 © Авторы статьи / Authors of the article

ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ/TECHNOLOGY OF ELECTROCHEMICAL PROCESSES AND CORROSION PROTECTION

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.42 EDN: DISWMY

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ СОРБЦИИ И ЭЛЕКТРОФЛОТАЦИИ ДЛЯ ОЧИСТКИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Научная статья

Джима С.[1, *], Бродский В.А.[2]
[1] ORCID : 0009-0008-5394-7122;
[1, 2] Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (solwegen555[at]gmail.com)

Предложена: 30.09.2026; Принята: 22.10.2026; Опубликована: 17.11.2026

Аннотация

В данной работе представлен анализ эффективности комбинированной сорбционной и электрофлотационной очистки многокомпонентных растворов сточных вод, содержащих пищевые красители и ионы тяжелых металлов. Подготовлен образец раствора сточной воды с суммарной концентрацией 100мг/л пищевых красителей и 100мг/л ионов Cu^{2+}, Ni^{2+}, Zn^{2+}. Методом спектрофотометрии изучены характеристики оптическое поглощение (А) пищевых красителей при различных концентрациях. Совместный сорбционный и электрофлотационный процесс очистки проводился в присутствии 100мг/л $FeCl_3$ и 100мг/л анионных (NaDDS) и катионных (катинол) ПАВ при pH 7 и pH 10. Установлено, что природа и концентрация пищевых красителей влияют на поглощение (А) пищевых красителей. В присутствии $FeCl_3$ при pH 7 наблюдалось более высокое извлечение пищевых красителей кармуазина (E122) (90,6%) и солочного заката (E110) (98,0%). В растворе сточных вод, содержащем ПАВ NaDDS, зафиксирована высокая эффективность извлечения ионов Ni и Zn, составившая 98,5 и 97,5% соответственно, при этом достигнуто 75,7% солнечного заката. С другой стороны, в присутствии ПАВ катинола наблюдалось извлечение Ni (99,7%) и Zn (98,8%). Кроме того, при получении основного действующего вещества катионита катинола эффективность извлечения пищевых красителей индигокармин (E132) (90,7%) и коричневый (E155) (97,3%) выше после 10-минутной совместной сорбции и электрофлотации по сравнению с ПАВ NaDDS. Результаты эксперимента свидетельствуют, что максимальная эффективность совместной сорбции и электрофлотации наблюдалась в присутствии катионного ПАВ катинола при pH 10 и в присутствии электролита Na_2SO_4 10г/л.

Ключевые слова: сорбция, электрофлотация, пищевые красители, тяжелые металлы, коагулянт, поверхностно-активное вещество, сточные воды.

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF COMBINED SORPTION AND ELECTROFLOTATION PROCESSES FOR THE TREATMENT OF MULTI-COMPONENT WASTEWATER

Research article

Jima S.[1, *], Brodskiy V.A.[2]
[1] ORCID : 0009-0008-5394-7122;
[1, 2] Dmitry Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (solwegen555[at]gmail.com)

Suggested: 30.09.2026; Accepted: 22.10.2026; Published: 17.11.2026

Abstract

The work presents an analysis of the effectiveness of a combined sorption and electroflotation treatment process for multi-component wastewater solutions containing food colourants and heavy metal ions. A wastewater solution sample was prepared with a total concentration of 100 mg/l of food colourants and 100 mg/l of Cu^{2+}, Ni^{2+} and Zn^{2+} ions. The optical absorption (A) characteristics of the food colourants at various concentrations were studied using spectrophotometry. A combined sorption and electroflotation treatment process was carried out in the presence of 100 mg/l $FeCl_3$ and 100 mg/l anionic (NaDDS) and cationic (Catinol) surfactants at pH 7 and pH 10. It was established that the nature and concentration of food colourants influence their optical absorption (A). In the presence of $FeCl_3$ at pH 7, higher recovery rates were observed for the food colourants carmoisine (E122) (90.6%) and sunset yellow (E110) (98.0%). In a wastewater solution containing the surfactant NaDDS, high extraction efficiencies of Ni and Zn ions were recorded, amounting to 98.5% and 97.5% respectively, with 75.7% of sunset yellow being extracted. On the other hand, in the presence of the surfactant catinol, Ni (99.7%) and Zn (98.8%) were extracted. Furthermore, when producing the main active ingredient of the cation exchange resin catinol, the extraction efficiency of the food colourants indigo carmine (E132) (90.7%) and brown (E155) (97.3%) was higher following 10 minutes of combined sorption and electroflotation compared with the surfactant NaDDS. The experimental results indicate that the maximum efficiency of combined sorption and electroflotation was observed in the presence of the cationic surfactant catinol at pH 10 and in the presence of 10 g/l Na_2SO_4 electrolyte.

Keywords: sorption, electroflotation, food colourants, heavy metals, coagulant, surfactant, wastewater.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Введение

В связи с ограниченностью ресурсов чистой воды и воздействием сточных вод на окружающую среду разработка новых технологий очистки сточных вод и совершенствование существующих методов очистки сточных вод являются ключевыми задачами ученых и специалистов по охране окружающей среды. За последние несколько лет были введены обновленные экологические протоколы для сохранения водных ресурсов [1].

Такие отрасли промышленности, как гальваника, металлургия, горнодобывающая, текстильная, бумажная, полиграфическая, кожевенная, пищевая и т. д., являются источниками токсичных ионов тяжелых металлов и красителей, которые генерируют значительный объем сточных вод. Присутствие тяжелых металлов и красителей в сточных водах даже в следовых количествах (менее 1 мг/л для большинства тяжелых металлов и 1мг/дм^3 для некоторых красителей) крайне нежелательно [2], [3], [4]. Современная переработка пищевых продуктов ввела широкий спектр как натуральных, так и синтетических пищевых красителей [5]. Натуральные пищевые красители получают из природных источников, таких как растения, животные и минералы, которые включают свекольный сок (красный), куркуму (желтый) и спирулину (сине-зеленый) [6]. Синтетические пищевые красители производятся искусственно, они включают тартразин (E102, желтый), очаровательный красный (E129, красный) и бриллиантовый синий (E133, синий) и, как правило, более яркие и стабильные, чем натуральные красители [7]. Выделение синтетических красителей приводит к образованию загрязненных сточных вод, характерной особенностью которых является интенсивная окрашенность. Окрашивание воды в водоеме, помимо отрицательного влияния на ее кислородный режим, способствует подавлению процесса самоочищения за счет изменения светопропускаемости воды и нарушения процессов фотосинтеза. Содержание в сточных водах красителей, окислителей, реагентов и поверхностно-активных веществ приводит к гибели населяющих их организмов и изменению органолептических свойств [8]. Однако прямой сброс сточных вод от красителей в окружающую среду может быть опасен, посколькусинтетические красители содержат канцерогенные вещества и тяжелые металлы, такие как хром (Cr), свинец (Pb) и медь (Cu) [9].

Побочные продукты и неиспользуемые вещества на производственных линиях промышленных предприятий сбрасываются со сточными водами, которые характеризуются изменениями цвета, биохимической потребности в кислороде (БПК), химической потребности в кислороде (ХПК), pH, температурой, мутностью и содержанием вредных химических веществ. Было документировано, что ряд промышленных сточных вод содержит различные типы красителей, которые имеют очень низкую биоразлагаемость из-за их высокой молекулярной массы и структуры [10], [11]. Более того, прямой сброс таких вод в канализационную сеть приводит к нарушению биологической очистки. Согласно исследованиям, такие сточные воды могут иметь широкий диапазон значений pH, высокие солевые напоры, такие как Na_2SO_4 и NaCl, и карбонаты.

Для соблюдения экологических норм и сохранения водных ресурсов были разработаны различные комбинации физических, химических и биологических методов. В последние годы электрохимические методы привлекли значительное внимание из-за их многообещающих возможностей дезактивации воды, показали большую новизну из-за своей универсальности и потенциальной экономической эффективности и предлагают самые многообещающие, чистые, безопасные, эффективные и зеленые технологии для обесцвечивания сточных вод. Очистка сточных вод с использованием электрохимических методов имеет фантастическое преимущество экологической совместимости, поскольку ее единственный реагент, т. е. электрон, является безопасным, чистым и зеленым реагентом, производимым на месте и работающим наиболее эффективно. Кроме того, эти методы привлекают внимание химиков-экологов из-за их превосходной эффективности, гибкости автоматизации и безопасной применимости к широкому спектру органических красителей [12].

Возможность использования электрофлотации и сорбции для сложных многокомпонентных сточных вод, даже с низкими концентрациями тяжелых металлов и красителей, делает эти методы более перспективными [13], [14], [15]. Электрофлотация — это электрохимическая технология, которая объединяет функции и преимущества традиционной коагуляции, флотации и электрохимии в очистке сточных вод. Исследования показали, что по сравнению с традиционной флотацией электрофлотация имеет много преимуществ, во-первых, ее мелкие пузырьки, которые равномерно распределены, тем самым увеличивая площадь контакта между хлопьями и пузырьками, делая осветление эффективным и быстрым. Во-вторых, она генерирует меньше шлама. В-третьих, она предлагает возможность автоматизации и простоту эксплуатации путем регулировки электрического тока. Кроме того, электрофлотационные установки небольшие, компактные и быстрые. Она требует меньших затрат на техническое обслуживание и эксплуатацию. Главное преимущество этого метода заключается в том, что для обработки не используются никакие химикаты, как при традиционной коагуляции. Она не занимает много времени, а овцы требуют обширного оборудования и обращения [16], [17], [18]. В процессе электрофлотации сточные воды очищаются от взвешенных частиц с помощью пузырьков газа, образующихся при электролизе воды, и использования растворимых электродов. На аноде образуются пузырьки кислорода, а на катоде — водорода. Поднимаясь в объеме воды, пузырьки всплывают на поверхность взвешенных частиц. Плотность образующихся агрегатов взвешенных частиц с прилипшими к ним пузырьками меньше плотности воды, что обусловливает их транспорт к поверхности жидкости и накопление там в виде пенного продукта, который периодически удаляется механическим путем [13]. С другой стороны, сорбционный метод очистки сточных вод является быстрым, эффективным, комплексным и регенеративным методом. Кроме того, простота его эксплуатации и широкий спектр применения делают его одной из широко используемых технологий очистки воды в последние годы [19]. Сорбция считается одним из лучших методов удаления красителей из сточных вод, уступая анионным или катионным свойствам красителя. Для удаления красителей из сточных вод используются различные природные и синтетические адсорбенты [20], [21], [22]. Термодинамические исследования [20] показывают, что процесс сорбции является несамопроизвольным и экзотермическим.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Целью данного исследования было изучение кинетики и эффективности комбинированных процессов сорбции и электрофлотации для очистки растворов сточных вод, содержащих различные виды пищевых красителей и ионы тяжелых металлов, при различных условиях.

Методы и принципы исследования

В качестве объекта исследования использовались модельные растворы, содержащие ионы тяжелых металлов Cu, Ni, Zn и синтетические красители, включая индигокармин E132 ($C_{16}H_{10}N_2O_8S_2$), кармуазин E122 ($C_{20}H_{12}N_2Na_2O_7S_2$), коричневый NT E155 ($C_{27}CH_{18}H_4Na_2O_9C_2$) и солнечный закат E110 ($C_{16}H_{10}Na_2O_7S_2N_2$). Для повышения эффективности процесса использовали солевой раствор (Na_2SO_4), коагулянты ($FeCl_3$), анионное ПАВ (NaDDS) и катионное ПАВ (катинол). Упомянутые загрязняющие вещества типичны для сточных вод, сбрасываемых предприятиями пищевой, текстильной, гальванической, кожевенной и металлообрабатывающей промышленности.

Исследовали комбинированную сорбционно-электрофлотационную эффективность извлечения ионов тяжелых металлов и пищевых красителей из модельных растворов, содержащих ионы Cu (II), Ni (II) и Zn (II) с общей концентрацией 100 мг/л и массовым соотношением металлов 1:1:1 в 500 мл дистиллированной воды. Раствор пробы вносили в сорбционный реактор объемом 500 мл и перемешивали с помощью магнитной мешалки BioSanMSH-300 в течение 20 минут. Раствор сточных вод пищевых красителей, содержащих индигокармин E132, кармоизин E122, коричневый NT E155 и солнечный закат E110 приготовленный индивидуально с использованием дистиллированной воды в концентрации 0,1, 0,25, 0,5, 1, 5, 10, 25, 50, 100, 250 и 500 мг/л для исследования поглощения методом спектрофотометрии на основе стандартной длины волны каждого пищевого красителя.

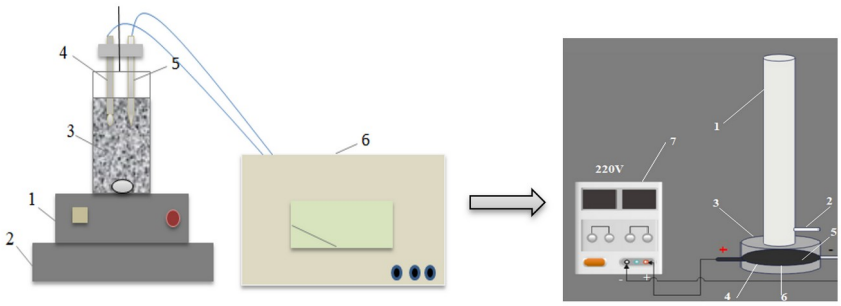
Для анализа влияния коагулянта $FeCl_3$ в концентрации 100 мг/л, а также для повышения эффективности процесса и оценки влияния ПАВ были использованы анионное ПАВ (NaDDS) и катионное ПАВ (катинол) в концентрации 100 мг/л в соотношении 1:1 к растворам сточных вод, содержащим ионы тяжелых металлов и пищевые красители.

В качестве сорбента используется активированный уголь БАУ-А (ТУ 20.59.54-001-44972796-2020), Основные характеристики: размер зерен: >1,5 мм — не более 25,0%; 0,5–1,5 мм — не менее 70,0%, насыпная плотность не более 240 г/дм^3, общий объем пор по воде не менее 1,6 см^3/г; массовая доля золы не более 10,0%; Сорбционная активность не менее 70% (по йоду). Сорбент добавляем из расчета 1 г на 100 мл раствора пробы сточных вод.

Процесс сорбции длился 30 минут в реакторе из термостатированного стекла объемом 1 литр с непрерывной магнитной мешалкой и регулятором pH (рисунок 1а). Затем следовал процесс электрофлотации. Электрофлотационная установка (рисунок 1б) изготовлена из стеклянной колонны (1) и имеет площадь поперечного сечения 10 см² и высоту 0,8м, способна обрабатывать 500 мл раствора. Пробоотборный клапан (2) расположен на высоте 40мм над электродным блоком (3). Электродный блок содержит нерастворимый анод (4) и катод (5), разделенные резиновой прокладкой (6). Анод изготовлен из ORTA (титановая пластина марки ВТ1 с пленочным покрытием из диоксида титана и рутения, нанесенным термическим разложением солевой смеси). Катод представляет собой сетку из нержавеющей стали толщиной проволоки 0,3 мм и размером ячейки 0,5×0,4 мм. Катод расположен над анодом, чтобы обеспечить свободное прохождение пузырьков кислорода через анод в колонну электрофлотатора. Аппарат питается от источника постоянного тока В5-48.

В сорбционный реактор вводили предварительно приготовленные модельные растворы, содержащие 100 мг/л пищевых красителей и 100 мг/л $CuSO_4$, $NiSO_4$, $ZnSO_4$, а также фоновый раствор соли Na_2SO_4. Отдельный эксперимент проводили в присутствии 100 мг/л коагулянта $FeCl_3$, 100 мг/л анионного ПАВ (NaDDS) и 100 мг/л катионного ПАВ (катинола). В отдельном эксперименте коагулянт $FeCl_3$ и ПАВ добавляли к образцу раствора и тщательно перемешивали с помощью магнитной мешалки BioSanMSH-300 (BIOSAN, Россия). pH раствора поддерживали на требуемом уровне с помощью pH-метра I-160 MI (ООО Измерительная техника, Россия). В реактор добавляли 10г/л активированного угля БАУ-А, и процесс сорбции продолжался в течение 30 минут. После 30 минут сорбции отбирали пробу для анализа, а раствор переносили в электрофлотационную колонку. Плотность тока электрофлотации поддерживали на уровне 0,2 А, и процесс длился 15 минут. Пробы отбирали через 2, 5, 10 и 15 минут. После 15 минут электрофлотации обработанную воду фильтровали через фильтровальную бумагу. Остаточные концентрации органических красителей и ионов тяжелых металлов определяли с помощью спектрофотометра PE-5300V и атомно-абсорбционного спектрофотометра KVANT-AFA соответственно.

 © Авторы статьи / Authors of the article



а б

Рисунок 1 - Схема экспериментальной установки:
а – сорбции в реакторе: *1* – магнитная мешалка; *2* – штатив; *3* – стакан с электролитом; *4* – стеклянный электрод; *5* – хлорсеребряный электрод; *6* – pH метр [15]; *б* – лабораторной электрофлотационной установки периодического действия: *1* – колонна электрофлотатора; *2* – вентиль для отбора проб; *3* – электродный блок; *4* – анод; *5* – катод; *6* – резиновая прокладка; *7* – источник постоянного тока [9]
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.42.1

Контролируемыми параметрами процесса являются: остаточные концентрации тяжелых металлов и примесей пищевых красителей в очищенных растворах. Эффективность процесса очистки оценивается по степени извлечения металлов α (%) и поглощению в спектрофотометрии.

Степень извлечения металлов (α, %) рассчитывают как отношение разницы между исходной и конечной концентрациями металлов в растворе (в связанной, ионной и молекулярной формах):

$$\alpha = \frac{C_{исх} - C_{кон}}{C_{кон}} \cdot 100\%$$

где и — начальная и конечная концентрация ионов металла, мг/л.

Поглощение растворов пищевых красителей до и после сорбции проводили на Спектрофотометре ПЭ-5300ВИ. Поглощение пищевых красителей определялось по их оптическим характеристикам на соответствующей длине волны каждого красители (Индигокрамин Е132 (410нм), Кармуазин Е122 (516нм), Коричневый НТ Е155 (570нм), Солнечный закат Е110 (600нм)).

Основные результаты

В данной разделе приведены результаты и обсуждение экспериментальных исследований. Результаты исследования показали, что поверхностный коагулянт $FeCl_3$ приводит к увеличению отношения массы к объему каолиновой плотности частиц красителя и простого аниона SO_3, связанного с пищевыми красителями в процессе гидролиза. Это существенно влияет на эффективность комбинированной сорбции и электрофлотации пищевых красителей. В результате молекулы пищевых красителей образуют хлопья, и в присутствии коагулянта начинается сродство к периодическим порам сорбента.

Присутствие $FeCl_3$ улучшает образование прочных флотационных хлопьев, которые желательны для разделения твердой и жидкой фаз при водоподготовке, поскольку высокая прочность минимизирует разрушение хлопьев и повышает эффективность удаления. Как видно на рисунке 2, комбинированная сорбция и электрофлотация пищевых красителей при pH = 7 выше, чем при pH = 10 (рис. 2b), особенно для красителей кармуазина (Е122) (90,6%) и солнечного заката (Е110) (98,0%). При pH 10 эффективность извлечения оказалась ниже, а максимальный объем извлеченного периодического пищевого красителя, кармуазина (свекольный Е122), составил 89%. Это указывает на то, что при наличии коагулянта $FeCl_3$ оптимальный диапазон pH для удаления многокомпонентных синтетических пищевых красителей из объединенного раствора сточных вод составляет 7.

 © Авторы статьи / Authors of the article

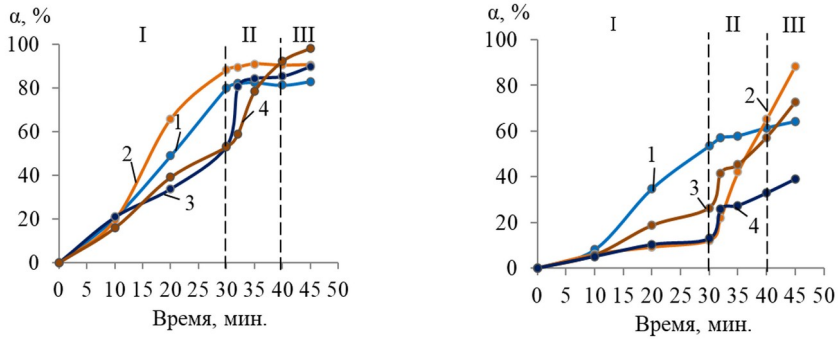


Рисунок 2 - Комбинированные процессы сорбции и электрофлотации для очистки пищевых красителей в присутствии коагулянта $FeCl_3$:
а – pH = 7; *б* – pH = 10; *1* – E132; *2* – E122; *3* – E155; *4* – E110; *I* – сорбция; *II* – электрофлотация; *III* – фильтрация
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.42.2

Примечание: условия эксперимента – $C_{красителя}$ = 100 мг/л; Conc. $_{БАУ-А}$ = 10 г/л; $t_{сорбции}$ = 30 минут; C_{Na2SO4} = 10 г/л; C_{FeCl3} = 100 мг/л

Кинетика электрофлотации с сорбцией в значительной степени зависит от природы поверхностно-активного вещества, присутствующего в растворе сточных вод. На рисунках 3а и 3б показано, что в растворе сточных вод кармуазин, E122, фракция ярко-желтого цвета (E110) и анионное поверхностно-активное вещество NaDDS степень извлечения ионов приводит к появлению Ni и Zn, достигая максимального извлечения 98,5% и 99,8% соответственно при pH раствора 10 через 30 минут обработки. Это удивительно, что ионы Ni и Zn инициируются в результате действия поверхностно-активных веществ, которые определяют их активность в связи с пористой структурой пленки адсорбента БАУ-А и анодной и катодной генерацией кислорода, а также образованием пузырьков кислорода и водорода в процессе электрофлотации, которые вместе с адсорбентом поднимают хлопья пищевого красителя и ионы металлов к поверхности электрофлотатора. Между тем, эффективность извлечения ионов меди была относительно ниже (97,5%) по сравнению с ионами никеля и цинка соответственно.

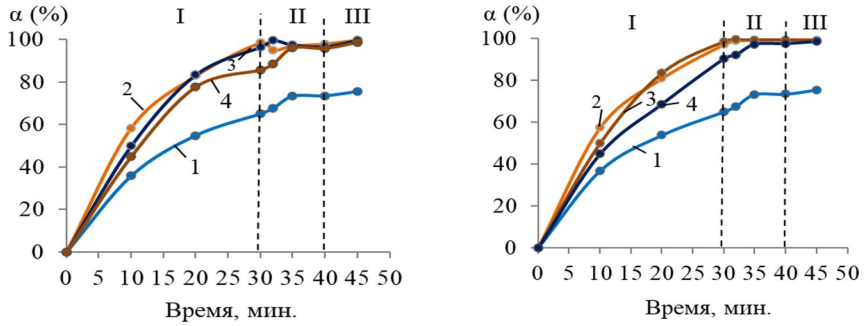


Рисунок 3 - Влияние анионного ПАВ (NaDDS) на комбинированные процессы сорбции и электрофлотации для очистки раствора, содержащего пищевые красители и ионы тяжелых металлов:
а – индигокармин (E132), *б* – солнечный закат (E110); *1* – E122; *2* – Ni; *3* – Zn; *4* – Cu; *I* – сорбция; *II* – электрофлотация; *III* – фильтрация
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.42.3

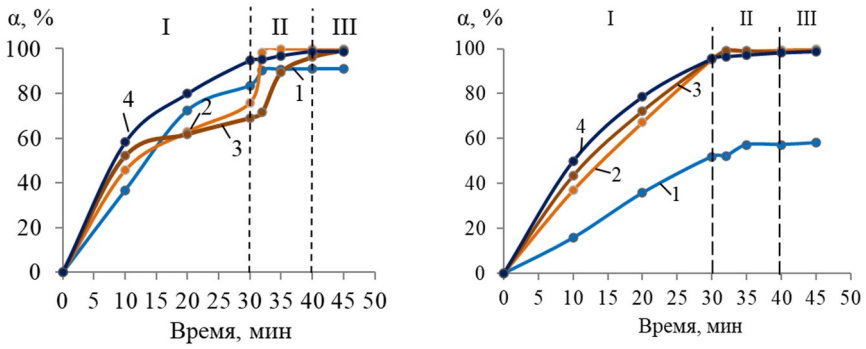
Примечание: условия экспериментов – pH = 10; $t_{сорбции}$ = 30 мин; $C_{БАУ-А}$ = 10 г/л; C_{Na2SO4} = 10 г/л; C_{NaDDS} = 100 мг/л

С другой стороны, комбинированная сорбция и электрофлотационное извлечение пищевых красителей являются универсальными и сильно зависят от природы и количества пищевых красителей. Было отмечено, что наибольшая эффективность извлечения была достигнута для многокомпонентных красителей кармуазина, порошкообразного красителя E122 (77,6%) и солнечный закат (75,5%) в присутствии катионного текстильного поверхностно-активного вещества NaDDS.

В растворе, содержащем катионное поверхностно-активное вещество катионол, эффективность извлечения ионов Ni методом сорбции и электрофлотации чрезвычайно высока и достигает 99,9%. Это указывает на то, что ионы Ni взаимодействуют с катионными поверхностно-активными веществами преимущественно за счет электростатического притяжения и сильного образования мицелл, способствуя дисперсии наночастиц. Катионное поверхностно-активное

 © Авторы статьи / Authors of the article

вещество облегчает сродство ионов Ni к поверхности пор сорбента и эффективно предотвращает их десорбцию в процессе сорбции. Было показано, что для ионов Zn и Cu эффективность извлечения достигает 99,4%, а для сорбента — 98,8% после 40 минут и процесса фильтрации соответственно (рисунок 4).



а б

Рисунок 4 - Влияние анионного ПАВ (Катинол) на комбинированные процессы сорбции и электрофлотации для очистки раствора, содержащего пищевые красители:
а – индигокармин (Е132); *б* – солнечный закат (Е110); *1* – Е122; *2* – Ni; *3* – Zn; *4* – Cu; *I* – сорбция; *II* – электрофлотация; *III* – фильтрация
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.42.4

Примечание: условия экспериментов – pH = 10; $t_{сорбции}$ = 30 мин; $C_{БАУ-А}$ = 10 г/л; C_{Na2SO4} = 10 г/л; $C_{Катинол}$= 100 мг/л

ПАВ взаимодействуют с ионами цинка, образуя эффективные гидрофобные структуры, которые прикрепляются к пузырькам кислорода и водорода, что позволяет удалять их методом флотации вместе с сорбентом в верхней части электрофлотационной колонны. Более того, благодаря гидрофобизации анодной поверхности частиц вследствие сорбции меньшего количества катионных поверхностно-активных веществ на поверхности сорбционных гидроксидов, эффективность извлечения ионов металлов возросла. Помимо большинства ионов металлов, в растворе, содержащем катинол в качестве поверхностно-активного вещества, эффективность извлечения пищевых красителей индиго, кармина (Е132) (90,7%) и коричневого NT (Е155) (97,3%) выше после 30 минут сорбции при комбинированной сорбции-электрофлотации катионных веществ по сравнению с раствором, содержащим суспензию NaDDS в качестве поверхностно-активного вещества (рисунок 4а). Это указывает на то, что природа поверхностно-активного вещества и пищевого красителя влияет на эффективность удаления при комбинированной обработке сорбцией и электрофлотацией.

В таблице 1 представлены полученные результаты эксперимента в примутствии ПАВ различной природвы в качестве флокулирующей добавки. Полученные результаты свидетельствуют о том, что максимальная эффективность извлечения сорбционно-электрофлотационным методом достигается в присутствии катионного поверхностно-активного вещества катинола. Степень извлечения Ni и Zn выше — 99% при pH раствора = 10. Отмечено, что катионное поверхностно-активное вещество может улучшить очистку сточных вод за счет повышения активности ионов металлов по отношению к пористой структуре активированного угля и удаления загрязняющих веществ посредством фракционирования пены, а также за счет улучшения миграции образованного комплекса сорбент-загрязнитель к поверхности анода и катода, образующихся пузырьков газа в процессе электрофлотации. Степень извлечения ионов Cu относительно ниже — 98%.

Таблица 1 - Эффективность комбинированной сорбционной и электрофлотационной очистки сточных вод с последующей фильтрацией в присутствии ПАВ анионной и катионной природы

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.42.5

Система	Степень извлечения (α, %)					
	Без ПАВ		ПАВ NaDDS (А)		ПАВ Катинол (К)	
	pH = 7	pH = 10	pH = 7	pH = 10	pH = 7	pH = 10
E132/Ni/ Zn/Cu	60/46/ 45/72	29/69/ 66/74	67/98/ 97/98	29/98/ 98/97	64/99/ 98/95	90/99/ 99/98
E122/Ni/ Zn/Cu	67/86/ 83/77	31/87/ 85/82	91/99/ 99/97	31/98/ 98/96	78/97/ 95/92	47/99/ 98/97
E155/Ni/ Zn/Cu	40/79/ 78/67	37/85/ 80/72	54/94/ 94/92	37/97/ 97/96	23/98/ 98/97	97/99/ 99/98
E110/Ni/	40/82/	25/83/	84/99/	65/99/	38/98/	55/99/

 © Авторы статьи / Authors of the article

Система	Степень извлечения (α, %)					
	Без ПАВ		ПАВ NaDDS (A)		ПАВ Катинол (К)	
	pH = 7	pH = 10	pH = 7	pH = 10	pH = 7	pH = 10
Zn/Cu	79/62	78/64	98/94	98/97	98/96	99/98

Примечание: сорбент БАУ-А = 10г/л; ПАВ = 100мг/л; время сорбции = 30минут; Na2SO4 = 10г/л

С другой стороны, комбинированная сорбция и электрофлотационное извлечение пищевых красителей являются универсальными и зависят от природы и количества функциональных источников группы пищевых красителей. Отмечено, что максимальная эффективность извлечения пищевых красителей кармозина Е122, (87%) и желтого солнечного заката Е110, (97%) достигается в присутствии катинола при pH раствора 10. В процессе сорбции-электрофлотации сила электростатического притяжения, создаваемая катионным поверхностно-активным веществом к пористой структуре сорбента, повышает эффективность процесса очистки. В то же время для остальных пищевых красителей эффективность извлечения ниже, что свидетельствует о существенном влиянии природы пищевого красителя на эффективность процесса очистки.

Заключение

Установлено, что комбинированный процесс сорбции-электрофлотации эффективен для удаления ионов тяжелых металлов в присутствии катионного ПАВ катинола. Максимальное извлечение ионов Ni свыше 99,5% зафиксировано в присутствии как NaDDS, так и катинола при pH 10. Так же в присутствии коагулянта $FeCl_3$ при pH = 7 и катионного ПАВ Катинола при pH 10 достигается максимальная эффективность извлечении пищевого красителя «Солнечный закат» комбинированным методом (97–98%).

pH раствора существенно влияет на эффективность извлечения сорбционных и электрофлотационных процессов, изменяя электростатические характеристики адсорбентов и компонентов сточных вод. Оптимальное значение pH практически во всех случаях оказалось равным 10.

Показано, что технология углеадсорбционной очистки в реакторе с последующей электрофлотацией и доочисткой в колоннах с загрузкой активного угля эффективна для сточных вод, загрязнённых органическими соединениями и ионами тяжёлых металлов и позволяет очищать воду до нормативов ПДК рх.

Дополнительные материалы

Дополнительные материалы доступны на онлайн-странице статьи.

Supplementary materials

Supplementary materials are available online on the article's webpage.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.42.6

Review

Community of Reviewers of the International Research Journal

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.42.6

Список литературы / References

1. Kolesnikov A.V. Establishment of regularities of electroflotation extraction of non-ferrous metal (Cu, Ni, Zn, Co, Fe) hydroxides from wastewater of various compositions in the presence of industrial surfactants / A.V. Kolesnikov, A. Pyae, T.V. Davydkova [et al.] // Non-ferrous Metals. — 2021. — Vol. 1. — P. 3–9.

2. Soldatkina L.M. Kinetics of adsorption of water-soluble dyes on active carbons / L.M. Soldatkina, E.V. Sagaidak // J. Water Chem. Technol. — 2010. — Vol. 32. — № 4. — P. 212–217. — DOI: 10.3103/S1063455X10040041.

3. Aung H.T. Electroflotation extraction of a heavy metal hydroxide mixture from a multi-component solution / H.T. Aung, A.V. Kolesnikov, Y.M. Averina [et al.] // Ecology and Recycling. CIS Iron and Steel Review. — 2024. — Vol. 28. — P. 99–103.

4. Bal G. Distinct of of dyes. A review / G. Bal, A. Thakur // Proceedings. — 2022. — Vol. 50. — P. 1575–1579.

5. Novais C. Natural food colorants and preservatives A review, a demand, and a challenge / C. Novais, A.K. Molina, R.M.V. Abreu [et al.] // Journal of Agricultural and Food Chemistry. — 2022. — Vol. 70. — № 9. — P. 2789–2805.

6. Silva M.M. Food colour additives: A Synoptical overview on their chemical properties, applications in food products, and health side effects / M.M. Silva, F.H. Reboredo, F.C. Lidon // Foods. — 2022. — Vol. 11. — № 3. — 379 p.

7. Kumar A. Lead toxicity: health hazards, influence on food chain, and sustainable remediation approaches / A. Kumar, A.K. Chaturvedi, A.A. Shabnam [et al.] // International journal of environmental research and public health. — 2020. — Vol. 17. — № 7. — 2179 p.

8. Alfei S. Cationic polystyrene-based hydrogels as efficient adsorbents to remove methyl orange and fluorescein dye pollutants from industrial wastewater / S. Alfei, F. Grasso, V. Orlandi [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. — 2023. — Vol. 24. — № 3. — 2948 p.

9. Колесников В.А. Электрофлотация в очистке сточных вод от нефтепродуктов, красителей, ПАВ, лигандов и биологических загрязнений. Обзор / В.А. Колесников, В.И. Ильин, А.В. Колесников // Теоретические основы химической технологии. — 2019. — Т. 53. — № 2. — С. 205–228.

 © Авторы статьи / Authors of the article

10. Gonçalves M.V.B. Electrocoagulation/electroflotation Process Applied to Decolourization of a Solution Containing the Dye Yellow Sirius K-CF / M.V.B. Gonçalves, S.C. De Oliveira, B.M.P.N. Bruna [et al.] // Int. J. Electrochem. Sci. — 2016. — Vol. 11. — P. 7576–7583. — DOI: 10.20964/2016.09.42.

11. Pirkarami A. Removal of dye from industrial wastewater with an emphasis on improving economic efficiency and degradation mechanism / A. Pirkarami, M.E. Olya // J. Saudi Chem. Soc. — 2017. — Vol. 21. — P. 179–186.

12. Martínez-Huitle C. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review / C. Martínez-Huitle, E. Brillas // Applied Catalysis B: Environmental. — 2009. — Vol. 87. — P. 105–145. — DOI: 10.1016/j.apcatb.2008.09.017.

13. Колесников В.А. Электрофлотационная технология очистки сточных вод промышленных предприятий / В.А. Колесников, В.И. Ильин, Ю.И. Капустин [и др.]; под ред. В.А. Колесникова. — Москва: Химия, 2007. — 303 с.

14. Senol Z.M. Removal of food dyes using biological materials via adsorption: A review / Z.M. Senol, N.El. Messaoudi, Z. Cigeroglu [et al.] // Food Chemistry. — 2024. — Vol. 450. — P. 1–23.

15. Queiroz M.T.A. Restructuring in the flow of textile wastewater treatment and its relationship with water quality in Doce River, MG, Brazil / M.T.A Queiroz, L.B. Alvim, M.G. Sabará [et al.] // Gestão&Produção. — 2019. — Vol. 26. — № 1. — P. 1–14.

16. Милютина А.Д. Электрофлотационное извлечение высокодисперсных углеродных материалов из водных растворов в присутствии ПАВ и ионов цветных металлов: дис. ... канд. техн. наук / Милютина Алёна Дмитриевна. — Москва: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2018. — 192 с.

17. Petsriprasit C. Application of the electrocoagulation technique for treating heavy metals containing wastewater from the pickling process of a billet plant / C. Petsriprasit, J. Namboonmee, M. Hunsom // Korean Journal of Chemical Engineering. — 2010. — Vol. 27. — № 3. — P. 854–861.

18. Nandi B.K. Effects of operational parameters on the removal of brilliant green dye from aqueous solutions by electrocoagulation / B.K. Nandi, S. Patel // Arabian Journal of Chemistry. — 2017. — Vol. 10. — P. 2961–2968.

19. Ye Q. Removal of heavy metals from wastewater using biochars: adsorption and mechanisms / Q. Ye, Q. Li, X. Li // Environmental Pollutants and Bioavailability. –2022. — Vol. 34. — № 1. — P. 385–394.

20. Ольшанская Л.Н. Повышение эффективности очистки хромсодержащих сточных вод гальванопроизводств / Л.Н. Ольшанская, И.А. Тильтигин, Т.В. Осипова // Инноватика и экспертиза. — 2020. — Вып. 1 (29). — DOI: 10.35264/1996-2274-2020-1-144-151.

21. Katowah D.F. A new ternary nanocomposites-based cellulose derivatives-$CuFe_2O_4$-zeolite with ultra-high adsorption capacity for Brilliant Green dye treatment and removal from the aquatic environment / D.F. Katowah, H.K. Alzahrani // Journal of Saudi Chemical Society. — 2023. — Vol. 27. — № 6. — Art. 101764.

22. Jawad A.H. Hybrid multifunctional biocomposite of chitosan grafted benzaldehyde/montmorillonite/algae for effective removal of brilliant green and reactive blue 19 dyes: Optimization and adsorption mechanism / A.H. Jawad, A.S. Abdulhameed, S.N. Surip [et al.] // Journal of Cleaner Production. — 2023. — Vol. 393. — Art. 136334.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kolesnikov A.V. Establishment of regularities of electroflotation extraction of non-ferrous metal (Cu, Ni, Zn, Co, Fe) hydroxides from wastewater of various compositions in the presence of industrial surfactants / A.V. Kolesnikov, A. Pyae, T.V. Davydkova [et al.] // Non-ferrous Metals. — 2021. — Vol. 1. — P. 3–9.

2. Soldatkina L.M. Kinetics of adsorption of water-soluble dyes on active carbons / L.M. Soldatkina, E.V. Sagaidak // J. Water Chem. Technol. — 2010. — Vol. 32. — № 4. — P. 212–217. — DOI: 10.3103/S1063455X10040041.

3. Aung H.T. Electroflotation extraction of a heavy metal hydroxide mixture from a multi-component solution / H.T. Aung, A.V. Kolesnikov, Y.M. Averina [et al.] // Ecology and Recycling. CIS Iron and Steel Review. — 2024. — Vol. 28. — P. 99–103.

4. Bal G. Distinct of of dyes. A review / G. Bal, A. Thakur // Proceedings. — 2022. — Vol. 50. — P. 1575–1579.

5. Novais C. Natural food colorants and preservatives A review, a demand, and a challenge / C. Novais, A.K. Molina, R.M.V. Abreu [et al.] // Journal of Agricultural and Food Chemistry. — 2022. — Vol. 70. — № 9. — P. 2789–2805.

6. Silva M.M. Food colour additives: A Synoptical overview on their chemical properties, applications in food products, and health side effects / M.M. Silva, F.H. Reboredo, F.C. Lidon // Foods. — 2022. — Vol. 11. — № 3. — 379 p.

7. Kumar A. Lead toxicity: health hazards, influence on food chain, and sustainable remediation approaches / A. Kumar, A.K. Chaturvedi, A.A. Shabnam [et al.] // International journal of environmental research and public health. — 2020. — Vol. 17. — № 7. — 2179 p.

8. Alfei S. Cationic polystyrene-based hydrogels as efficient adsorbents to remove methyl orange and fluorescein dye pollutants from industrial wastewater / S. Alfei, F. Grasso, V. Orlandi [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. — 2023. — Vol. 24. — № 3. — 2948 p.

9. Kolesnikov V.A. Elektroflotatsiya v ochistke stochnikh vod ot nefteproduktov, krasitelei, PAV, ligandov i biologicheskikh zagryaznenii. Obzor [Electroflotation in the treatment of wastewater containing petroleum products, dyes, surfactants, ligands and biological contaminants. A review] / V.A. Kolesnikov, V.I. Ilin, A.V. Kolesnikov // Teoreticheskie osnovi khimicheskoi tekhnologii [Theoretical Foundations of Chemical Technology]. — 2019. — Vol. 53. — № 2. — P. 205–228. [in Russian]

10. Gonçalves M.V.B. Electrocoagulation/electroflotation Process Applied to Decolourization of a Solution Containing the Dye Yellow Sirius K-CF / M.V.B. Gonçalves, S.C. De Oliveira, B.M.P.N. Bruna [et al.] // Int. J. Electrochem. Sci. — 2016. — Vol. 11. — P. 7576–7583. — DOI: 10.20964/2016.09.42.

 © Авторы статьи / Authors of the article

11. Pirkarami A. Removal of dye from industrial wastewater with an emphasis on improving economic efficiency and degradation mechanism / A. Pirkarami, M.E. Olya // J. Saudi Chem. Soc. — 2017. — Vol. 21. — P. 179–186.

12. Martínez-Huitle C. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review / C. Martínez-Huitle, E. Brillas // Applied Catalysis B: Environmental. — 2009. — Vol. 87. — P. 105–145. — DOI: 10.1016/j.apcatb.2008.09.017.

13. Kolesnikov V.A. Elektroflotatsionnaya tekhnologiya ochistki stochnikh vod promishlennikh predpriyatii [Electroflotation technology for the treatment of industrial wastewater] / V.A. Kolesnikov, V.I. Ilin, Yu.I. Kapustin [et al.]; ed. by V.A. Kolesnikov. — Moscow: Khimiya, 2007. — 303 p. [in Russian]

14. Senol Z.M. Removal of food dyes using biological materials via adsorption: A review / Z.M. Senol, N.El. Messaoudi, Z. Cigeroglu [et al.] // Food Chemistry. — 2024. — Vol. 450. — P. 1–23.

15. Queiroz M.T.A. Restructuring in the flow of textile wastewater treatment and its relationship with water quality in Doce River, MG, Brazil / M.T.A Queiroz, L.B. Alvim, M.G. Sabará [et al.] // Gestão&Produção. — 2019. — Vol. 26. — № 1. — P. 1–14.

16. Milyutina A.D. Elektroflotatsionnoe izvlechenie visokodispersnikh uglerodnikh materialov iz vodnikh rastvorov v prisutstvii PAV i ionov tsvetnikh metallov [Electroflotation extraction of highly dispersed carbon materials from aqueous solutions in the presence of surfactants and non-ferrous metal ions]: diss. ... PhD in Technical Sciences / Milyutina Alyona Dmitrievna. — Moscow: RCTU named after D.I. Mendeleev, 2018. — 192 p. [in Russian]

17. Petsriprasit C. Application of the electrocoagulation technique for treating heavy metals containing wastewater from the pickling process of a billet plant / C. Petsriprasit, J. Namboonmee, M. Hunsom // Korean Journal of Chemical Engineering. — 2010. — Vol. 27. — № 3. — P. 854–861.

18. Nandi B.K. Effects of operational parameters on the removal of brilliant green dye from aqueous solutions by electrocoagulation / B.K. Nandi, S. Patel // Arabian Journal of Chemistry. — 2017. — Vol. 10. — P. 2961–2968.

19. Ye Q. Removal of heavy metals from wastewater using biochars: adsorption and mechanisms / Q. Ye, Q. Li, X. Li // Environmental Pollutants and Bioavailability. –2022. — Vol. 34. — № 1. — P. 385–394.

20. Olshanskaya L.N. Povishenie effektivnosti ochistki khromsoderzhashchikh stochnikh vod galvanoproizvodstv [Improving the efficiency of treatment of chromium-containing effluent from electroplating plants] / L.N. Olshanskaya, I.A. Tiltigin, T.V. Osipova // Innovatika i ekspertiza [Innovation and Expertise]. — 2020. — Iss. 1 (29). — DOI: 10.35264/1996-2274-2020-1-144-151. [in Russian]

21. Katowah D.F. A new ternary nanocomposites-based cellulose derivatives-$CuFe_2O_4$-zeolite with ultra-high adsorption capacity for Brilliant Green dye treatment and removal from the aquatic environment / D.F. Katowah, H.K. Alzahrani // Journal of Saudi Chemical Society. — 2023. — Vol. 27. — № 6. — Art. 101764.

22. Jawad A.H. Hybrid multifunctional biocomposite of chitosan grafted benzaldehyde/montmorillonite/algae for effective removal of brilliant green and reactive blue 19 dyes: Optimization and adsorption mechanism / A.H. Jawad, A.S. Abdulhameed, S.N. Surip [et al.] // Journal of Cleaner Production. — 2023. — Vol. 393. — Art. 136334.