

О возможности применения современных реагентов-осадителей для извлечения ионов тяжелых металлов из сточных вод гальванического производства

С.С. Курилин¹, Т.А. Курилина^{2✉}, Т.Я. Пазенко³, Е.Л. Войтов⁴

^{1,2,3}Инженерно-строительный институт Сибирского федерального университета,
Красноярск, Россия

⁴Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
Новосибирск, Россия

Аннотация. В настоящее время любой технологический процесс определяется не только производственными показателями, но и экологической безопасностью, которая может быть достигнута с применением новых технологий, методов, современных реагентов и т. д. В статье проанализированы аспекты возможного использования реагентов-осадителей ионов тяжелых металлов фирмы Plexon: Plexon 3315, Plexon 2210 и Plexon 5020, а также органический реагент-осадитель Plexon 9015 (смесь полиэтиленимина и дитиокарбамата). Применение этих реагентов позволяет осуществлять безопасную технологию, соответствующую всем современным нормам и требованиям. Реагенты фирмы Plexon способны создавать комплексы с ионами тяжелых металлов за непродолжительное время реакции, что приводит к значительному снижению количества загрязненных сточных вод и уменьшению объема сооружений. Лабораторные исследования были проведены на разработанной полупроизводственной установке для очистки сточных вод, содержащих ионы металлов с применением универсальной профессиональной дозирующей системы Diversey. Для понимания механизма комплексообразования ионов тяжелых металлов с предлагаемыми реагентами были получены дифрактограммы образцов реагентов с использованием метода рентгенофазового анализа. Как правило, дозировка реагентов зависит от вида осаждаемого металла, его концентрации и используемых комплексообразующих реагентов, что нашло подтверждение в полученных уравнениях регрессии. В ходе эксперимента наблюдается хорошая сопоставимость результатов проведенных опытов с данными литературных источников.

Ключевые слова: металлургия, экология, реагенты-осадители, комплексообразователи, оптимальные дозы, металлосодержащие стоки

Для цитирования: Курилин С.С., Курилина Т.А., Пазенко Т.Я., Войтов Е.Л. О возможности применения современных реагентов-осадителей для извлечения ионов тяжелых металлов из сточных вод гальванического производства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 466–476. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-466-476>. EDN: UUEWDO.

Original article

On the possibility of using modern sedimentation reagents to extract heavy metal ions from wastewater from electroplating

Sergey S. Kurilin¹, Tatyana A. Kurilina^{2✉}, Tatyana Ya. Pazenko³, Evgeniy L. Voytov⁴

^{1,2,3}School of Engineering and Construction of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

⁴Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russia

Abstract. Currently, any technological process is determined not only by production indicators, but also by environmental safety, which can be achieved with the use of new technologies, methods, modern reagents, etc. The article analyzes the aspects of the possible use of heavy metal ion precipitating reagents.

© Курилин С.С., Курилина Т.А., Пазенко Т.Я., Войтов Е.Л., 2025

gents from Plexon: Plexon 3315, Plexon 2210 and Plexon 5020, as well as the organic precipitating reagent Plexon 9015 (a mixture of polyethyleneimine and dithiocarbamate). The use of these reagents makes it possible to implement a safe technology that meets all modern standards and requirements. Plexon reagents are capable of creating complexes with heavy metal ions in a short reaction time, which leads to a significant reduction in the amount of contaminated wastewater and a reduction in the volume of facilities. Laboratory studies were carried out on a developed semi-productive wastewater treatment plant containing metal ions using a universal professional dosing system Diversey. To understand the mechanism of complexation of heavy metal ions with the proposed reagents, diffractograms of reagent samples were obtained using the method of X-ray phase analysis. As a rule, the dosage of reagents depends on the type of metal being deposited, its concentration, and the complexing reagents used, which is confirmed in the obtained regression equations. During the experiment, there is a good comparability of the results of the experiments with the data from literary sources.

Keywords: metallurgy, ecology, sedimentation reagents, complexing agents, optimal doses, metal-containing effluents

For citation: Kurilin S.S., Kurilina T.A., Pazenko T.Ya., Voytov E.L. On the possibility of using modern sedimentation reagents to extract heavy metal ions from wastewater from electroplating. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(3): 466-476. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-466-476>. EDN: UUEWDO.

ВВЕДЕНИЕ

Темпы развития российской металлургической промышленности набирают обороты и вопросы повышения качества очистки сточных вод существенно обострились в последнее время, поэтому сокращение водопотребления, рациональное использование воды является актуальной проблемой.

Согласно требованиям Водного кодекса Российской Федерации, одним из путей решения данного вопроса может быть создание малоотходных и безотходных экологически безопасных процессов благодаря внедрению системы оборотного и повторного использования воды, прошедшей соответствующую очистку на локальных очистных сооружениях [1].

При обработке металлов, в зависимости от технологического процесса, образуются стоки с характерными видами загрязнений [2, 3].

Вода в технологическом процессе используется как растворитель для отмывки изделий и полугабрикатов после травления, обезжиривания и нанесения гальванопокрытий. Решение проблемы утилизации таких стоков имеет не только экологическое, но и экономическое значение.

Разработка и внедрение практически бессточной схемы очистки на данных предприятиях и возврат очищенных стоков в систему оборотного водоснабжения позволит снизить затраты на плату за сброс очищенных сточных вод в систему хозяйственно-бытовой канализации и на подпитку оборотной системы водоснабжения технической водой, что уменьшит негативное воздействие на окружающую природную среду [4].

Известно, что для осаждения гидроксидов металлов сточных вод на металлургических предприятиях наиболее универсальным методом является реагентная обработка [5], поэтому на большинстве предприятий очистка загрязненных сточных вод осуществляется именно таким методом, но при этом может не происходить достаточно полное коагулирование воды и удаление ионов металлов. Как правило, применение традиционных реагентов-осадителей приводит к образованию большого количества осадка, возможно увеличение общего содержания воды и, как следствие, невозможность использования ее в обороте без дополнительной ступени доочистки [6, 7].

Применение современных реагентов в технологии обезвреживания сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов, позволяет получить высокую степень очистки и возможность создания оборотного цикла водопотребления.

МЕТОДЫ

Примерный качественный и количественный состав реагентов Plexon дает фирма-производитель: Plexon 3315 (смесь N,N-диметилдитиокарбамата натрия и сульфида натрия), Plexon 2210 (водный раствор диметилдитиокарбамата натрия) и Plexon 5020 (смесь полисульфидов натрия, дитионита натрия и гидроксида натрия), а также органический реагент-осадитель Plexon 9015 (смесь полиэтиленимина и дитиокарбамата). Все реагенты представляют собой рас-

твор сильной щелочи и могут использоваться практически на всех промышленных локальных очистных сооружениях металлообрабатывающих предприятий.

Реагенты-осадители фирмы Рlехоп хорошо связывают широкий спектр ионов металлов за счет образования высокостабильных хелатных комплексов, которые меньше растворяются, чем соответствующие гидроксиды металлов. Это особенно важно, когда в сточной воде небольшие концентрации ионов металлов и наличие сложных комплексообразователей. Эти реагенты могут подаваться в систему очистки в непрерывном режиме, периодически или небольшими дозами, но проведенные предварительно эксперименты показали несостоятельность рекомендованных производителем доз, этим и объясняется актуальность и мотивация проведения исследований.

Для определения рабочей (оптимальной) дозы при которой получается практически полное выпадение в осадок ионов тяжелых металлов, необходимо установить эту дозу экспериментально.

Были проведены лабораторные исследования, максимально имитирующие производственные условия с использованием универсальной профессиональной дозирующей системы Diversey (рис. 1), которая была установлена в аттестованной лаборатории кафедры инженерные системы зданий и сооружений Сибирского федерального университета Инженерно-строительного института. При подключении к сточной воде, исходные концентрации которой $\text{Cu(II)} = 60 \text{ мг/дм}^3$; $\text{Ni(II)} = 15 \text{ мг/дм}^3$; $\text{Zn(II)} = 20 \text{ мг/дм}^3$, из дозатора подается готовый рабочий раствор реагента-осадителя, двойное нажатие на кнопку обеспечивает точность дозирования, встроенный индикатор исключает передозировку средства.



Рис. 1. Дозатор реагентов Diversey
Fig. 1. Diversey reagent dispenser

Предварительно модельную сточную жидкость обрабатывали раствором Ca(OH)_2 , затем помещали в емкости и вводили разное количество реагентов. Выдерживали необходимое время контакта для формирования плотного осадка. Остаточную концентрацию определяли на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой ICAP-6500.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты эксперимента позволили получить квадратичные зависимости (рис. 2) и определить оптимальное значение доз реагентов-осадителей, что составило примерно $2,0 - 4,0 \text{ мг/дм}^3$. Для построения гистограмм по эффекту очистки использовали стандартную методику расчета (рис. 3). Очищенная вода вполне удовлетворяет требованиям воды на технологические нужды для приготовления электролита травления и промывки в соответствии с ГОСТ 9.314–90 «Вода для гальванического производства и схемы промывок».

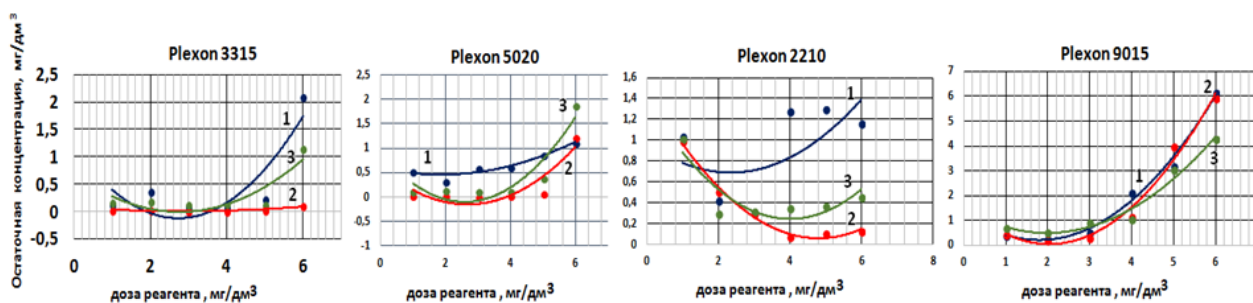


Рис. 2. Влияние дозы реагента на остаточную концентрацию:

1 – медь; 2 – никель; 3 – цинк

Fig. 2. Effect of reagent dose on residual concentration: 1 – copper; 2 – nickel; 3 – zinc

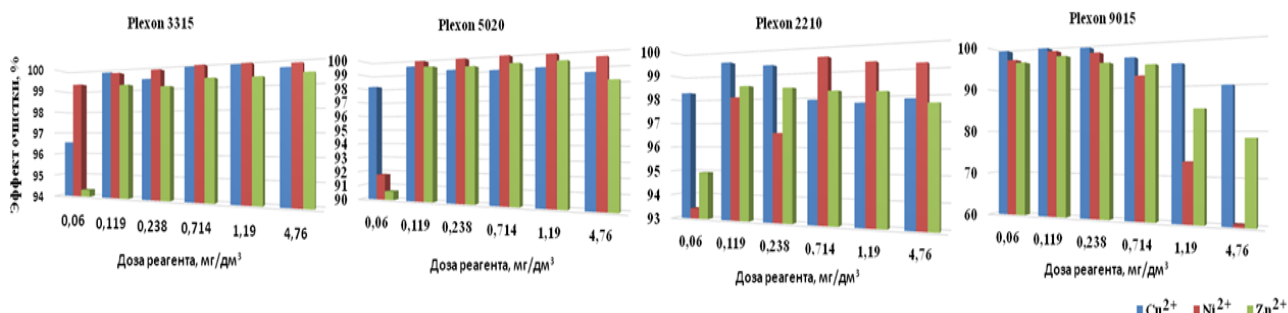


Рис. 3. Гистограммы эффекта очистки

Fig. 3. Histograms of the cleaning effect

Производителем был дан примерный состав реагентов и для уточнения их составов, а также для понимания физико-химического механизма комплексообразований ионов металлов, были получены дифрактограммы образцов реагентов. Дифрактограммы сняты при комнатной температуре на приборе Bruker D8 с линейным детектором VANTEC на $\text{CuK}\alpha$ излучении в диапазоне углов 8–90, с шагом 0,014 ° со временем накопления по 1 с на шаг. Уточнение проводилось методом Ритвельда в программе TOPAS 3.

Идентификация фаз производилась по структурным карточкам международной дифракционной базы данных COD Database и Кембриджской базы данных CCDC.

В качестве исходной модели для уточнения были выбраны Acta Crystallographica и Section Crystal Structure Communications [8]. Состав образца реагента Plexon 3315 представлен на дифрактограммах (рис. 4, 5) и в табл. 1.

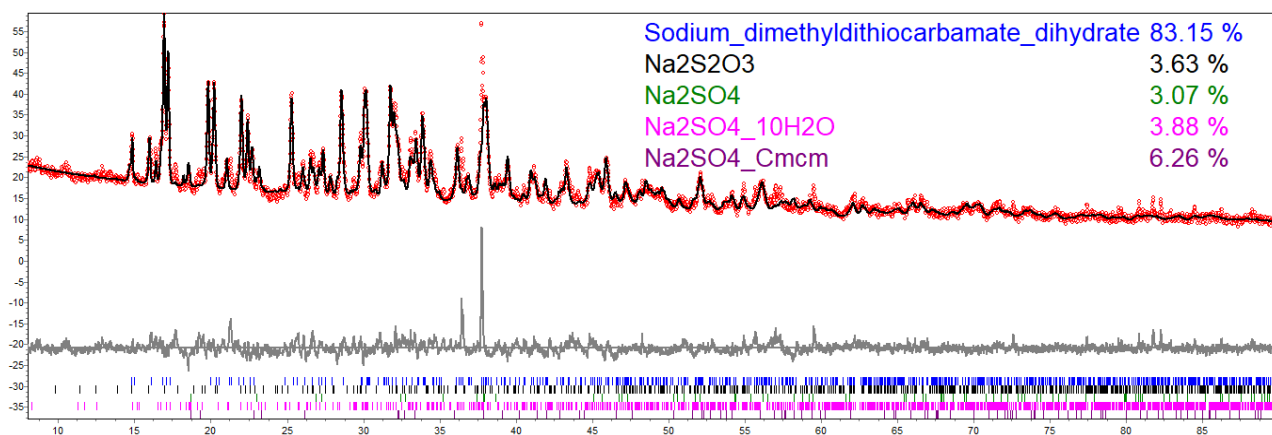


Рис. 4. Рентгенограмма образца реагента Plexon 3315 в программе TOPAS 3

Fig. 4. X-ray diffraction pattern of a sample of Plexon 3315 reagent in the TOPAS 3 program

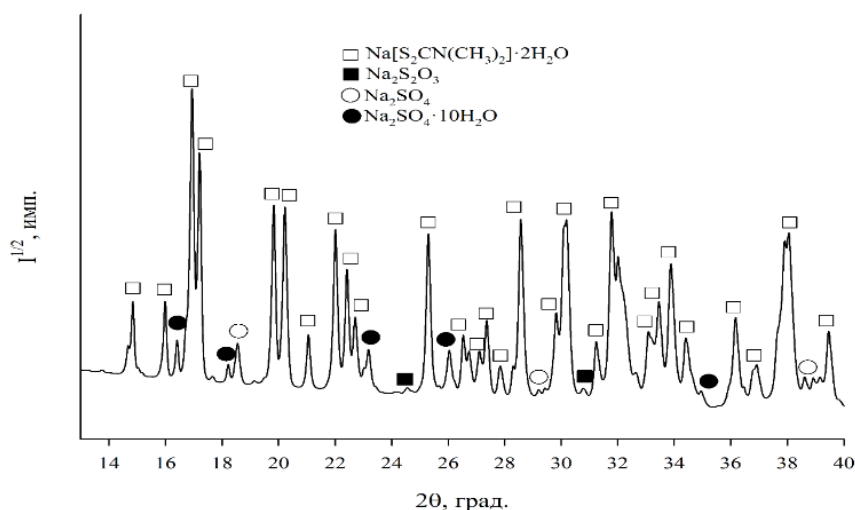


Рис. 5. Фрагмент рентгенограммы с индцированными известными фазами пиками
Fig. 5. Fragment of the X-ray diffraction pattern with peaks indicated by known phases

Таблица 1. Результаты рентгенофазового анализа образца реагента Plexon 3315

Table 1. Results of X-ray phase analysis of a sample of Plexon 3315 reagent

Название соединения	Формула	Содержание, масс. %
N,N-диметилдитиокарбамат натрия Обнаружена двуводная соль (поправка на массу при приготовлении реагента)	$\text{Na}[\text{S}_2\text{CN}(\text{CH}_3)_2] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	83,152±0,700
Тиосульфат натрия	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	3,632±0,475
Сульфат натрия	Na_2SO_4	9,339±0,709
Сульфат натрия 10-водный	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	3,877±0,302

Также обнаружен один неизвестный компонент смеси, вероятно, это глюконовая кислота, которую используют как добавку в похожих смесях для хелатирования двузарядных катионов металлов [7, 8].

Затем был исследован состав образца реагента Plexon 2210, дифрактограммы которого представлены на рис. 6, 7 и в табл. 2.

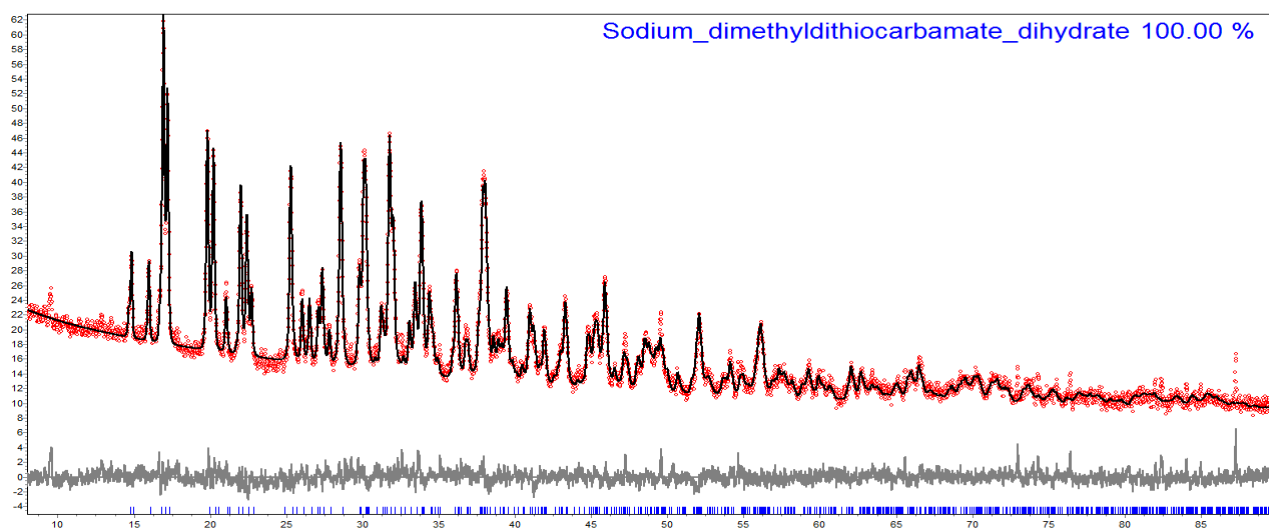


Рис. 6. Рентгенограмма состава образца реагента Plexon 2210 в программе TOPAS 3
Fig. 6. X-ray diffraction pattern of the Plexon 2210 reagent sample in the TOPAS 3 program

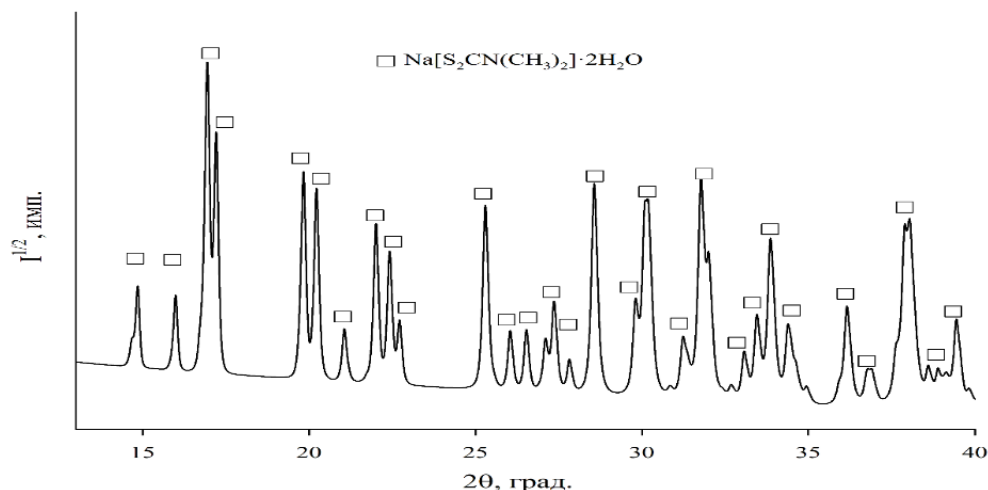


Рис. 7. Фрагмент рентгенограммы с индцированными известными фазами пиками
Fig. 7. Fragment of the X-ray diffraction pattern with peaks indicated by known phases

Таблица 2. Результаты рентгенофазового анализа образца реагента Plexon 2210
Table 2. Results of X-ray phase analysis of a sample of Plexon 2210 reagent

Название соединения	Формула	Содержание, масс. %
N,N-диметилдитиокарбамат натрия двухводный	$\text{Na}[\text{S}_2\text{CN}(\text{CH}_3)_2] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	90–100
Неизвестный(е) компонент(ы)	–	0–10

Образец практически полностью состоит из основного компонента содержание примесей незначительно. Диметилдитиокарбамат натрия относится к классу органических соединений, известных как органические соли щелочных металлов и относится к веществам четвертого класса опасности.

При осаждении реагентами Plexon 3315 и Plexon 2210 ионов Cu^{2+} , Ni^{2+} и Zn^{2+} получается осадок, легко отделяемый от раствора, но при дозе, подобранной неправильно, наблюдается небольшая опалесценция и незначительный пристеночный эффект.

Плексон 5020 часто используется там, где необходимо эффективно удалить ионы тяжелых металлов из промышленных сточных вод. Состав образца реагента Plexon 5020 представлен на рис. 8, 9 и в табл. 3.

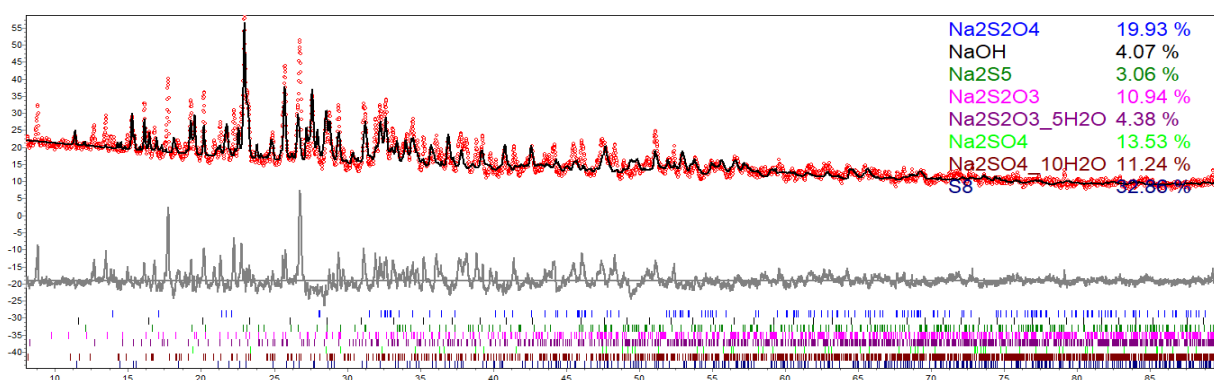


Рис. 8. Рентгенограмма образца реагента Plexon 5020 в программе TOPAS 3
Fig. 8. X-ray diffraction pattern of a sample of Plexon 5020 reagent in the TOPAS 3 program

Результаты проведенного анализа подтвердили наличие дитионита натрия и полисульфида в реагенте Plexon 5020, что дает возможность образования сложных комплексов (возможно амидных комплексов), которые имеют меньшую растворимость, чем соответствующие гидроксиды металлов.

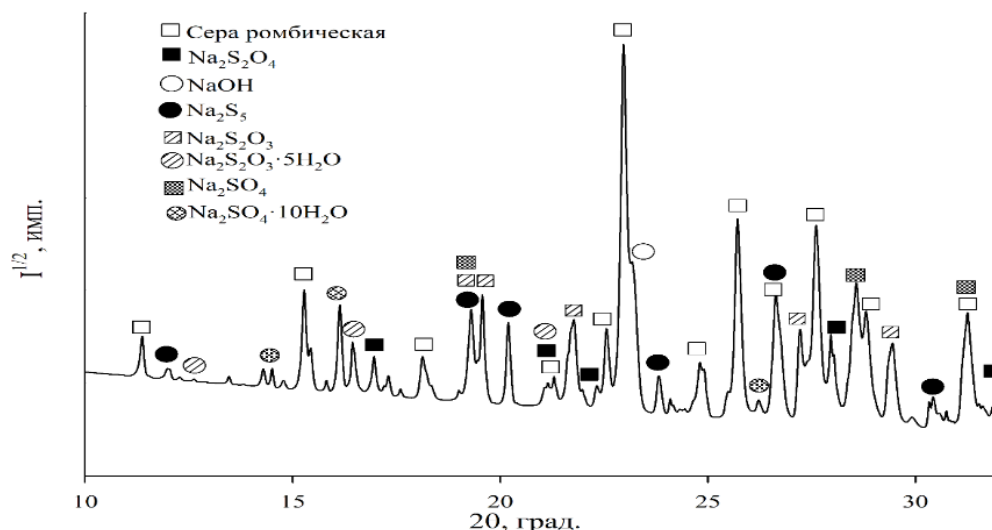


Рис. 9. Фрагмент рентгенограммы с индцированными известными фазами пиками
Fig. 9. Fragment of the X-ray diffraction pattern with peaks indicated by known phases

Таблица 3. Результаты рентгенофазового анализа образца реагента Plexon 5020

Table 3. Results of X-ray phase analysis of a sample of Plexon 5020 reagent

Название соединения	Формула	Содержание, масс. %
Дитионит натрия	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$	19,926±11,064
Полисульфид натрия	Na_2S_5	3,064±0,578
Гидроксид натрия	NaOH	4,067±0,646
Тиосульфат натрия	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	10,937±1,636
Тиосульфат натрия пятиводный	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	4,379±0,913
Сульфат натрия	Na_2SO_4	13,525±3,053
Сульфат натрия 10-водный	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	11,236±1,786
Сера ромбическая	S_8	32,864±4,661

Полученный осадок довольно плотный, всплывает. Подобное действие происходит из-за классического депрессора сульфидов натрия, которые создают предпосылки для флотационной селекции. Такие особенности образования подобных металлосодержащих осадков надо учитывать при разработке схем утилизации подобных стоков гальванического производства.

Органический реагент-осадитель Plexon 9015 на основе полиэтилениминдитиокарбамата, содержание которого порядка 15–50 % не удалось идентифицировать из-за сложности его в пробоподготовке. Полиэтиленимин дитиокарбамат включает два активных компонента, способных к взаимодействию с ионами металлов (II) и может выступать интегральным комплексообразователем, где полиэтиленимин и активные комплексообразующие фрагменты – дитиокарбамат натрия образуют высокомолекулярную матрицу [9, 10]. Известно, что взаимодействие металлов (II) с дитиокарбаматами происходит по донорно-акцепторному механизму, при этом ионы металлов образуют комплекс с четырехчленными циклами [11–15].

Большой объем полученных данных и необходимость сопоставления других авторов потребовало математической обработки полученных значений. В качестве метода обнаружения корреляционных зависимостей был выбран регрессионный анализ.

Сущность метода регрессионного анализа заключается в том, что большое число уравнений (моделей) регрессии, отобранных для описания связей какого-либо явления или процесса, реализуемого с помощью специально разработанного алгоритма перебора с последующей статистической проверкой.

Математическое описание обработки сточных вод представляет собой матрицу планирования, где основные факторы, влияющие на исследуемый процесс и характеризующие его выходные параметры: x_1 – доза реагента, мг/дм³; x_2 – величина pH.

В качестве функций отклика: y_1 – остаточной концентрации ионов меди Cu (II); y_2 – остаточной концентрации ионов меди Ni (II); y_3 – остаточной концентрации ионов меди Zn (II).

Для определения вида зависимости построили эмпирическую линию регрессии y по x и подобрали уравнение регрессии полинома второй степени. Для составления экспериментального плана использовали метод Брандона, его обычно применяют в тех случаях, когда нужно быстро и достаточно точно описать сложный технологический процесс на основе полученных экспериментальных данных, т. е. связать в виде уравнений регрессии влияющие факторы процесса с выходными показателями.

Plexon 3315

$$\hat{y}_1 = 7870,7 \cdot (-2,6018x_1 + 0,4737x_1^2 + 2,1236) \cdot (-7,5202x_2 + 0,4072x_2^2 + 34,715)$$

$$\hat{y}_2 = 0,2205 \cdot (-1,7096x_1 + 0,3191x_1^2 + 1,706) \cdot (-9,099x_2 + 0,5435x_2^2 + 38,681) \dots$$

$$\hat{y}_3 = 0,5144 \cdot (-1,9841x_1 + 0,3507x_1^2 + 1,8999) \cdot (-20,554x_2 + 1,2804x_2^2 + 82,905)$$

Plexon 5020

$$\hat{y}_1 = 0,1037 \cdot (-0,3709x_1 + 0,0889x_1^2 + 1,0806) \cdot (1,4587x_2^2 + 0,0872x_2 + 6,9667)$$

$$\hat{y}_2 = 0,4467 \cdot (-3,0718x_1 + 0,5576x_1^2 + 2,3338) \cdot (-15,76 + 0,5503x_2^2 + 64,735)$$

$$\hat{y}_3 = 0,4333 \cdot (-2,5779x_1 + 0,4319x_1^2 + 1,9135) \cdot (-19,047x_2 + 1,1025x_2^2 + 81,054)$$

Plexon 2210

$$\hat{y}_1 = 0,139 \cdot (0,7614x_1 - 0,1187x_1^2 + 0,5893) \cdot (-5,7047x_2 + 0,3312x_2^2 + 25,08)$$

$$\hat{y}_2 = 2,8183 \cdot (-2,1299x_1 + 0,33775x_1^2 + 1,9625) \cdot (-53,55x_2 + 3,067x_2^2 + 22,853)$$

$$\hat{y}_3 = 0,13569 \cdot (-0,8516x_1 + 0,1654x_1^2 + 1,3254) \cdot (-3,4125x_2 + 0,2003x_2^2 + 15,212)$$

Plexon 9015

$$\hat{y}_1 = 0,1021 \cdot (1,4977x_1 - 0,187x_1^2 + 0,0087) \cdot (0,2402x_2^2 - 4,5707x_2 + 20,627)$$

$$\hat{y}_2 = 0,8579 \cdot (1,7939x_1 - 0,2402x_1^2 + 0,13) \cdot (-1,5707x_2^2 + 28,019x_2 - 122,66)$$

$$\hat{y}_3 = 0,1861 \cdot (1,244x_1 - 0,162x_1^2 + 0,1974) \cdot (0,381x_2^2 - 6,6471x_2 + 29,581)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения экспериментальных исследований было установлено:

1. Уточнены и обоснованы рабочие (оптимальные) дозы исследуемых реагентов фирмы Plexon с целью удаления из сточных вод гальванического производства ионов тяжелых металлов.

2. Полученные дифрактограммы образцов реагентов фирмы Plexon дали понимание механизма комплексообразования ионов металлов каждого из предложенных реагентов в отдельности.

3. Полученные уравнения регрессии показали более значительное влияние первоначальной дозы реагентов фирмы Plexon на остаточную концентрацию ионов металлов в сточной воде и только затем имеет влияние корректировка величины pH.

4. Уравнения регрессии позволяют проводить процесс реагентной обработки сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов в оптимальном режиме.

Результаты проведенных исследований показали хорошую сопоставимость с данными литературных источников.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сколубович Ю.Л., Войтов Е.Л., Цыба А.А. Очистка и утилизация поверхностных сточных вод. М.: Изд-во АСВ, 2021. 108 с. EDN: JUUYVB.
2. Попов В.Г., Тягунова В.Г., Диньмухаметова Л.С. Сравнение результатов очистки промышленных сточных вод сложного состава реагентным и гальванокоагуляционным методами // Фундаментальные исследования. 2017. № 1. С. 101–105. EDN: XVLQUN.
3. Курилина Т.А., Пазенко Т.Я., Матюшенко А.И., Журавлев А.С. Об эффективной технологии очистки медьсодержащих сточных вод с применением современного реагента-осадителя // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 5-1. С. 55–61. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.051>. EDN: SNGMLU.
4. Лобанов А.А. Реагентная обработка воды в системе оборотного водоснабжения // Природообустройство. 2011. № 1. С. 87–88. EDN: NUDBWP.
5. Мовчан С.И. Использование реагентов в технологии обработки сточных вод гальванического производства // Строитель Донбасса. 2024. № 1. С. 22–29. EDN: AGXTCN.
6. Павлов Д.В., Вараксин С.О. Разработка и внедрение современных технологий очистки сточных вод гальванического производства // Вода: технология и экология. 2010. № 2. С. 16–26.
7. Халтурина Т.И., Чурбакова О.В., Курилина Т.А. Кондиционирование осадков сточных вод металлообрабатывающих предприятий // Известие высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 9. С. 69–74. EDN: OZICOB.
8. Joshi M.D., Anderson J.L. Recent Advances of Ionic Liquids in Separation Science and Mass Spectrometry. Royal Society of Chemistry. 2012. Vol. 2. P. 5470–5484. <https://doi.org/10.1039/C2RA20142A>.
9. Weissberger A., Proskauer E.S., Riddick J.A., Toops E.E. Organic Solvents: Physical Properties and Methods of Purification. Wiley: New York, 1955. 212 p.
10. Ternova D., Boltoeva M., Cointeaux L., Gaillard C., Kalchenko V., Mazan V. et al. Dramatic Changes in the Solubilities of Ions Induced by Ligand Addition in Biphasic System D2O/DNO3/[C1C4im][Tf2N]: A Phenomenological Study // The Journal of Physical Chemistry B. 2016. Vol. 120. Iss. 30. P. 7502–7510. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b05424>.
11. М.А. Турсунов, Б.Б. Умаров, Синтез и кристаллическая структура комплекса никеля (II) на основе бензоилгидразона метилового эфира 4-фенил-2,4-диоксобутановой кислоты // UNIVERSUM Химия и биология. 2018. №12 (54). С.50-52.
12. Чеботарев В.К. Прогнозирование в титриметрических методах анализа с использованием реакций комплексообразования и осаждения: монография. Барнаул: Изд-во Алтайского государственного университета, 1999. 114 с.
13. Смирнова Н.Н., Смирнов М.Е. Модификация целлюлозного сорбента как инструмент регулирования его кинетических характеристик и сорбционной активности по ионам меди (II) // Сорбционные и хроматографические процессы. 2018. Т. 18. № 1. С. 26–34. EDN: YRTIBJ.
14. Fenglian Fu, Liping Xie, Bing Tang, Qi Wang, Shuxian Jiang Application of a Novel Strategy—Advanced Fenton-Chemical Precipitation to the Treatment of Strong Stability Chelated Heavy Metal Containing Wastewater // Chemical Engineering Journal. 2012. Vol. 189-190. P. 283–287. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.02.073>.
15. Дашевский В.Г., Баранов А.П., Кабачник М.И. Пространственные аспекты образования хелатных комплексов металлов // Успехи химии. 1983. Т. 52. № 2. С. 268–293. <https://doi.org/10.1070/RC1983v052n02ABEH002804>.

REFERENCES

1. Skolubovich Yu.L., Voitov E.L., Tsyba A.A. *Treatment and Disposal of Surface Wastewater*. Moscow: ACB Publishing House, 2021. 108 p. (In Russ.). EDN: JUUYVB.
2. Popov V.G., Tyagunova V.G., Dinmukhametova L.S. Comparison of Chemical and Galvanochemical Techniques for the Industrial Complex Wastewater Treatment. *Fundamental Research*. 2017;1:101-105. (In Russ.). EDN: XVLQUN.
3. Kurilina T.A., Pazenko T.Ya., Matyushenko A.I., Zhuravlev A.S. On Effective Clearing Technology of Copper-Bearing Water with Non-Solvent-Reagent. *International Research Journal*. 2022;5-1:55-61. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.051>. EDN: SNGMLU.
4. Lobanova A.A. Reagent Water Treatment in the System of Recycling Water Supply. *Environmental Engineering*. 2011;1:87-88. (In Russ.). EDN: NUDBWP.

5. Movchan S.I. The Use of Reagents in The Technology of Galvanic Production's Wastewater Treatment. *The Builder of Donbass*. 2024;1:22-29. (In Russ.). EDN: AGXTCN.
6. Pavlov D.V., Varaksin S.O. Development and Implementation of Modern Technologies for Wastewater Treatment in Galvanic Production. *Voda: tekhnologiya i ekologiya*. 2010;2:16-26. (In Russ.).
7. Khalturina T.I., Churbakova O.V., Kurilina T.A. Conditioning of Wastewater Sludge from Metalworking Plants. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2010;9:69-74. (In Russ.). EDN: OZICOB.
8. Joshi M.D., Anderson J.L. Recent Advances of Ionic Liquids in Separation Science and Mass Spectrometry. *Royal Society of Chemistry*. 2012;2:5470-5484. <https://doi.org/10.1039/C2RA20142A>.
9. Weissberger A., Proskauer E.S., Riddick J.A., Toops E.E. *Organic Solvents: Physical Properties and Methods of Purification*. Wiley: New York, 1955. 212 p.
10. Ternova D., Boltoeva M., Cointeaux L., Gaillard C., Kalchenko V., Mazan V. et al. Dramatic Changes in the Solubilities of Ions Induced by Ligand Addition in Biphasic System D₂O/DNO₃/[C₁C₄im][Tf₂N]: A Phenomenological Study. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2016;120(30):7502-7510. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b05424>.
11. M.A. Tursunov, B.B. Umarov, Synthesis and crystal structure of nickel (II) complex based on benzoylhydrazone of 4-phenyl-2,4-dioxobutanoic acid methyl ester // *UNIVERSUM Chemistry and Biology*. 2018. No. 12 (54). P. 50-52.
12. Chebotarev V.K. *Prediction in Titrimetric Analysis Methods Using Complexation and Precipitation Reactions: Monograph*. Barnaul: Publishing House of the Altai State University, 1999. 114 p. (In Russ.).
13. Smirnova N.N., Smirnov M.E. Cellulose Sorbent Modification as the Regulation Instrument of Its Kinetic Characteristics and Sorption Capacity With Regard To Copper (II) Ions. *Sorption and Chromatography Processes*. 2018;18(1):26-34. (In Russ.). EDN: YRTIBJ.
14. Fenglian Fu, Liping Xie, Bing Tang, Qi Wang, Shuxian Jiang Application of a Novel Strategy—Advanced Fenton-Chemical Precipitation to the Treatment of Strong Stability Chelated Heavy Metal Containing Wastewater. *Chemical Engineering Journal*. 2012;189-190:283-287. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.02.073>.
15. Dashevskii V.G., Baranov A.P., Kabachnik M.I. Spatial Aspects of the Formation of Metal Chelate Complexes. *Russian Chemical Reviews*. 1983;52(2):268-293. (In Russ.). <https://doi.org/10.1070/RC1983v052n02ABEH002804>.

Информация об авторах

Курилин Сергей Сергеевич,

аспирант,
Инженерно-строительный институт Сибирского
федерального университета,
660041, г. Красноярск, пр-кт. Свободный, 82,
Россия,
ведущий инженер отдела тепловодоснабжения,
АО «Востсибнефтегаз»,
660049, г. Красноярск, пр-кт. Мира, д. 36,
Россия,
e-mail: Wiza91@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-4805-3342>
Author ID: 1294329

Курилина Татьяна Александровна,

к.т.н., доцент, доцент кафедры инженерные
системы зданий и сооружений,
Инженерно-строительный институт Сибирского
федерального университета,
660041, г. Красноярск, пр-кт. Свободный, 82,
Россия,
✉ e-mail: ctrel91@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5058-7186>
Author ID: 626385

Information about the authors

Sergey S. Kurilin,

Postgraduate Student,
School of Engineering and Construction of Siberian
Federal University,
82, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia,
Leading Engineer of the Heat and Water Supply
Department,
JSC Vostsibneftegaz,
36, Mira Ave., Krasnoyarsk 660049,
Russia,
e-mail: Wiza91@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-4805-3342>
Author ID: 1294329

Tatyana A. Kurilina,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate
Professor of the Department of Engineering
Systems of Buildings and Structures,
School of Engineering and Construction of Siberian
Federal University,
82, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia,
✉ e-mail: ctrel91@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5058-7186>
Author ID: 626385

Пазенко Татьяна Яковлевна,

к.т.н., доцент, доцент кафедры инженерные
системы зданий и сооружений,
Инженерно-строительный институт Сибирского
федерального университета,
660041, г. Красноярск, пр-кт. Свободный, 82,
Россия,
e-mail: pazenkotat@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8454-3368>
Author ID: 403153

Войтов Евгений Леонидович,

д.т.н., профессор кафедры
водоснабжения и водоотведения,
Новосибирский государственный архитектурно-
строительный университет (Сибстрин),
630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113,
Россия,
e-mail: viv@sibstrin.ru
<https://orcid.org/0009-0001-2809-6441>
Author ID: 5229958

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 31.03.2025.
Одобрена после рецензирования 29.04.2025.
Принята к публикации 02.05.2025.

Tatyana Ya. Pazenko,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate
Professor of the Department of Engineering
Systems of Buildings and Structures,
School of Engineering and Construction of Siberian
Federal University,
82, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia,
e-mail: pazenkotat@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8454-3368>
Author ID: 403153

Evgeniy L. Voytov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department
of Water Supply and Sanitation,
Novosibirsk State University of Architecture
and Civil Engineering (Sibstrin),
113 Leningradskaya St., Novosibirsk 630008,
Russia,
e-mail: viv@sibstrin.ru
<https://orcid.org/0009-0001-2809-6441>
Author ID: 5229958

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 31.03.2025.
Approved after reviewing 29.04.2025.
Accepted for publication 02.05.2025.