2026; 1:71-79. DOI: 10.22227/2311-1518.2026.1.71-79 (rus.).

Введение

Источниками загрязнения природной среды тяжелыми металлами являются различные отрасли экономики, но в первую очередь гальваническое производство, характерное для предприятий машино- и станкостроения, где для удаления тяжелых металлов из сточных вод используют реагентный и электрокоагуляционный методы очистки. Недостатками этих методов являются высокий расход реагента и электроэнергии, большие площади для очистных сооружений и их высокая стоимость. Поэтому возникает необходимость в совершенствовании существующих технологий очистки для решения задач снижения эксплуатационных затрат, экономии ресурсов, разработки простых и компактных конструкций очистных сооружений [1].

Одним из перспективных методов воздействия на загрязнители сточных вод для интенсификации технологических процессов очистки является метод, основанный на использовании механических упругих колебаний и волн ультразвукового диапазона, частотой выше 20 кГц. Ультразвук и акустическая кавитация улучшают процессы очистки и доочистки сточных вод за счет эффективного смешивания, ускорения скорости реакции, усиления массопереноса, деструкции и восстановления. По сравнению с другими методами ультразвуковое воздействие при очистке сточных вод более эффективно с точки зрения общей потребляемой мощности на моль загрязняющего вещества и может осуществляться путем окисления гидроксильными радикалами во время акустической кавитации. Наиболее успешно ультразвуковые колебания (УЗ) используются в технологиях очистки воды [2–4] и в процессах, свя-

занных с жидкофазными состояниями реагентов, поскольку только в жидкой фазе возникает специфическая ультразвуковая кавитация [5], обеспечивающая максимальные энергетические воздействия на различные вещества и загрязнители за счет образующихся в воде масс пульсирующих газовых пузырьков, в которых создаются ударные волны с высоким импульсным давлением (рис. 1).

При прохождении ультразвуковой волны через воду в стадии отрицательного давления начинается рост воздушного пузырька, который в стадии положительного давления схлопывается. Схлопывание — коллапс пузырька — происходит за счет значительной разности между гидростатическим давлением сточной воды и давлением внутри полости кавитационного пузырька, а также резкого повышения акустического давления в жидкой фазе в цикле сжатия ультразвуковой волны, когда вода устремляется к центру пузырька. При этом происходит концентрирование энергии, а в центре пузырька создается высокое давление, за счет которого формируется расходящаяся сферическая ударная волна. По теории «горячей точки» (hot spot theory) в микрообъеме 10^{-5} – 10^{-6} см возникает давление порядка тысяч атмосфер, а температура может повышаться до тысячи и более градусов Цельсия [6–8]. Таким образом, водяной пар, находящийся в полости кавитационного пузырька в момент его коллапса, подвергается действию высоких температур и давлений, вследствие чего молекулы воды претерпевают так называемый сонолиз, протекающий по реакциям:

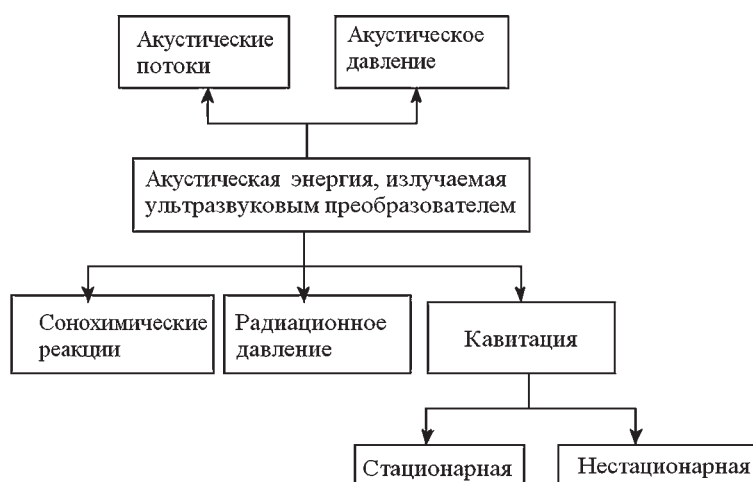
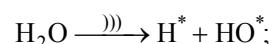
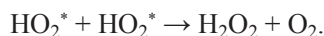
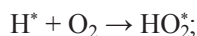
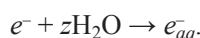


Рис. 1. Физические явления, сопровождающие распространение ультразвуковой волны в сточной воде



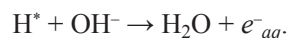
Это ускоряет химические реакции, происходящие при очистке сточных вод, так как именно в водной среде активными частицами чаще всего являются продукты разложения воды. Образующиеся активные частицы переходят в очищаемую сточную воду, где инициируют и интенсифицируют окислительно-восстановительные и радикальные реакции. Образующиеся радикалы, такие как O^- и HO^* , очень реакционноспособны, являются мощными окислителями. При ультразвуковом воздействии на сточную воду появляются гидратированные электроны, образующиеся вследствие ионизации молекул воды в момент коллапса кавитационного пузырька:



Наличие сольватированных электронов e_{aq}^- в сточной воде зависит от pH среды. В кислой среде сольватированные электроны участвуют в образовании атомарного водорода по реакции:



В щелочной среде наблюдается другой процесс:



Действие УЗ объясняется не только кавитационным эффектом ультразвука, но и возникающим вихревым акустическим пограничным слоем, где происходит интенсификация процесса переноса тепла, изменение концентрации ионов. Учитывая столь широкий диапазон факторов воздействия акустических колебаний [9, 10], высокую токсичность стоков, содержа-

щих тяжелые металлы, а также недостатки традиционных методов очистки, представляется актуальной задача изучения воздействия ультразвука на загрязнители сточных вод с точки зрения ультразвуковой интенсификации процессов очистки.

Цель работы — исследовать влияние ультразвукового излучения, как способа инициирования и интенсификации окислительно-восстановительных реакций, на химические показатели очищаемой сточной воды гальванического производства.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являются производственные стоки гальванического производства ЗАО ВПЗ (г. Вологда), которые на локальных очистных сооружениях подвергаются обезвреживанию в баках-реакторах в кислой среде при $\text{pH} = 2,5$ гидросульфитом натрия для восстановления Cr^{+6} , затем нейтрализуются щелочью и отстаиваются с выделением осадка. При этом требуется их доочистка. Поэтому для исследования в данной работе использовали гальванические сточные воды на выходе из отстойника.

В задачу исследования входило изучение влияния энергетических ультразвуковых эффектов на степень доочистки сточных вод. При выполнении экспериментов использовали два типа ультразвуковых реакторов: первый реактор «контактный» КР1 (цилиндрический) имел два ультразвуковых излучателя (мощность 140 Вт, частота колебаний 20–22 кГц), которые были вмонтированы в стенки таким образом, что внутренние стенки реактора выполняли функцию излучателя в течение 3–5 мин (рис. 2); второй реактор Р2 был изготовлен в виде закрытой ванны с вмонтированными в дно двумя излучателями (мощность 140 Вт, частота колебаний 20–22 кГц).



Рис. 2. Экспериментальный ультразвуковой реактор для обработки сточных вод

В реакторах отсутствует дополнительный подогрев обрабатываемых сточных вод. В ранее выполненных исследованиях установлено повышение температуры при озвучивании от 40 до 60 °С в зависимости от вязкости среды; число кавитации также зависит от вязкости среды и изменяется от 500 до 900 [11]. Изменения температуры, значений pH среды в процессе озвучивания объясняются кавитационными эффектами.

Для эксперимента отбирали 2,5–5 л воды, помещали в ультразвуковой реактор и подвергали озвучиванию в течение 5, 15, 30, 40, 60 мин. После отбора проб определяли показатели исходных гальванических стоков, которые представлены в табл. 1 и 2.

На втором этапе исследований будут проведены исследования очистки сточных вод в проточном режиме на опытно-промышленной установке (рис. 3), изготовленной ООО «АЛЕКСАНДРА-ПЛЮС» (г. Вологда). В данной работе представлены результаты исследований первого этапа.

При выполнении эксперимента использовали современные физико-химические методы анализа. Наличие восстановленных катионных и анионных примесей определяли методами перманганатной и бихроматной окисляемости. Концентрации катионов кальция, магния, хлорид-ионов определяли титриметрическим методом анализа.

Фотометрический метод анализа использовали для определения эффективности очистки сточных вод от ионов железа, хрома, аммония, нитрит-ионов, нитрат-ионов. Для установления количественного содержания сульфат-ионов использовали турби-

Таблица 1. Показатели гальванических стоков после восстановления Cr^{+6} и нейтрализации

Значение pH	Температура T , °С	Электропроводность mS	Солесодержание, мг/дм ³
8,73	18	0,4	8,25

диметрический метод анализа. После озвучивания проб в течение 5, 15, 30, 40, 60 мин определяли изменение температуры, pH среды, солесодержание, электропроводность, остаточную концентрацию основных компонентов.

Результаты исследования и их обсуждение

Изучено влияние ультразвукового воздействия на реальные сточные воды, содержащие в качестве загрязняющих веществ: нитриты, нитраты, хлориды, сульфаты, катионы аммония, кальция, магния, железа, хрома. Указанные сточные воды испытывались в слабой щелочной среде, которая создавалась уже после восстановления Cr^{+6} с последующей нейтрализацией очищаемого стока, что обеспечивало стабилизацию нитритов натрия. В задачу исследования входил поиск условий, при которых происходит окисление растворенных в воде загрязнителей под УЗ воздействием. Результаты исследования представлены в табл. 2 и показывают, что наибольшее содержание в изучаемых гальваностоках (до УЗ-воздействия на них) характерно для хрома, которое превышает значение ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения (ПДК для $\text{Cr}^{+3} = 0,07 \text{ мг/дм}^3$)



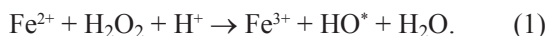
Рис. 3. Опытно-промышленный ультразвуковой реактор для обработки сточных вод

в тысячу раз. Содержание кальция и магния ниже значения ПДК.

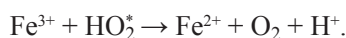
Содержание катионов аммония и нитрит-анионов превышает значения ПДК (соответственно, 0,5 мг/дм³ и 0,2 мг/дм³), содержание хлорид-, сульфат-, нитрат-анионов ниже значения ПДК.

Установлено, что температура сточной воды при обработке ультразвуком зависит от продолжительности озвучивания и «дозы» облучения (произведение мощности на продолжительность обработки). Результаты исследования представлены на рис. 4.

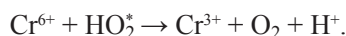
Резкое увеличение температуры происходит в течение первых 25 мин озвучивания, а после 25 мин рост температуры прекращается. В сточной воде идут окислительно-восстановительные реакции между ионами растворенных загрязнителей и продуктами ультразвукового расщепления воды, возникающими в кавитационных пузырьках и переходящими в раствор после их схлопывания, что приводит к увеличению скорости конвекции и, следовательно, усилению скорости химической реакции окисления нитрита. Например, при воздействии ультразвука на подкисленную сточную воду в присутствии воздуха Fe(II) окисляется до Fe(III) по реакции:



При УЗ-воздействии на сточную воду протекают также и восстановительные реакции, например восстановление Fe(III) при облучении в слабокислой или нейтральной водной среде на воздухе:



Аналогично под воздействием ультразвука происходит и восстановление Cr⁺⁶ до Cr⁺³ в кислой среде по реакции:



Результаты исследований (табл. 2) показывают, что энергетические ультразвуковые эффекты инициируют протекание окислительно-восстановительных реакций растворимых соединений азота. При этом наблюдается уменьшение содержания восстановленных форм азота — катионов аммония и нитрит-ионов и одновременное увеличение концентрации нитрат-ионов. Восстановленные формы азота, такие как катионы аммония, образуют растворимые соединения. При озвучивании их концентрация в сточных водах уменьшается за счет дегазации аммиака. Одновременно в озвученной среде протекают реакции окисления катионов аммония до нитрат-ионов (NO₃⁻). Поэтому концентрация нитрат-анионов при кавитации возрастает, но уменьшается концентрация катионов аммония. Результаты свидетельствуют, что процесс снижения концентрации ионов аммония (NH₄⁺) начинается в первые 5 мин после начала озвучивания (эффективность очистки 10 %) и продолжается на протяжении озвучивания — 60 мин (эффективность очистки 90,6 %). Низкочастотные ультразвуковые волны вызывают уменьшение концентрации нитрит-ионов (NO₂⁻) за счет процессов окисления до нитрат-анионов. Убыль концентрации после озвучивания проб воды в первом реакторе составляет 89,6 %; во втором реакторе — 89,4 %.

За счет окисления катионов аммония и нитрит-ионов наблюдается увеличение концентрации нитрат-ионов. Процесс окисления усиливается за счет образования пероксида водорода при схлопывании кавитационных пузырьков. Минимальное увеличение концентрации нитрат-ионов наблюдается через 40 мин после озвучивания в сравнении с исходной концентрацией и увеличивается в пять раз при проведении обработки в реакторе первого типа и в 4,6 раза при озвучивании проб воды реактором второго типа.

Дополнительным фактором влияния смещения равновесия в сторону восстановления нитрата слу-

Таблица 2. Изменение состава гальванических стоков в процессе озвучивания

Компоненты сточных вод			Ca ⁺²	Mg ⁺²	Fe ⁺³	Cr ⁺³	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃	NO ₂
Концентрация компонентов при времени озвучивания, мг/дм ³	Исходная концентрация, мг/дм ³		32	9,6	0,18	76,4	29,5	24,85	21,52	1,09	10,5
	5 мин	KP1	32,08	8,22	0,09	52,18	17,24	20,18	19,32	1,41	9,13
		P2	32,11	8,31	0,09	52,51	17,41	20,36	19,52	1,32	9,21
	15 мин	KP1	32,75	5,31	0,06	42,32	9,36	16,32	16,54	1,92	7,92
		P2	32,85	5,42	0,07	42,74	10,01	16,81	16,92	1,78	8,01
	20 мин	KP1	33,38	3,64	0,05	28,19	9,02	13,55	8,56	3,22	5,02
		P2	33,49	3,75	0,06	28,95	9,02	13,69	8,92	3,18	5,11
	30 мин	KP1	33,75	2,82	0,02	15,32	8,13	8,13	4,19	4,58	3,71
		P2	33,64	2,92	0,03	16,18	8,48	8,61	4,05	4,65	3,72
	40 мин	KP1	34,21	1,3	0,02	1,91	10,92	6,35	3,08	5,42	2,14
		P2	34,65	1,32	0,03	2,87	10,65	6,35	3,29	5,03	2,44
	60 мин	KP1	34,8	1,29	0,02	1,9	11,74	7,14	2,02	5,42	1,09

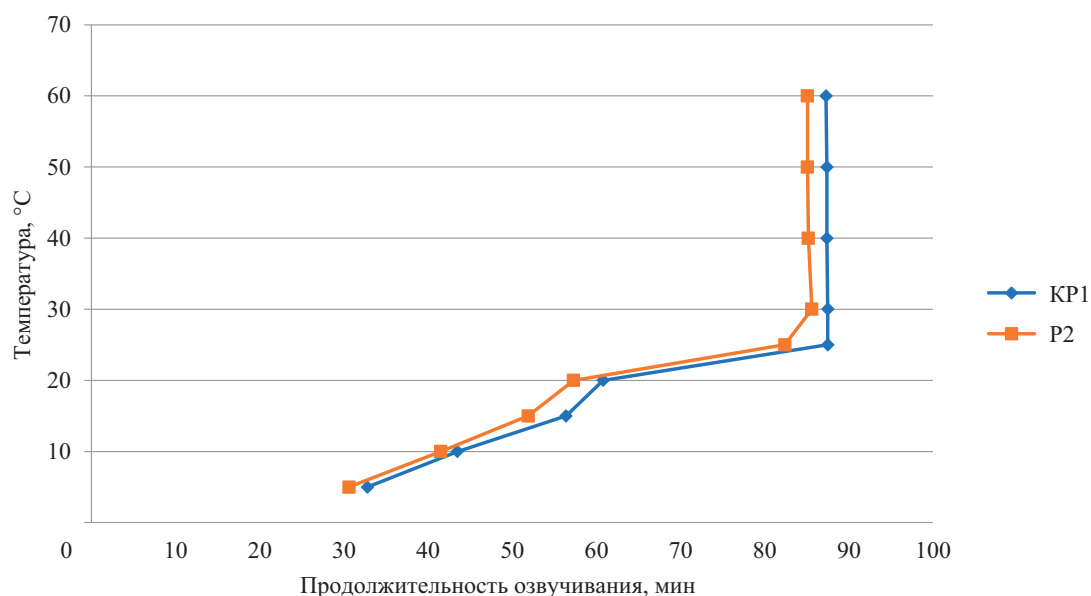


Рис. 4. Влияние продолжительности озвучивания на изменение температуры сточных вод гальванического производства для двух типов ультразвуковых реакторов KP1 и P2

жит и температурный фактор. Изгиб кривой наблюдается при достижении температуры 25 °C (рис. 4). Последний эффект приводит к дегазации, в том числе и удалению кислорода как возможного окислителя. Как указывалось выше, в условиях УЗ-воздействия этот эффект нивелируется за счет увеличения окислительной способности пероксида водорода.

В сточных водах присутствуют также сульфат и хлорид-ионы. В результате ультразвукового воздействия наблюдается скачкообразное изменение их концентраций. Установлено, что концентрация сульфат-ионов через 30 мин озвучивания уменьшается с 29,5 до 8,13 мг/дм³ в первом типе реактора, и, соответственно, во втором типе реактора до 8,48 мг/дм³. После 40-минутного озвучивания вновь наблюдается увеличение концентрации сульфат-ионов до 10,92 мг/дм³ после обработки сточных вод в контактном реакторе KP1; после озвучивания в реакторе P2 это значение составляет 10,65 мг/дм³.

Такая же закономерность изменения концентрации наблюдается после озвучивания сточных вод, содержащих хлорид-ионы. При 40-минутном озвучивании концентрация хлорид-ионов уменьшается до 74,4 % в первом и втором типах реакторов. При дальнейшем увеличении времени озвучивания происходит незначительное увеличение концентрации хлорид-ионов из-за увеличения растворимости соединений хлора и способности к гидролизу солей хлоридов металлов, образованных слабыми основаниями. Это подчеркивает важность учета таких физико-химических характеристик сточных вод, как растворимость и способность к гидролизу.

Одновременно определяли влияние времени озвучивания на изменение значений pH среды и электропроводность озвученных сред. Эти пока-

затели зависят от концентрации ионов и образующихся нерастворимых соединений. Вследствие освобождения ионов OH⁻ раствор приобретает щелочные свойства и значение pH повышается. Результаты исследования приведены на рис. 5.

Результаты исследований показывают, что после озвучивания происходит подщелачивание за счет увеличения концентрации катионов кальция и уменьшения концентрации катионов хрома и железа. Одновременно с подщелачиванием наблюдается уменьшение электропроводности озвученной среды за счет образования коллоидных систем и осадка, включая Cr(OH)₃, и далее до растворения последнего с образованием гидроксокомплексов. Снижение электропроводности, в отличие от изменений значений pH, происходило не линейно, а через экстремумы.

Максимальное увеличение концентрации ионов кальция установлено в ультразвуковом реакторе второго типа, где излучатели смонтированы в дно ванны. Одновременно наблюдается повышение температуры на 48–50 °C через 40 мин после озвучивания. Увеличение концентрации ионов кальция после озвучивания в течение 60 мин в реакторе первого типа составляет 8,75 % от исходной концентрации; в реакторе второго типа — 9,13 %.

Таким образом, при выборе условий УЗ обработки сточных вод необходимо учитывать увеличение концентраций малорастворимых соединений после озвучивания, что можно отнести к недостаткам УЗ технологии. Для исключения этого недостатка рекомендуется сточные воды подвергнуть фильтрованию для удаления взвешенных нерастворимых примесей.

Содержание катионов магния, железа, хрома, аммония после озвучивания сточных вод уменьшается. Наиболее эффективно удаляются ионы магния,

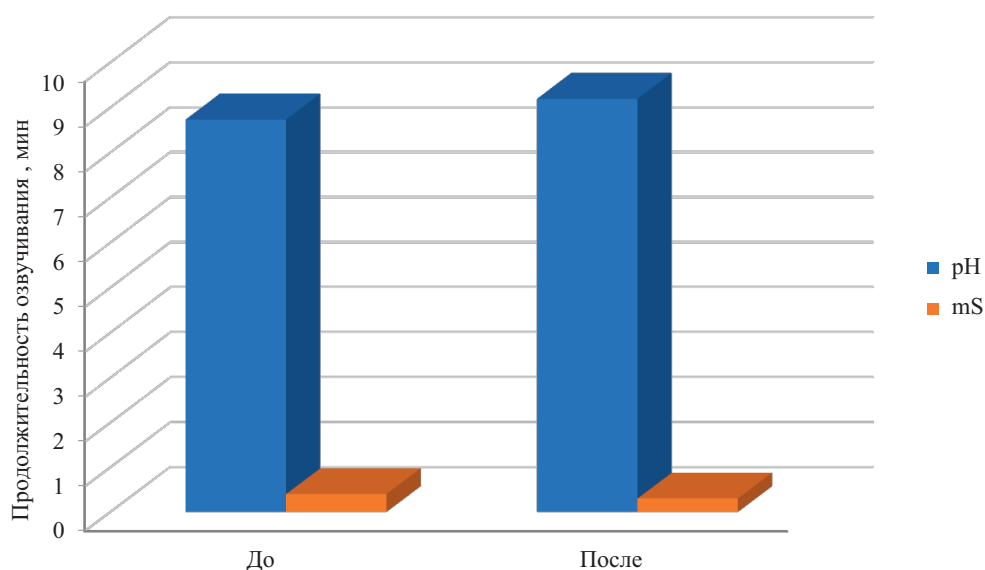


Рис. 5. Изменение значений pH и электропроводности (mS) при озвучивании гальваностокков во времени

хрома и аммония в контактном реакторе КР1. Такое расположение УЗ-излучателей обеспечивает более равномерное перемешивание гальваностокков во всех участках реактора и инициирование реакций массообмена с образованием осадков, что подтверждается увеличением массы осадков после озвучивания и уменьшением содержания в озвученных средах.

Наиболее эффективно снижаются в озвученных пробах воды концентрации ионов хрома. Эффективность очистки сточных вод от ионов хрома после 40-минутного озвучивания составляет 96–97 % в реакторе первого типа; в реакторе второго типа — 95–96 %. При дальнейшем увеличении времени озвучивания эффективность их очистки практически не изменяется. Ионы железа так же, как и ионы хрома, подвергаются гидролизу с образованием коллоидов, которые после отстаивания озвученных вод образуют осадки. Эффективность обработки гальваностокков в процессе их доочистки составляет для реактора первого типа — 88–89 %, для второго — 82–83 % при времени озвучивания 40 мин.

Выводы

1. Установлено, что при ультразвуковой обработке гальваностокков катионы и анионы, в них присутствующие, можно разделить на две группы. Представители первой группы (Mg^{+2} , Cr^{+3} , Fe^{+3} , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_2^-) подвергаются «глобулизации» и окислительно-восстановительным реакциям, что способствует технологической интенсификации и эффективности процесса очистки сточных вод. Для второй группы (Ca^{+2} , NO_3^-) под воздействием ультразвука наблюдается увеличение концентраций

при озвучивании от 5 до 60 мин. Это следует учитывать при моделировании и последующем проектировании технологического процесса ультразвуковой очистки сточных вод.

2. Полученные экспериментальные данные подтверждают, что ультразвук в режиме кавитации в сточной воде приводит к образованию активных радикалов, которые влияют на изменения pH воды: при 22 кГц в воде образуются гидроксильные радикалы HO^* и pH воды увеличивается.

3. При обработке сточной воды ультразвуком частотой 22 кГц и выше прослеживается изменение ее электропроводности, причем снижение электропроводности, в отличие от изменения pH, происходит не линейно, а через экстремумы.

4. Экспериментально установлено изменение температуры сточной воды, причем ее абсолютное значение зависит от количества энергии, вводимой при обработке воды, и способности стока поглощать ее. С увеличением продолжительности воздействия ультразвука происходит увеличение температуры на 5 °C через каждые 10 мин воздействия. Вводимая ультразвуковая энергия, затухая, поглощается водной средой, а часть этой поглощенной энергии переходит в тепловую. Зависимость повышения температуры сточной воды от продолжительности озвучивания имеет слабый экспоненциальный, а не линейный характер: со временем поглощение средой вводимой энергии увеличивается, т.е. ее сопротивление становится выше, и если раньше эта энергия шла на образование ультразвуковых потоков, то в дальнейшем состояние стока оказывается таким, что энергия «гаснет» в нем, в большей степени расходуясь нерационально, приводя к увеличению температуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кривобородова Е.Г. Очистка сточных вод от тяжелых металлов с использованием ультразвука : дис. ... канд. техн. наук. М., 2006. 137 с.
2. Nemelcov A.B., Zvyagintseva T.N., Shevchenko N.M., Rasin A.B., Ermacova S.P. Ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from brown Alga *Fucosevanescens*. Structure and biological activity of the new fucoidan fractions // *Journal of Applied Phycology*. 2018. Vol. 30. Issue 3. Pp. 2039–2046.
3. Попова Н.В., Соनावайн Ш., Абдуллина А.Р. Исследование влияния эффектов низкочастотного ультразвука на процессы сбраживания виноматериалов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии»*. 2019. Т. 7. № 1. С. 79–88.
4. Yang X., Li S., Oladejo A.O., Wang Y., Huang S., Zhou C. et al. Effects of ultrasound-assistant α -amylase degradation treatment with multiple modes on the extraction of rice protein // *Ultrasonic sonochemistry*. 2018. Vol. 40. Pp. 890–899.
5. Баранчиков А.Е., Иванов В.К., Третьяков Ю.Д. Сонохимический синтез неорганических материалов // *Успехи химии*. 2007. Т. 76. № 2. С. 147–168.
6. Suslick K.S. In *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. Wiley, New York, 1998. Vol. 26. Issue 4. P. 517.
7. Aslan D., Dogan M. The influence of ultrasound on the stability of dairy-based, emulsifier-free emulsions: rheological and morphological aspect // *European Food Research and Technology*. 2018. Vol. 244. Issue 3. Pp. 409–421.
8. Chemat F., Huma Z., Khan M.K. Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2010. Vol. 18 (4). Pp. 813–835. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2010.11.023
9. Попова Н.В., Фатеева С.А. Изучение влияния ультразвукового воздействия на показатели качества воды // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии»*. 2014. Т. 2. № 1. С. 3033.
10. Маргулис М.А. Звукохимия — новая перспективная область химии высоких энергий // *Химия высоких энергий*. 2004. Т. 38. № 3. С. 163–170.
11. Воропай Л.М., Денисова Д.С., Кузнецова О.Б., Соколов Л.И. Влияние ультразвука на катионный и анионный состав сточных вод // *Системные технологии*. 2024. № 2. С. 51.

Об авторах: Леонид Иванович Соколов — д-р техн. наук, главный научный сотрудник; Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); 127238, г. Москва, Локомотивный пр-д, д. 21; профессор кафедры «Строительство систем и сооружений водоснабжения и водоотведения»; Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ – РГГРУ); 117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; ORCID: 0000-0001-9635-8389, SPIN-код: 3010-5480, ResearcherID: B-1865-2017, Scopus AuthorID: 55891692500; e-mail: sokolovli@mail.ru;

Ирина Михайловна Смирнова — аспирант; Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ – РГГРУ); 117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; e-mail: mishinaira95@gmail.com;

Людмила Михайловна Воропай — канд. хим. наук, доцент кафедры биологии и химии; Вологодский государственный университет (ВГУ); 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; SPIN-код: 1655-1649; e-mail: voropailm@vogu35.ru.

REFERENCES

1. Krivoborodova E.G. *Wastewater treatment from heavy metals using ultrasound : Dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2006; 137. (rus.).
2. Nemelcov A.B., Zvyagintseva T.N., Shevchenko N.M., Rasin A.B., Ermacova S.P. Ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from brown Alga *Fucosevanescens*. Structure and biological activity of the new fucoidan fractions. *Journal of Applied Phycology*. 2018; 30(3):2039-2046.
3. Popova N.V., Sonavain S., Abdullina A.R. Investigation of the effects of low-frequency ultrasound on the fermentation of wine materials. *Bulletin of SUSU. The series "Food and biotechnology"*. 2019; 7(1):79-88. (rus.).
4. Yang X., Li S., Oladejo A.O., Wang Y., Huang S., Zhou C. et al. Effects of ultrasound-assistant α -amylase degradation treatment with multiple modes on the extraction of rice protein. *Ultrasonic sonochemistry*. 2018; 40:890-899.
5. Baranchikov A.E., Ivanov V.K., Tretyakov Yu.D. Sonochemical synthesis of inorganic materials. *Successes of chemistry*. 2007; 76(2):147-168. (rus.).
6. Suslick K.S. In *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. Wiley, New York, 1998; 26(4):517.
7. Aslan D., Dogan M. The influence of ultrasound on the stability of dairy-based, emulsifier-free emulsions: rheological and morphological aspect. *European Food Research and Technology*. 2018; 244(3):409-421.
8. Chemat F., Huma Z., Khan M.K. Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2010; 18(4):813-835. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2010.11.023

9. Popova N.V., Fateeva S.A. Studying the effect of ultrasound exposure on water quality indicators. *Bulletin of SUSU. The series "Food and biotechnology"*. 2014; 2(1):30-33. (rus.).
10. Margulis M.A. Sonochemistry: A New Promising Field of High-Energy Chemistry. *High-Energy Chemistry*. 2004; 38(3):163-170. (rus.).
11. Voropai L.M., Denisova D.S., Kuznetsova O.B., Sokolov L.I. The effect of ultrasound on the cationic and anionic composition of wastewater. *System Technologies*. 2024; 2:51. (rus.).

About the authors: **Leonid I. Sokolov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher at the Research; **Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokonotive passage, Moscow, 127238, Russian Federation; Professor of the Department "Construction of Water Supply and Sanitation Systems and Structures"; **Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University (MGRI – RGGRU)**; 23 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117485, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9635-8389, SPIN-code: 3010-5480, ResearcherID: B-1865-2017, Scopus AuthorID: 55891692500; e-mail: sokolovli@mail.ru;

Irina M. Smirnova — PhD student; **Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University (MGRI – RGGRU)**; 23 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117485, Russian Federation; e-mail: mishinaira95@gmail.com;

Lyudmila M. Voropai — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Biology and Chemistry; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenin st., Vologda, 160000, Russian Federation; SPIN-code: 1655-1649; e-mail: voropailm@vogu35.ru.