
**ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ
ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ,
ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
СТРОИТЕЛЬСТВА**

**LIFE MAINTENANCE ENGINEERING SYSTEMS
OF THE INHABITED LOCALITIES,
BUILDINGS AND STRUCTURES.
ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION**

Известия вузов. Строительство. 2023. № 3. С. 61–72.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2023; (3): 61–72.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 628.335

DOI: 10.32683/0536-1052-2023-771-3-61-72

**ПРИМЕНЕНИЕ ОСАДИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ
ДЛЯ ВОДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД
ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**Юрий Леонидович Сколубович¹, Сергей Сергеевич Курилин²,
Татьяна Александровна Курилина³, Татьяна Яковлевна Пазенко³,
Евгений Леонидович Войтов¹**

¹Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин), Новосибирск, Россия

²АО «Востсибнефтегаз», Красноярск, Россия

³Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследований и предложены решения по эффективной очистке сточных вод гальванического производства с использованием нового реагента-осадителя ТМТ-15 производства России, который осаждает катионы многих тяжелых металлов из сточных вод в виде комплексных соединений. Технологическая схема, включающая применение осадителя ТМТ-15, позволяет проводить глубокую очистку стоков в стабильном режиме при высоком эффекте с меньшими экономическими затратами по сравнению с добавлением традиционных реагентов и вернуть воду в систему оборотного водоснабжения. Ротатабельное планирование экспериментальных работ и контроль качества сточных вод по стандартным методикам с использованием атомно-абсорбционного спектрометра обеспечило требуемую точность и надежность результатов измерения.

Практическая значимость исследований заключена в разработке рекомендаций по применению предлагаемого реагента-осадителя ТМТ-15 для проектирования и реконструкции очистных сооружений гальванических производств.

© Сколубович Ю.Л., Курилин С.С., Курилина Т.А., Пазенко Т.Я., Войтов Е.Л., 2023

Ключевые слова: тяжелые металлы, реагентная обработка, осадитель металлов, сточная вода, гальваническое производство, технология, оптимальная доза, математическая модель, оптимизация

Для цитирования: Сколубович Ю.Л., Курилин С.С., Курилина Т.А., Пазенко Т.Я., Войтов Е.Л. Применение осадителя тяжелых металлов для водоочистки сточных вод гальванического производства // Известия вузов. Строительство. 2023. № 3. С. 61–72. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-771-3-61-72.

Original article

APPLICATION OF A HEAVY METAL SETTLER FOR WATER PURIFICATION OF WASTE WATER OF ELECTRIC PRODUCTION

Yuri L. Skolubovich¹, Sergey S. Kurilin², Tatyana A. Kurilina³,
Tatyana Ya. Pazenko³, Evgeny L. Voytov¹

¹Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering
(Sibstrin), Novosibirsk, Russia

²JSC Vostsibneftegaz, Krasnoyarsk, Russia

³Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The paper presents the results of research and proposes solutions for the effective treatment of wastewater from galvanic production using a new precipitant TMT-15, produced in Russia, which precipitates cations of many heavy metals from wastewater in the form of complex compounds. The technological scheme, including the use of the TMT-15 precipitator, allows for deep treatment of wastewater in a stable mode with a high effect with lower economic costs compared to the use of traditional reagents, and return water to the circulating water supply system. Rotatable planning of experimental work and quality control of wastewater using standard methods using an atomic absorption spectrometer provided the required accuracy and reliability of measurement results.

The practical significance of the research lies in the development of recommendations for the use of the proposed TMT-15 precipitant for the design and reconstruction of treatment facilities for galvanic production.

Keywords: heavy metals, reagent treatment, metal precipitator, waste water, electroplating production, technology, optimal dose, mathematical model, optimization

For citation: Skolubovich Yu.L., Kurilin S.S., Kurilina T.A., Pazenko T.Ya., Voytov E.L. Application of a heavy metal settler for water purification of waste water of electric production. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2023; (3): 61–72. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2023-771-3-61-72.

Введение. Осаждение тяжелых металлов является одной из самых важных задач промышленной водоочистки. Постоянное повышение требований законодательства вызывает снижение до очень низких значений допустимых пределов загрязнения, которые часто невозможно достигнуть путем осаждения с помощью чистых щелочей [1]. Это обычная ситуация при осаждении нескольких металлов, находящихся в воде, осаждающихся при различных значениях pH, или при наличии в растворе сильного комплексообразователя [2, 3]. Для этих целей в работе был использован реагент ТМТ-15 – концентрация основного вещества, производимого в России под маркой Rutrol ТМТ 15 иначе известного как тримеркаптотриазин (trimercaptotriazine). Применение

данного продукта дает возможность разработать экологически безопасную технологию с максимально замкнутым циклом и минимальным количеством отходов, соответствующую современным нормам и требованиям.

Данный реагент образует с тяжелыми металлами соединения, которые имеют значительно меньшую растворимость, чем соответствующие гидроксиды. Это позволяет получать лучшие результаты разделения в тех случаях, когда осаждение в виде гидроксидов из-за присутствия комплексообразователей не приносит достаточного результата.

Активной составляющей реагента для удаления ионов тяжелых металлов является триазин, который реагирует практически как трехвалентный анион и тем самым может связывать три эквивалента тяжелых металлов.

Осадки металл-реагент можно рассматривать как металлорганические макромолекулы. Таким образом, предлагаемый осадитель ТМТ-15 реагирует как комплексная молекула. Сероводород не отщепляется, сульфиды металлов также не образуются.

Методика исследований. В работе изучался реагентный метод удаления тяжелых металлов на примере модельных сточных вод с усредненными концентрациями. В качестве реагента применен ТМТ-15, который выступает как осадитель тяжелых металлов.

Основными методиками определения количественного состава исходной – модельной, очищенной воды и образующегося осадка являются атомно-адсорбционный спектрометр с электрометрической атомизацией, термogravиметрический, потенциометрический, рентгенофазовый, термogravиметрический, а также методы математической статистики с использованием пакетов прикладных программ полиномиальной регрессии.

Совокупность различных методик позволяет наиболее точно определить исходные и конечные концентрации ионов металлов в воде и соответственно оценить эффективность реагентной очистки промышленного стока для выявления оптимальных режимов реагентной обработки с применением ТМТ-15.

Результаты исследований. Цель данного исследования – разработка технологии очистки сточных вод, содержащих ионы меди, никеля и цинка, с применением современного реагента-осадителя ТМТ-15.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- проведен литературный обзор современных методов обезвреживания данных сточных вод;
- выполнены исследования для нахождения оптимальных дозировок предлагаемого реагента;
- построены математические модели для оптимизации прогнозирования процесса очистки стоков при разных заданных режимах;
- найдены оптимальные параметры для разработки современной схемы очистки стоков.

Объект исследования это модельные сточные воды с различными исходными концентрациями металлов, обработанные реагентом-осадителем ТМТ-15.

При добавлении небольших количеств реагента-осадителя ТМТ-15 в сточные воды происходит образование комплекса по реакции:



M = ион тяжелого металла,

TMT = ион тримеркаптотриазина ($C_3N_3S_3^{3-}$).

Остаточные концентрации тяжелых металлов в очищаемой воде предельно малы, а соответственно эффективность реагентной очистки высокая. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты эксперимента по обезвреживанию сточных вод, содержащих ионы меди, цинка и никеля, реагентом-осадителем TMT-15

Table 1. The results of the experiment on the neutralization of wastewater containing copper, zinc and nickel ions, using TMT-15

Доза реагента, мг/дм ³	Остаточная концентрация			Эффект очистки
	Cu ²⁺	Ni ²⁺	Zn ²⁺	
1	2	3	4	5
Величина pH = 10				
0,10	6,1600	5,9000	3,9680	83,13
0,15	4,1565	4,0630	3,5780	87,58
0,20	4,1500	3,9060	3,0260	88,33
0,25	3,6700	3,0230	2,3080	90,53
0,30	3,2560	2,6800	1,9080	91,74
0,35	2,0670	1,6000	1,0809	95,00
0,40	1,9030	1,4050	1,0790	95,38
0,60	1,6880	1,3025	1,0680	95,73
0,80	1,6850	1,2580	0,9030	95,95
1,20	1,7280	1,3800	1,1700	95,50
2,00	3,8028	2,6501	1,2600	91,88
1,00	1,7260	1,3020	1,0600	95,70
Величина pH = 5				
0,10	0,6501	0,5980	0,4010	98,26
0,15	0,3980	0,3691	0,2070	98,97
0,20	0,2023	0,3580	0,1650	99,24
0,25	0,0829	0,2035	0,0608	99,63
0,30	0,0828	0,2004	0,0591	99,64
0,35	0,0492	0,1909	0,0119	99,73
0,40	0,0368	0,1900	0,0102	99,75
0,60	0,0489	0,1908	0,0165	99,73
0,80	0,0691	0,2083	0,0071	99,70
1,00	0,0709	0,2128	0,0109	99,69
1,20	0,0788	0,2653	0,0118	99,63
2,00	0,1609	0,5700	0,1900	99,03
Величина pH = 8,5				
0,10	1,9240	2,0605	0,7028	95,07
0,15	2,1000	2,1452	0,7000	94,79

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
0,20	0,7010	0,8025	0,1650	98,24
0,25	0,0692	0,1606	0,0510	99,70
0,30	0,0801	0,1675	0,0492	99,69
0,35	0,0801	0,1283	0,0500	99,73
0,40	0,0482	0,1065	0,0151	99,82
0,60	0,0532	0,1196	0,0048	99,81
0,80	0,0801	0,1991	0,0308	99,67
1,00	0,1314	0,2113	0,0175	99,62
1,20	0,2965	0,3421	0,0356	99,29
2,00	1,6201	1,0900	0,8367	96,27

По результатам исследований построены графические зависимости, представленные на рис. 1.

Нелинейный характер зависимостей позволяет определить оптимальные режимы: доза реагента ТМТ-15 $\approx 0,8 - 1,0$ мг/дм³. Предварительные исследования показали, что уменьшение или увеличение дозы реагента приводит к ухудшению эффекта очистки.

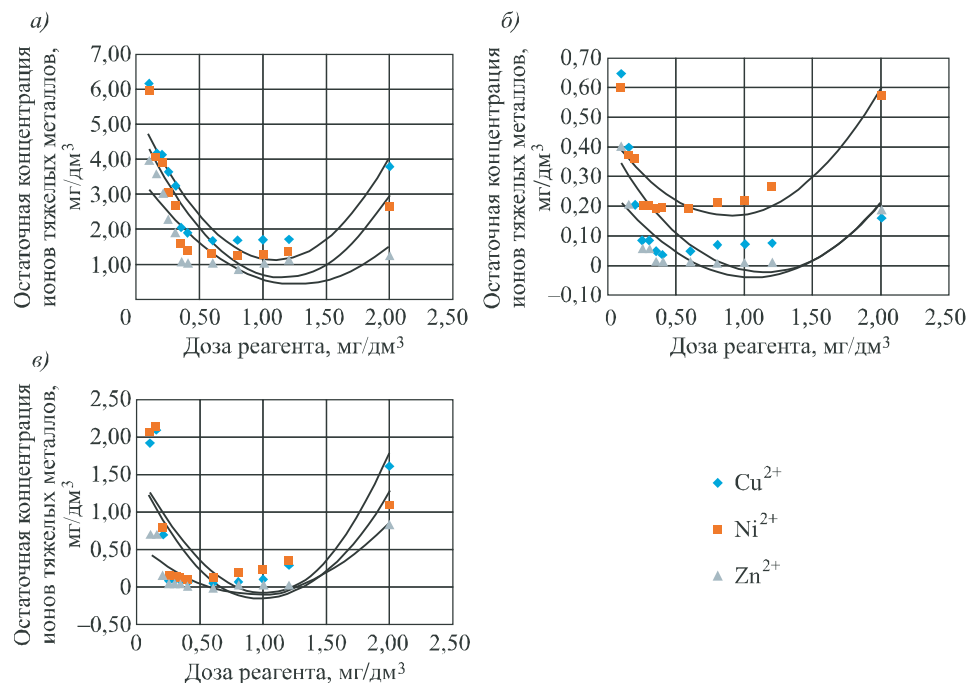


Рис. 1. Графические зависимости остаточной концентрации ионов тяжелых металлов от дозы реагента-осадителя ТМТ-15

a – величина pH = 10, *б* – величина pH = 5, *в* – величина pH = 8,5

Fig. 1. Graphic dependences of the residual concentration of heavy metal ions on the dose of TMT-15 precipitant

a – pH value = 10, *b* – pH value = 5, *c* – pH value = 8.5

Таблица 2. Факторы и уровни их варьирования

Table 2. Factors and levels of their variation

Фактор	Интервал	+1,682	+1	0	-1	-1,682
X_1	0,2	1,136	1,0	0,8	0,6	0,464
X_2	1,5	10,52	9,5	8,0	6,5	5,48
X_3	10	46,8	40	30	20	13,2

Обсуждение результатов. Согласно предварительно проведенным экспериментам можно сделать вывод, что предлагаемый реагент-осадитель ТМТ-15 эффективно снижает уровень содержания ионов металлов в сточной воде до минимальных показателей качества воды, используемой на технологические нужды для промывки в соответствии с ГОСТ 9.314–90 [4].

В тех случаях, когда информации о рассматриваемом процессе недостаточно или процесс настолько сложен, что невозможно составить его детерминированную модель, прибегают к экспериментально-статистическим методам [5]. В настоящее время уже создана теория эксперимента и разработано множество методов планирования эксперимента, которые позволяют решать сложные и трудоемкие задачи [6]. В каждом отдельном случае выбор метода определяется постановкой задачи и особенностями объекта исследования. Поскольку большое количество экспериментальных задач в технологических процессах формируются как задачи оптимизации, то наиболее широкое распространение получили методы планирования эксперимента, позволяющие получить математическое описание объекта исследования – статистическую математическую модель, которая может быть основой решения задач оптимизации [7].

Используя при обработке опытных данных принципы регрессионного и корреляционного анализа, установлены зависимости между переменными и условия оптимума, т.е. построена математическая модель [8, 9], характеризующая результаты эксперимента с переменными параметрами, которыми экспериментатор варьирует при проведении опытов.

Основной уровень, интервалы варьирования и границы области исследований были выбраны по данным предварительного эксперимента и представлены в табл. 2. За пределами этих диапазонов параметры процесса обезвреживания медьсодержащих сточных вод возможны, но чем дальше будем отходить от границ указанных параметров, тем больше будет ошибка прогноза.

Введем следующие обозначения для составления экспериментального плана с целью выявления основных факторов, воздействующих на исследуемый процесс обезвреживания сточных вод, содержащих ионы меди, никеля и цинка, реагентом ТМТ-15 (варьируемые факторы): X_1 – доза реагента-осадителя ТМТ-15, мг/дм³, X_2 – величина pH, X_3 – температура сточных вод t , °С.

В качестве выходных оценочных критериев приняты: Y_1, Y_2, Y_3 – остаточные концентрации ионов меди Cu^{2+} , никеля Ni^{2+} , цинка Zn^{2+} соответственно, Y_4 – объем образующегося осадка.

Постоянными факторами были взяты усредненные концентрации ионов тяжелых металлов: $\text{Cu}_{\text{исх}}^{2+} = 60$; $\text{Ni}_{\text{исх}}^{2+} = 15$ и $\text{Zn}_{\text{исх}}^{2+} = 20$ мг/дм³.

Представлен оценочный критерий Y_{1-4} в факторном пространстве параметров: X_1, X_2, X_3 :

$$Y_1 = 0,163 + 0,1994X_1 + 0,0892X_2 + 0,0810X_3 + 0,1583X_1X_2 + 0,15443X_1X_3 + 0,1793X_2X_3 + 0,1242X_1^2 + 0,0515X_2^2 + 0,0101X_3^2;$$

$$Y_2 = 0,243 + 0,0716X_1 - 0,0360X_2 - 0,038X_3 - 0,0053X_1X_2 + 0,0013X_1X_3 + 0,0236X_2X_3 + 0,0023X_1^2 + 0,2024X_2^2 - 0,128X_3^2;$$

$$Y_3 = -0,140 + 0,0057X_1 + 0,0062X_2 - 0,0094X_3 - 0,01093X_1X_2 + 0,01543X_1X_3 - 0,0331X_2X_3 + 0,2321X_1^2 + 0,0145X_2^2 - 0,0249X_3^2;$$

$$Y_4 = 8,474 + 0,1608X_1 + 0,9099X_2 - 0,2657X_3 + 0,165X_1X_2 - 0,145X_1X_3 + 0,225X_2X_3 - 0,8715X_1^2 + 0,5184X_2^2 - 0,2206X_3^2.$$

После нахождения уравнений был проведен статистический анализ результатов: наибольшее влияние на процесс очистки оказывает доза реагента, на объем образующегося осадка – величина рН, что вполне закономерно. Таким образом, полученная математическая формулировка модели позволила систематизировать и структурировать процесс обезвреживания сточных вод и создать основу для понимания природы самого процесса. По уравнениям регрессии получены графические интерпретации (рис. 2), что дает возможность регулировать процесс реагентного обезвреживания сточных вод в автоматическом режиме и учитывать в дальнейшем технико-экономические показатели.

На представленных диаграммах (рис. 2) для регулировочного процесса очистки видно: при уменьшении дозы реагента области смещаются в сторону

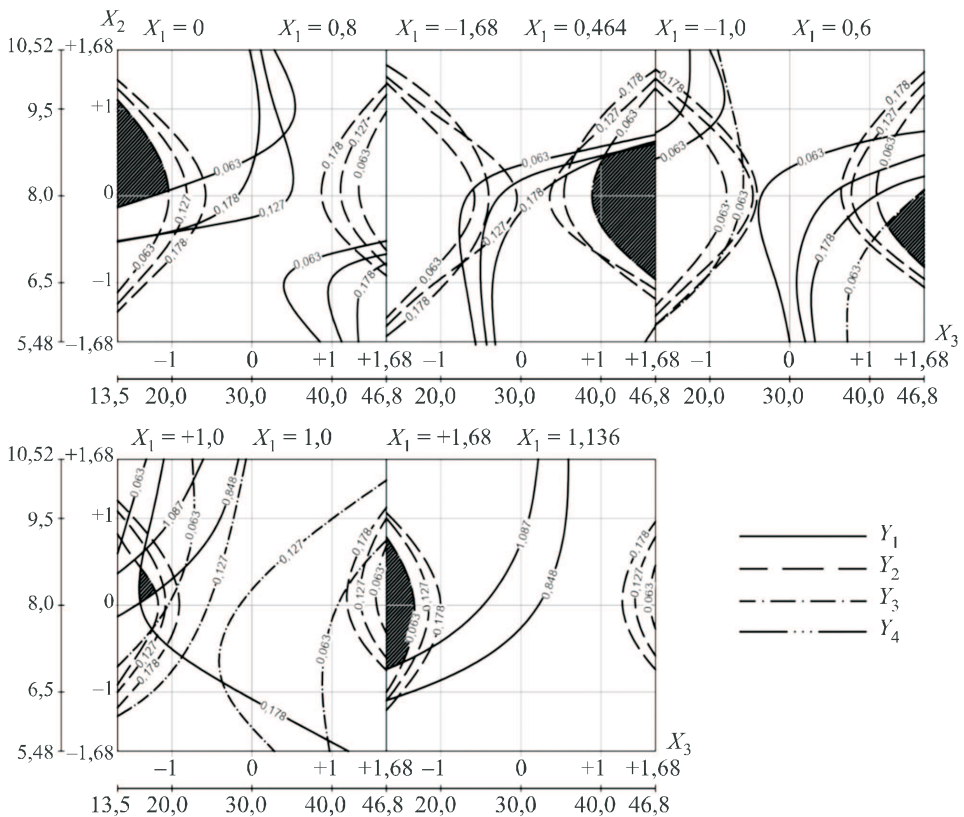
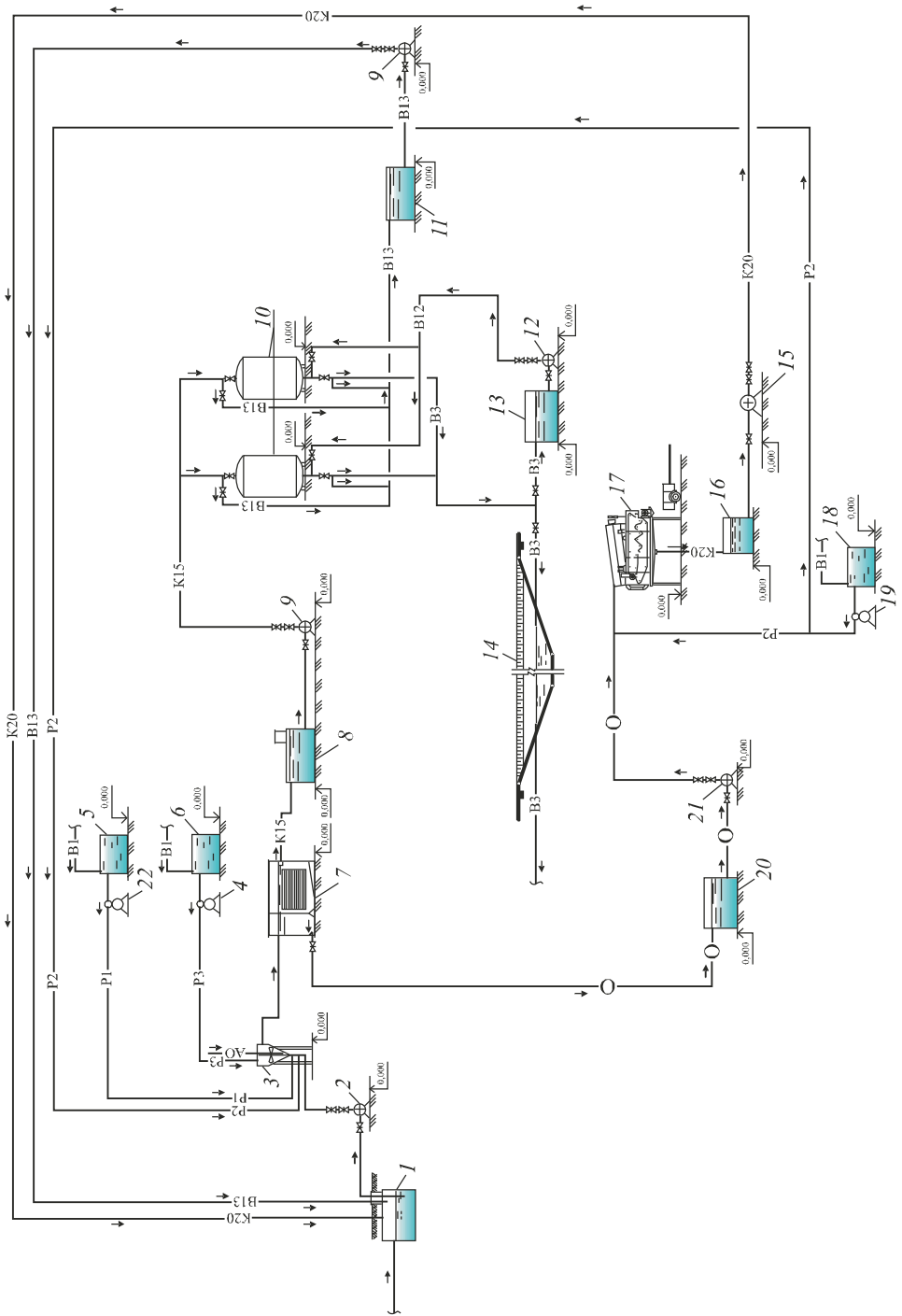


Рис. 2. Регулировочные диаграммы

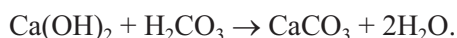
Fig. 2. Adjustment charts



увеличения температурного режима и повышения величины рН, а при увеличении дозы реагента температура снижается, величина рН не изменяется.

По результатам исследования была разработана схема обезвреживания подобных стоков с использованием предлагаемого реагента – осадителя ТМТ-15 (рис. 3).

Вода, обработанная реагентами, из смесителя самотеком подается в отстойник-флокулятор, затем в делитель потока и далее на фильтры. Часть фильтрата (~ 10 %) используется для промывки фильтров, другая отводится в пруд-стабилизатор, рассчитанный на пребывание в нем воды не менее пяти суток. В пруду-стабилизаторе за счет поглощения углекислого газа из атмосферы происходит уменьшение рН и снижение жесткости воды (выделяется карбонат кальция)



Осветленную воду из пруда-стабилизатора можно или непосредственно сбрасывать в водоем, или осуществлять такой сброс через систему ботанических площадок, которые за счет развития высшей водной растительности дополнительно снижают концентрацию тяжелых и цветных металлов, железа, солей жесткости, а также фосфатов и фторидов. Грязные промывные воды фильтров отводятся в резервуар грязной промывной воды и направляются на очистку в приемный резервуар. Осадок, выделяющийся в отстойниках-флокуляторах, периодически откачивается в буферную емкость, которая обеспечивает равномерную подачу осадка на обезвреживание. Из буферной емкости осадок с помощью насоса подается в барабанный сгуститель для механического обезвреживания. С целью уменьшения удельного сопротивления осадок

Рис. 3. Схема очистки сточных вод, содержащих ионы металлов, с использованием реагента-осадителя ТМТ-15

1 – приемный резервуар; 2 – насос вихревой самовсасывающий; 3 – вихревой смеситель; 4 – насос-дозатор; 5 – расходный бак раствора известкового молока; 6 – расходный бак реагента-осадителя ТМТ-15; 7 – отстойник-флокулятор; 8 – приемный резервуар осветленных промышленных вод; 9 – насос вихревой; 10 – фильтры сорбционные; 11 – резервуар грязной промывной воды; 12 – насосы подачи промывной воды; 13 – резервуары очищенной воды для промывки фильтров; 14 – пруд-стабилизатор; 15 – насосы подачи фугата в голову сооружений; 16 – резервуар фугата; 17 – фильтр-пресс ленточный; 18 – расходный резервуар флокулянта; 19 – насос-дозатор; 20 – буферный резервуар осадка; 21 – насосы осадка; 22 – насос-дозатор.

Трубопроводы (B1, B3 – хозяйственно-питьевой и технической воды; B12, B13 – подачи и отведения промывной воды; K15 – промышленных вод; K20 – фугата и осветленной промывной воды; P1, P2 – подачи раствора известкового молока и флокулянта; AO – подачи сжатого воздуха; O – осадка)

Fig. 3. Scheme of wastewater treatment containing metal ions using TMT-15 precipitant

1 – receiving tank; 2 – self-priming vortex pump; 3 – vortex mixer; 4 – dosing pump; 5 – supply tank of lime milk solution; 6 – supply tank of TMT-15 precipitant; 7 – sump-flocculator; 8 – receiving tank of clarified industrial waters; 9 – vortex pump; 10 – sorption filters; 11 – reservoir of dirty wash water; 12 – wash water supply pumps; 13 – tanks of purified water for washing filters; 14 – stabilizer pond; 15 – pumps for supplying centrate to the head of structures; 16 – centrate tank; 17 – belt filter press; 18 – flocculant supply tank; 19 – dosing pump; 20 – sediment buffer tank; 21 – sludge pumps; 22 – dosing pump.

Pipelines (B1, B3 – household-drinking and technical water; B12, B13 – supply and discharge of wash water; K15 – industrial water; K20 – centrifuge and clarified wash water; P1, P2 – supply solution of milk of lime and flocculant; AO – supply of compressed air; O – sediment)

перед подачей в барабанный сгуститель обрабатывается раствором флокулянта Праестол. Обезвоженный осадок (влажностью ~ 75 %) вывозится на утилизацию. Осветленная вода из сгустителей и фильтрат из узла механического обезвоживания отводятся в смеситель на доочистку.

В настоящее время не разработаны приемлемые по технико-экономическим параметрам методы глубокой очистки промышленных сточных вод от ионов тяжелых металлов, поэтому для некоторых условий металлургических предприятий использование пруда-стабилизатора и ботанических площадок может способствовать снижению общего содержания за счет протекания в них биологических и сорбционных процессов [10].

Главной проблемой современных технологических схем очистки сточных вод является разработка экологически безопасных технологий с замкнутым циклом. Сложившаяся в настоящее время ситуация в этой области исследований вызвала необходимость совершенствования реагентных технологий очистки загрязненных растворов и технологических жидкостей гальванического производства для комплексного решения ресурсосберегающих и экологических проблем.

Выводы. 1. Сточные воды гальванического производства машиностроения и металлообработки являются одними из самых токсичных, поэтому требования к их очистке весьма жесткие.

2. Анализ литературных источников и патентной документации показал, что наиболее часто для обезвреживания сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов, практикуется реагентный метод, однако при использовании стандартных реагентов не всегда обеспечивается требуемая степень извлечения соединений тяжелых металлов, что приводит к необходимости дополнительной очистки другими методами.

3. Обоснованы и экспериментально определены оптимальные условия проведения реагентного обезвреживания при добавлении современного реагента – осадителя ТНТ-15 для ионов тяжелых металлов в сточной воде.

4. Планирование эксперимента позволило получить математическое описание объекта исследования – статистическую математическую модель, которая может быть основой решения задач оптимизации обезвреживания сточных вод гальванического производства.

5. Разработана современная схема по обезвреживанию сточных вод с применением нового реагента – осадителя ТНТ-15.

Список источников

1. Прудников Н.А. Современные технологии обезвреживания гальванических стоков машиностроительных производств // Современные материалы, техника и технологии. 2017. № 1(9). С. 51–56.
2. Виноградов С.С. Экологически безопасное гальваническое производство. М.: Глобус, 1998. 302 с.
3. Сироткин В.И., Бобылева Е.А., Кругликова Е.С., Тураев Д.Ю. Очистка промышленных стоков гальванических производств // Гальванотехника и обработка поверхности. 2005. Т. 13, № 1. С. 44–49.
4. Буренин В.В., Иванина Е.С. Новые технические решения проблемы очистки и обезвреживания сточных вод промышленных предприятий // Охрана окружающей среды. 2016. № 3. С. 29–38.

5. Илюшина С.В. Методы оптимизации технологических процессов // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2014. Т. 17, № 8. С. 323–327.
6. Лунев В.А. Математическое моделирование и планирование эксперимента. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 154 с.
7. Ушева Н.В., Мойзес О.Е., Митянина О.Е., Кузьменко Е.А. Математическое моделирование химико-технологических процессов: Учеб. пособие. Томск: Изд-во ФГ БОУ ВПО НИ ТПУ, 2014. 135 с.
8. Холодов В.А. Математическое моделирование и оптимизация химико-технологических процессов. СПб.: Изд-во АНО НПО «Профессионал», 2003. 480 с.
9. Закгрейм А.Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов. М.: Химия, 1982. 288 с.
10. Скубилин М.Д., Письменов А.В., Гусев Б.А. Проблемы ресурсосбережения и экологической безопасности в гальванотехнологии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2004. № 2. С. 46–51.

References

1. Prudnikov N.A. Modern technologies for the neutralization of galvanic wastewater from machine-building industries. *Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, equipment and technologies*. 2017; (1): 51–56. (In Russ.).
2. Vinogradov S.S. Environmentally friendly electroplating. Moscow: Globus, 1998. 302 p. (In Russ.).
3. Sirotkin V.I., Bobyleva E.A., Kruglikova E.S., Turaev D.Yu. Purification of industrial effluents from galvanic production. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti = Galvanotechnics and surface treatment*. 2005; 13(1): 44–49. (In Russ.).
4. Burenin V.V., Ivanina E.S. New technical solutions to the problem of cleaning and neutralization of wastewater from industrial enterprises. *Okhrana okruzhayushchey sredy = Environmental Protection*. 2016; (3): 29–38. (In Russ.).
5. Ilyushina S.V. Methods for optimizing technological processes. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Kazan Technological University*. 2014; 17(8): 323–327. (In Russ.).
6. Lunev V.A. Mathematical modeling and experiment planning. St. Petersburg: Publishing house of Polytechnic University, 2012. 154 p. (In Russ.).
7. Usheva N.V., Moyzes O.E., Mityanina O.E., Kuz'menko E.A. Mathematical modeling of chemical-technological processes: Tutorial. Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2014. 135 p. (In Russ.).
8. Kholodov V.A. Mathematical modeling and optimization of chemical-technological processes. St. Petersburg: Publishing house of ANO NPO "Professional", 2003. 480 p. (In Russ.).
9. Zakgreym A.Yu. Introduction to the modeling of chemical-technological processes. Moscow: Chemistry, 1982. 288 p. (In Russ.).
10. Skubilin M.D., Pis'menov A.V., Gusev B.A. Problems of resource saving and environmental safety in galvanotechnology. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature = Technology and design in electronic equipment*. 2004; (2): 46–51. (In Russ.).

Информация об авторах

Ю.Л. Сколубович – доктор технических наук, профессор, skolubovich@sibstrin.ru

С.С. Курилин – инженер, wiza91@mail.ru

Т.А. Курилина – кандидат технических наук, доцент, ctrelok91@mail.ru

Т.Я. Пазенко – кандидат технических наук, доцент, razenkotat@yandex.ru

Е.Л. Войтов – доктор технических наук, профессор, voitovel@ya

Information about the authors

Yu.L. Skolubovich – DSc, Professor, skolubovich@sibstrin.ru

S.S. Kurilin – Engineer, wizya91@mail.ru

T.A. Kurilina – PhD, Ass. Professor, ctrelok91@mail.ru

T.Ya. Pazenko – PhD, Ass. Professor, pazenkotat@yandex.ru

E.L. Voytov – DSc, Professor, voitovel@ya

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.01.2023
Одобрена после рецензирования 27.02.2023
Принята к публикации 02.03.2023

The article was submitted 26.01.2023
Approved after reviewing 27.02.2023
Accepted for publication 02.03.2023