

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ/PHYSICAL CHEMISTRY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.45> EDN: ODIRHC

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ЦИНКОВАНИЕ В НИЗКОИНТЕНСИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЯХ

Научная статья

Зарембо Д.В.^{1,*}, Исаев П.П.², Зарембо В.И.³, Кирова А.А.⁴¹ ORCID : 0000-0002-6875-0161;³ ORCID : 0000-0003-4601-4777;^{1, 2, 3, 4} Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ndz[at]list.ru)

Предложена: 20.04.2026; Принята: 07.07.2026; Опубликовано: 17.07.2026

Аннотация

В промышленных условиях проведены исследования влияния низкоинтенсивного ультразвука на процесс электрохимического цинкования стальной сетки из цинкатного электролита. Методами растровой электронной микроскопии и рентгенофлуоресцентного микроанализа выполнен сравнительный анализ полученных цинковых покрытий. Установлено возрастание габаритной толщины и снижение пористости осажденных слоев. Рассматриваются современные представления об электропереносе в растворах, критикующие классическую теорию самопроизвольной электролитической диссоциации Аррениуса. Обсуждается механизм электропереноса в гальванических процессах, основанный на теориях Дж. Максвелла и Р.Р. Салема, и его приложение к цинкованию из цинкатного электролита.

Ключевые слова: самоорганизация, вихревые диссипативные структуры, низкоинтенсивный ультразвук, тензиопульсовая регуляция, синхронизация, электрохимическое цинкование, цинкатный электролит, проводимость электролитов, механизм электропереноса.

ELECTROCHEMICAL ZINC COATING IN LOW-INTENSITY ULTRASONIC FIELDS

Research article

Zaremba D.V.^{1,*}, Isaev P.P.², Zaremba V.I.³, Kirova A.A.⁴¹ ORCID : 0000-0002-6875-0161;³ ORCID : 0000-0003-4601-4777;^{1, 2, 3, 4} Saint-Petersburg State Institute of Technology, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (ndz[at]list.ru)

Suggested: 20.04.2026; Accepted: 07.07.2026; Published: 17.07.2026

Abstract

Studies have been carried out under industrial conditions to examine the effect of low-intensity ultrasound on the process of electrochemical zinc coating of steel mesh using a zincate electrolyte. A comparative analysis of the resulting zinc coatings was performed using scanning electron microscopy and X-ray fluorescence microanalysis. An increase in the overall thickness and a decrease in the porosity of the deposited layers were observed. Current views on electron transfer in solutions, which criticise Arrhenius's classical theory of spontaneous electrolytic dissociation, are examined. The mechanism of electric transport in galvanic processes, based on the theories of J. Maxwell and R.R. Salem, is discussed, along with its application to zinc plating from a zincate electrolyte.

Keywords: self-organisation, vortex dissipative structures, low-intensity ultrasound, stress pulse regulation, synchronisation, electrochemical zinc coating, zincate electrolyte, electrolyte conductivity, electric transfer mechanism.

Введение

Электролитическое цинкование — наиболее распространенный, рациональный и экономичный способ получения коррозионностойких металлических покрытий. Защитные свойства цинковых слоев определяют их толщина, равномерность, структура и химический состав, которые зависят от метода нанесения и условий проведения цинкования. Цинкатные электролиты уступают токсичным цианидным электролитам в производительности и качестве получаемых покрытий. Введение добавок позволяет улучшить характеристики цинкатных электролитов. Однако особенностями электроосаждения как из цинкатных электролитов в присутствии добавок, так и из цианидных электролитов являются высокая поляризация и поляризуемость, достаточно резкое падение выхода по току цинка с увеличением плотности тока, поэтому остаются актуальными работы, направленные на совершенствование технологий с целью уменьшения материальных, энергетических затрат и повышения качества цинковых слоев.

Для оптимизации гальваностегийных процессов применяют различные методы: подготовка электродов и электролита, выбор плотности тока и температуры, обеспечение конвекции в растворе. Применение ультразвуковых полей оказывает положительный эффект на структуру получаемых покрытий. Ультразвуковые поля высокой интенсивности создают объемные конвективные потоки, ускоряющие массообмен. В работе [1] было проведено осаждение цинка из кислого электролита в присутствии хлорида кобальта с ультразвуковым воздействием частотой 24

кГц. Применение ультразвуковой обработки позволило уменьшить размер зерна покрытия и пористость, что привело к увеличению коррозионной стойкости.

Низкоинтенсивные ультразвуковые поля принципиально отличаются от высокоинтенсивных по характеристикам и механизму воздействия. Метод регуляции процессов слабыми акустическими колебаниями ультразвукового диапазона, получивший название тензоимпульсной регуляции (ТИР) [2], позволяет повысить эффективность неравновесных физико-химических процессов, протекающих в открытой конденсированной системе. Регулятивное воздействие низкоинтенсивным ультразвуком осуществляется путем пространственно-временного упорядочивания самоорганизующихся диссипативных структур, возникающих в неравновесном процессе [3].

Методы и принципы исследования

Исследование влияния низкоинтенсивного ультразвука на процесс электрохимического цинкования из цинкатного электролита стальной сетки (СтЗ) с диаметром проволоки 4 мм проводилось на технологической линии ООО «Система 5» (г. Тверь). Ванна электролиза подключена к источнику постоянного тока мощностью 25 кВт. Параметры процесса: общая площадь деталей 14 м², плотность тока 1,4 А/дм², время 45 минут. Состав электролита: NaOH — 137,5 г/л, ZnO — 11,4 г/л, блескообразователь — 1 г/л. Цинковые покрытия получали в обычном режиме (без акустического воздействия) и в режимах с подачей сигнала определенной частоты.

Формирование низкоинтенсивного ультразвукового сигнала осуществлялось за счет подачи импульсов тока радиочастотного диапазона амплитудой до 1 А в выносную короткозамкнутую антенну-медиатор генератора электрического тока мощностью 50 Вт. Антенна-медиатор представляет собой одножильный металлический провод в твердой изоляции от внешних химических контактов. Она механически закреплялась на катоде гальванической ванны с помощью специальных зажимов. В силу эффекта электромагнитно-акустического преобразования [4] импульсы тока возбуждают в скин-слое проводника антенны ультразвуковые колебания такой же частоты с интенсивностью до 7 дБ, для которых все конденсированные среды являются дисперсивными.

После цинкования из сетки вырезали стержни длиной 5 мм и методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) исследовали структуру и толщину полученных покрытий. Для формирования электронно-микроскопического изображения использовали сигналы вторичных и отражённых электронов, которые позволяют получать соответственно морфологический и композиционный контраст. Элементный состав цинковых покрытий определялся методом рентгенофлуоресцентного микроанализа с использованием рентгеновского микроанализатора энергодисперсионного типа Link 860 при напряжении 25 кВ, токе зонда $2 \cdot 10^{-9}$ А за время 50 секунд.

Основные результаты

Толщина цинкового слоя (h_{cp}) рассчитывалась как среднее арифметическое значение из 6-ти измерений по всей длине образца. Доверительный интервал определения этой величины составил $\pm 0,3$ мкм. В таблице 1 представлена зависимость толщины покрытий от частоты низкоинтенсивного ультразвукового сигнала.

Таблица 1 - Зависимость толщины цинковых покрытий от частоты низкоинтенсивного ультразвукового сигнала

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.45.1>

Частота, кГц	h_{cp} , мкм
Без ТИР	7,8
50	8,0
100	11,5
200	10,2
500	8,2
1000	13,5
2000	8,7

Анализ данных таблицы 1 показывает увеличение толщины осажденных слоев практически во всех режимах, проведенных с применением метода ТИР, что свидетельствует об интенсификации процесса. При частоте 1000 кГц толщина покрытия возрастает в 1,7 раза по сравнению с контрольным образцом. На рисунке 1 представлены РЭМ-снимки полученных цинковых слоев.

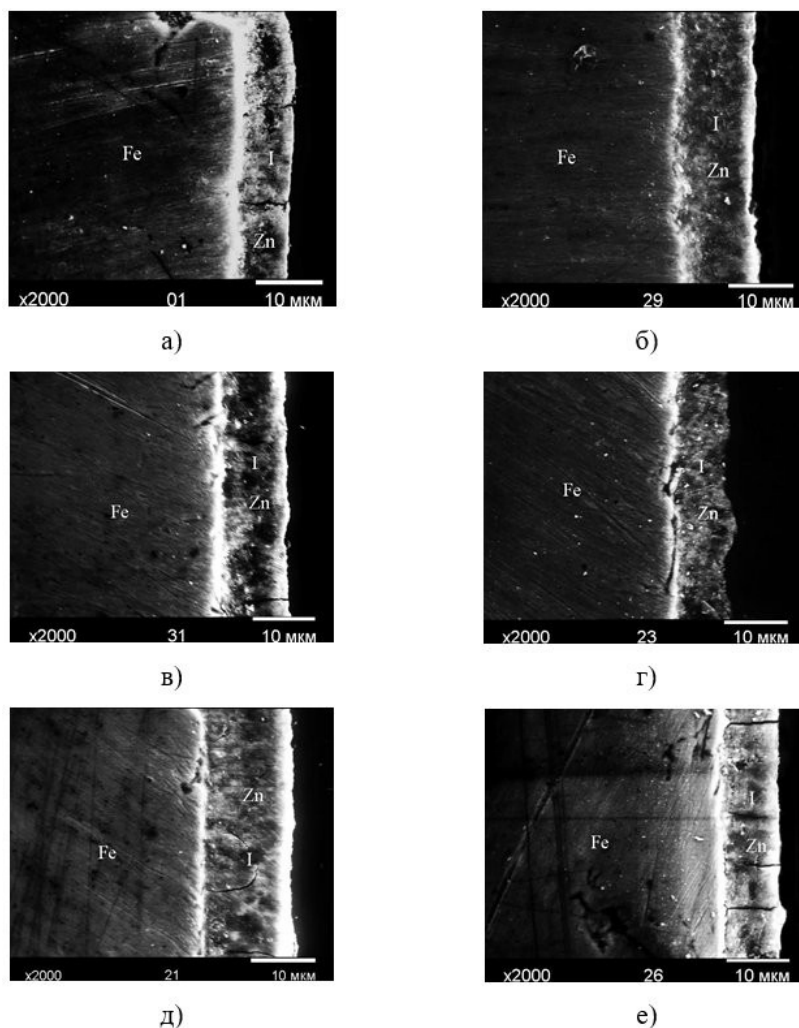


Рисунок 1 - Поперечные сечения цинковых покрытий, полученных в различных режимах:
 а) без ТИР; б) при 100 кГц; в) при 200 кГц; г) при 500 кГц; д) при 1000 кГц; е) при 2000 кГц
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.45.2>

Область проведения общего элементного микроанализа поперечных сечений цинковых покрытий на рисунке 1 обозначена символом «I». Результаты исследований представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Элементный состав цинковых покрытий при разных частотах низкоинтенсивного ультразвукового сигнала

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.45.3>

Элемент	Частота, кГц						
	Без ТИР, масс. %	50, масс. %	100, масс. %	200, масс. %	500, масс. %	1000, масс. %	2000, масс. %
Zn	96,3	95,8	96,4	95,9	96,2	96,1	96,2
Fe	1,6	1,8	1,5	1,7	1,6	1,7	1,7
O	1,3	1,3	1,4	1,3	1,4	1,3	1,2
S	0,8	1,1	0,7	1,1	0,8	0,9	0,9

Покрyтия содержат цинк, железо, кислород и серу, последняя, скорее всего, попадает в электролит с плохо промытыми деталями. Анализ таблицы 2 показывает, что низкоинтенсивный ультразвуковой сигнал не влияет на элементный состав слоев, который остается постоянным во всех исследованных режимах, учитывая погрешность метода.

Обсуждение

Обработка РЭМ-снимков с помощью программы VideoTest показала отличия в структуре цинковых слоев, сформированных в различных режимах. Покрyтие, полученное без акустического воздействия, рыхлое и неоднородное. Оно содержит много сквозных микротрещин, пор и каверн в подложке. Такое же покрyтие сформировалось и при частоте ТИР 50 кГц. При частотах 100 кГц и 200 кГц наблюдаются улучшения в структуре

слоев: сквозных трещин и дефектов меньше, размер пор составляет 2–4 мкм. Покрытие, полученное при 500 кГц, неравномерное по толщине, дублирует бугристую поверхность исходного материала, в нем есть сквозные трещины, но структура стала мелкозернистой и более однородной. Главным отличием слоя, образованного при частоте 1000 кГц, является отсутствие сквозных дефектов, есть трещины внутри покрытия размером около 5 мкм, пор значительно меньше по сравнению с контрольным образцом. При частоте 2000 кГц в покрытии сформировалось много больших сквозных и продольных трещин. Анализ таблицы 1 и РЭМ-снимков показал, что в исследованном процессе оптимальной частотой низкоинтенсивного ультразвука для получения толстых цинковых слоев с небольшим количеством пор и без сквозных дефектов является 1000 кГц.

В условиях далеких от термодинамического равновесия самоорганизация является одним из путей эволюции системы. Самоорганизующимися являются процессы, при которых возникают более сложные и совершенные структуры. В открытых системах в неравновесных условиях происходит образование диссипативных структур [5], [6] — высокоупорядоченных самоорганизующихся пространственно-временных образований, обладающих определенной формой, размерами и частотой вращения. Примером таких структур являются вихри Рэлея-Бенара, сфотографированные в межэлектродном пространстве электрохимической ячейки [7]. Они возникают в результате анизотропии среды. В процессе электрохимического цинкования низкоинтенсивный ультразвуковой сигнал определенной частоты согласовывает колебательно-вращательные движения и пространственно-временные характеристики диссипативных структур, что позволяет воздействовать на параметры процесса и свойства цинковых слоев. Метод ТИР позволяет повысить качество гальванических покрытий и эффективность электрохимического процесса практически без изменения существующей на предприятии технологии.

О механизме выделения на катоде металла из цинкатного электролита в классической электрохимии, предполагающей, что электроперенос осуществляется ионами, до сих пор нет полной ясности [8]. Существуют различные предположения [9], а физико-химические модели отсутствуют [10], [11]. Стандартная энтальпия электролитической диссоциации воды на ионы в рамках теории Аррениуса и Освальда составляет 55,8–60,0 кДж/моль. Энергия гомолитической диссоциации воды на радикалы по первой ступени равна 492–499 кДж/моль (5,17 эВ), что соответствует представлениям, развиваемым в работе [12], о том, что энергия диссоциации молекулы должна быть примерно в два раза больше ее энергии Гиббса образования, которая для воды составляет –237,24 кДж/моль. Энергия гомолитической диссоциации воды на радикалы по второй ступени равна 424–428 кДж/моль (4,43 эВ), а для полной атомизации воды на кислород и два водорода необходимо затратить 926,4 кДж/моль (9,6 эВ). В современных работах [13] показано, что средняя энергия ионизации воды электронным ударом составляет 16,95 эВ (1641 кДж/моль). Наблюдается несоответствие представлений Аррениуса и прямых экспериментальных исследований по диссоциации и ионизации воды, выполненных в последние десятилетия.

Описание механизма цинкования из щелочного цинкатного раствора также вызывает трудности в рамках классической теории Аррениуса о самопроизвольной электролитической диссоциации, доминирующей в электрохимии. Проблема заключается в следующем: каким образом возможно восстановление анионов на отрицательно заряженном электроде? Автор современной теории электрохимических процессов Р.Р. Салем предлагает оригинальную модель строения двойного электрического слоя, которая основывается на молекулярных представлениях о структуре растворителя и растворенного вещества и учитывает электронную плотность металла [10]. В работе [14] теоретически обоснована эмиссия электронов из катода в электролит, электрон используется как самостоятельный реагент окислительно-восстановительных реакций и один из компонентов электропереноса, а кондуктометр впервые рассмотрен как электролитический конденсатор.

Согласно уравнению непрерывности тока — полный ток через электрохимическую ячейку складывается из тока проводимости и тока смещения. Ток проводимости обусловлен действительным переносом электрических зарядов носителями тока, он в электрохимической ячейке минимален, им можно пренебречь. Ток смещения складывается из полевого («чистого») тока смещения — электромагнитного поля, величина которого не зависит от движения зарядов в растворе (вакуумный конденсатор), и из тока смещения (поляризации), обусловленного движением-колебанием (смещением) связанных зарядов (ионов), которые образуются в ходе электрохимических процессов на электродах. В общем случае, ток смещения есть частная производная по времени от индукции электрического поля. Электрохимический процесс восстановления и окисления на электродах является основным полевым компонентом тока смещения. Токи смещения протекают за счет изменения поляризации независимо от превращения веществ на электродах.

На железном аноде при цинковании из цинкатного электролита идет реакция окисления воды, образуются связанные заряды и носители вещества в растворе. Градиент концентраций веществ в приэлектродной области является составляющей движущей силы массопереноса в электрохимическом процессе. С другой стороны, изменение концентраций увеличивает электрическую индукцию в анодном пространстве, что и представляет собой реальные связанные заряды.

На катоде происходит восстановление цинка и водорода. Восстановление последнего протекает с большим перенапряжением, поэтому его вклад в суммарный процесс невелик. Эмитированные из катода электроны постадийно [8] восстанавливают цинк из молекул его цинкатного комплекса. В межэлектродном пространстве происходит массоперенос превращающихся на электродах молекул разных веществ (дополнительный вклад в поляризуемость).

Электрохимическая ванна (электролизер) является электролитическим конденсатором, а сам электролит — диэлектриком. Диэлектрики — непроводники электричества: в них, в отличие от металлов, нет зарядов, способных перемещаться на значительные расстояния. Под действием внешнего электрического поля заряды, входящие в состав диэлектрика, смещаются из положения равновесия в новые равновесные положения — поляризуются. Диэлектрик накапливает электрическую энергию. Электрическое состояние макроскопического объема диэлектрика, описывается вектором поляризации единицы объема системы и представляет собой векторную сумму электрических моментов



молекул, находящихся в данном объеме диэлектрика [14]. При рассмотрении электростатического поля с диэлектриком необходимо учитывать наличие связанных зарядов, поскольку основной вклад в электропроводность вносит полевая составляющая тока смещения. Плотность тока связанных зарядов (ток смещения) представляет также ток проводимости, то есть реальные заряды в движении. Единственное различие между плотностью обычного (сквозного) тока проводимости и плотностью тока связанных зарядов состоит в том, что первый определяется движущимися свободными зарядами, а второй — связанными. Практическое различие заключается в невозможности стационарного тока связанных зарядов в постоянном внешнем электрическом поле. В работе [14, С. 217–221] расчетами показано, что в электролизере протекает переменный ток, тогда на катоде должно происходить преобразование постоянного тока в переменный, а на аноде переменного в постоянный, что обеспечивает ненулевую составляющую тока смещения. В общем случае, кондуктометрическая, электролитическая и гальваническая ячейка — это электрический конденсатор без омической составляющей проводимости не зависимо от того, какой диэлектрической средой он заполнен — газовой, жидкой или твердой. Перенос заряда в электрохимической ванне носит полевой характер (электромагнитное поле) за счет токов смещения. Скорость переноса заряда равна скорости распространения магнитного поля, то есть скорости света в среде. А скорость массопереноса определяется движущей силой и кинетикой превращений, она носит нелинейный характер, не соизмерима со скоростью света и определяет перенесенное количество электричества.

Заключение

1. Обнаружен эффект регуляции низкоинтенсивными ультразвуковыми механическими колебаниями процесса электрохимического цинкования из цинкатного электролита стальной сетки в условиях действующего производства.
2. В исследованном процессе оптимальной частотой низкоинтенсивного ультразвукового сигнала для получения толстых цинковых покрытий без сквозных трещин и с небольшим количеством пор является 1000 кГц.
3. При описанных параметрах цинкования из цинкатного электролита происходит конвективный массоперенос веществ в приэлектродных зонах.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Ridošić M. The advantage of ultrasound during electrodeposition on morphology and corrosion stability of Zn-Co alloy coatings / M. Ridošić, E. García-Lecina, A. Salicio-Paz et al. // Transactions of the IMF. — 2020. — Vol. 98. — № 3. — P. 114–120.
2. Зарембо Д.В. Декомпозиция гиббсита из алюминатных растворов в низкоинтенсивных ультразвуковых полях / Д.В. Зарембо, А.А. Колесников, В.И. Зарембо // Физика и химия стекла. — 2023. — № 1. — С. 97–106. — DOI: 10.31857/S0132665122600492
3. Вешкурцев Ю.М. Зависимость стохастического резонанса в нелинейной системе от характеристик каждого слагаемого аддитивной смеси / Ю.М. Вешкурцев, Д.А. Титов, А.С. Табакова // Журнал радиоэлектроники. — 2023. — № 10. — DOI: 10.30898/1684-1719.2023.10.10
4. Каганов М.И. Электромагнитно-акустическое преобразование — результат действия поверхностной силы / М.И. Каганов, А.Н. Васильев // Успехи физических наук. — 1993. — № 10. — С. 67–80.
5. Печенкин А.И. Понятие диссипативной структуры. Кто его сформулировал? / А.И. Печенкин // Вопросы истории естествознания и техники. — 2023. — № 1. — С. 9–19. — DOI: 10.31857/S020596060024560-8
6. Сельченкова Н.И. Мультифрактальный анализ временных зависимостей образования диссипативных структур, возникающих в нелинейных системах различной физической природы / Н.И. Сельченкова, А.Я. Учаев // Ядерная физика и инжиниринг. — 2025. — № 6. — С. 895–906. — DOI: 10.56304/S2079562925060272
7. Весслер Г.Р. Оптическое и электрохимическое изучение диссипативных структур в растворах электролитов / Г.Р. Весслер, В.С. Крылов, П. Шварц и др. // Электрохимия. — 1986. — № 5. — С. 623–628.
8. Березин Н.Б. Кинетика и механизм восстановления комплексов цинка / Н.Б. Березин, Т.Н. Березина, Ж.В. Межевич // Вестник Казанского технологического университета. — 2014. — № 23. — С. 374–379.
9. Мамяченков С.В. Обзор результатов исследования электролитического получения цинковых порошков из щелочных растворов / С.В. Мамяченков, С.А. Якорнов, О.С. Анисимова и др. // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2019. — № 2. — С. 367–394.
10. Салем Р.Р. Парадоксы электрохимии и их разрешение / Р.Р. Салем // Журнал физической химии. — 2009. — № 11. — С. 2190–2198.
11. Литвинцев В.И. К истокам физики. Секреты квантового мира, элементарных частиц, пространства, гравитации / В.И. Литвинцев. — Новосибирск: Академпостер, 2024. — 136 с.
12. Ганкин В.Ю. Общая химия XXI век / В.Ю. Ганкин, Ю.В. Ганкин. — Москва: URRS, 2011. — 328 с.



13. Ковтун Ю.В. Средняя энергия ионизации молекул воды электронным ударом / Ю.В. Ковтун // Журнал технической физики. — 2015. — 8. — С. 6–14.
14. Салем Р.Р. Физическая химия. Начала теоретической электрохимии / Р.Р. Салем. — Москва: КомКнига, 2005. — 320 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ridošić M. The advantage of ultrasound during electrodeposition on morphology and corrosion stability of Zn-Co alloy coatings / M. Ridošić, E. García-Lecina, A. Salicio-Paz et al. // Transactions of the IMF. — 2020. — Vol. 98. — № 3. — P. 114–120.
2. Zarembo D.V. Dekompoziciya gibbsita iz alyuminatny'x rastvorov v nizkointensivny'x ul'trazvukovy'x polyax [Decomposition of gibbsite from aluminate solutions in low-intensity ultrasonic fields] / D.V. Zarembo, A.A. Kolesnikov, V.I. Zarembo // Physics and Chemistry of Glass. — 2023. — № 1. — P. 97–106. — DOI: 10.31857/S0132665122600492 [in Russian]
3. Veshkurcev Yu.M. Zavisimost' stoxasticheskogo rezonansa v nelinejnoj sisteme ot xarakteristik kazhdogo slagaemogo additivnoj smesi [Dependence of stochastic resonance in a nonlinear system on the characteristics of each additive mixture term] / Yu.M. Veshkurcev, D.A. Titov, A.S. Tabakova // Journal of Radio Electronics. — 2023. — № 10. — DOI: 10.30898/1684-1719.2023.10.10 [in Russian]
4. Kaganov M.I. E'lektromagnitno-akusticheskoe preobrazovanie — rezul'tat dejstviya poverxnostnoj sily' [Electromagnetic-acoustic transformation — the result of the action of surface force] / M.I. Kaganov, A.N. Vasil'ev // Physical Science Successes. — 1993. — № 10. — P. 67–80. [in Russian]
5. Pechenkin A.I. Ponyatie dissipativnoj struktury'. Kto ego sformuliroval? [Concept of dissipative structure. Who formulated it?] / A.I. Pechenkin // Questions of the history of natural science and technology. — 2023. — № 1. — P. 9–19. — DOI: 10.31857/S020596060024560-8 [in Russian]
6. Sel'chenkova N.I. Mul'tifraktal'ny'j analiz vremenny'x zavisimostej obrazovaniya dissipativny'x struktur, voznikayushhix v nelinejny'x sistemax razlichnoj fizicheskoj prirody' [Multifractal analysis of the time dependencies of the formation of dissipative structures arising in nonlinear systems of various physical nature] / N.I. Sel'chenkova, A.Ya. Uchaev // Nuclear physics and engineering. — 2025. — № 6. — P. 895–906. — DOI: 10.56304/S2079562925060272 [in Russian]
7. Vessler G.R. Opticheskoe i e'lektroximicheskoe izuchenie dissipativny'x struktur v rastvorax e'lektrolitov [Optical and electrochemical study of dissipative structures in electrolyte solutions] / G.R. Vessler, V.S. Kry'lov, P. Shvarcz et al. // Electrochemistry. — 1986. — № 5. — P. 623–628. [in Russian]
8. Berezin N.B. Kinetika i mexanizm vosstanovleniya kompleksov cinka [Kinetics and mechanism of zinc complex reduction] / N.B. Berezin, T.N. Berezina, Zh.V. Mezhevich // Bulletin of Kazan Technological University. — 2014. — № 23. — P. 374–379. [in Russian]
9. Mamyachenkov S.V. Obzor rezul'tatov issledovaniya e'lektroliticheskogo polucheniya cinkovy'x poroshkov iz shhelochny'x rastvorov [Overview of the Results of Electrolytic Production of Zinc Powders from Alkaline Solutions] / S.V. Mamyachenkov, S.A. Yakornov, O.S. Anisimova et al. // Bulletin of Irkutsk State Technical University. — 2019. — № 2. — P. 367–394. [in Russian]
10. Salem R.R. Paradoksy' e'lektroximii i ix razreshenie [Paradoxes in electrochemistry and their resolution] / R.R. Salem // Journal of Physical Chemistry. — 2009. — № 11. — P. 2190–2198. [in Russian]
11. Litvincev V.I. K istokam fiziki. Sekrety' kvantovogo mira, e'lementarny'x chasticz, prostranstva, gravitacii [To the origins of physics. Secrets of the quantum world, elementary particles, space, gravity] / V.I. Litvincev. — Novosibirsk: Akadempost, 2024. — 136 p. [in Russian]
12. Gankin V.Yu. Obshhaya ximiya XXI vek [General chemistry XXI century] / V.Yu. Gankin, Yu.V. Gankin. — Moscow: URSS, 2011. — 328 p. [in Russian]
13. Kovtun Yu.V. Srednyaya e'nergiya ionizacii molekul vody' e'lektronny'm udarom [Average ionization energy of water molecules by electron impact] / Yu.V. Kovtun // Journal of Technical Physics. — 2015. — 8. — P. 6–14. [in Russian]
14. Salem R.R. Fizicheskaya ximiya. Nachala teoreticheskoy e'lektroximii [Physical Chemistry. The Fundamentals of Theoretical Electrochemistry] / R.R. Salem. — Moscow: KomKniga, 2005. — 320 p. [in Russian]