

Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов

Water supply, sewage, water conservation construction systems

Научная статья

УДК 628.316.12

DOI: 10.14529/build250408

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕДИ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД С МАЛОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ МЕТАЛЛА МЕТОДОМ ЭКСТРАКЦИИ

М.С. Сурина¹, С.Е. Денисов^{2✉}, М.В. Денисова², Р.Х.М. Касем², К.В. Величко²

¹ ООО «АС-Строй», Санкт-Петербург, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

[✉] denisovse@susu.ru

Аннотация. Актуальность задачи очистки промышленных стоков проявилась при оценке последствий их сброса в водные объекты. Одним из главных загрязнителей поверхностных и подземных вод являются промышленные предприятия цветной металлургии.

Распространенные в настоящее время методы очистки сточных вод от меди имеют экологическую направленность – охрану водных объектов от загрязнения. Экономическая эффективность реабилитационных мероприятий на основе имеющихся методов, как правило, крайне низкая или отсутствует вообще.

Выход видится в возможности получения в чистом виде меди как продукции, пользующейся высоким спросом. В настоящее время это возможно с помощью селективного извлечения при условии высокой концентрации меди в сточных водах. Однако остается нерешенным вопрос извлечения меди из растворов с низкой концентрацией с одновременным получением товарной меди. Поэтому в настоящее время сточные воды с пониженными концентрациями меди являются основными загрязнителями водных объектов.

В представляемой статье даны результаты опытных работ селективного извлечения меди методом экстракции из сточных вод с низкими концентрациями с применением нового экстрагента.

Ключевые слова: экстракция, загрязнение водных объектов, получение чистовой меди, лабораторные исследования, концентрация меди в растворах

Для цитирования. Анализ возможности извлечения меди из сточных вод с малой концентрацией металла методом экстракции / М.С. Сурина, С.Е. Денисов, М.В. Денисова и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2025. Т. 25, № 4. С. 69–75. DOI: 10.14529/build250408

Original article

DOI: 10.14529/build250408

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF EXTRACTING COPPER FROM WASTEWATER WITH LOW METAL CONCENTRATION BY EXTRACTION METHOD

M.S. Surina¹, S.E. Denisov^{2✉}, M.V. Denisova², R.H.M. Qasem², K.V. Velichko²

¹ ООО AS-Story, St. Petersburg, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

[✉] denisovse@susu.ru

Abstract. The urgency of the problem of industrial wastewater treatment became apparent after assessing the consequences of its discharge into water bodies. Non-ferrous metallurgy enterprises are one of the main sources of pollution of surface and groundwater.

Today, common methods of wastewater treatment from copper are aimed at protecting the environment. However, their economic efficiency is usually low or non-existent.

© Сурина М.С., Денисов С.Е., Денисова М.В., Касем Р.Х.М., Величко К.В., 2025.

The solution to the problem may lie in the possibility of obtaining pure copper, a product that is in high demand. Currently, this is possible due to selective extraction at high concentrations of copper in wastewater. However, the issue of extracting copper from solutions with low concentrations in the production of commercial copper remains unresolved.

Thus, wastewater with a low concentration of copper is currently the main source of pollution of water bodies.

This article describes the results of an experiment aimed at the selective extraction of copper from low-concentration wastewater using a new extracting.

Keywords: extraction, pollution of water bodies, obtaining pure copper, laboratory research, concentration of copper in solutions

For citation. Surina M.S., Denisov S.E., Denisova M.V., Qasem R.H.M., Velichko K.V. Analysis of the possibility of extracting copper from wastewater with low metal concentration by extraction method. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture.* 2025;25(4):69–75. (in Russ.). DOI: 10.14529/build250408

Введение

Существующая проблема очистки загрязненных вод от металлов привела к появлению большого количества методов очистки сточных вод от меди. Однако большинство из них не позволяют селективно извлекать металлы [1–4].

Эта проблема решается применением метода цементации, основанного на реакции замещения ионов меди на поверхности железного лома. Однако цементация имеет ряд недостатков, основными из которых являются необходимость высоких концентраций меди в растворах и накопление ионов железа в воде [5, 6]. Последние представляют не меньшую опасность для водного объекта.

Метод экстракции по сравнению с другими методами обладает рядом преимуществ, заключающихся в следующем:

- обеспечивается высокая селективность, позволяющая разделить близкие по свойствам элементы (меди, цинк, железо и др.);
- эффективное разделение жидких фаз;
- возможность регенерации используемых реагентов, что значительно удешевляет процесс очистки сточных вод [2, 3];
- возможность извлечения меди из растворов с пониженной концентрацией, что и доказывается в данной статье.

Проведение экспериментов

По результатам литературно-патентного обзора [6–10] было выявлено, что все предыдущие исследования по вопросу экстракции меди, лабораторные и натурные работы проводились на растворах с концентрациями меди более 1 г/л, в то время как большинство сточных вод имеют концентрацию значительно меньшую. В данной работе начальной была принята концентрация меди в исходной воде 800 мл/л.

При поиске наиболее эффективного экстрагента учитывались следующие факторы:

- 1) эффективность извлечения меди из растворов;
- 2) экологическая и санитарная безопасность;
- 3) стоимость;

4) доступность;

5) возможность регенерации.

Такими свойствами обладают общедоступные растительные масла.

Механизм экстрагенции жиров и масел заключается в возможности присоединения атомов водорода при наличии в молекулах двойных связей. Он характерен для ненасыщенных жирных кислот.

Анализ показал, что наибольшее количество мононенасыщенных жирных кислот содержит оливковое масло, в котором содержание олеиновой кислоты ($C_{17}H_{33}COOH$) колеблется от 55 до 85 %. Это гораздо больше, чем в любом другом масле или жире. Кроме того, следует учесть, что основным источником олеиновой кислоты является именно оливковое масло.

Повышенная эффективность оливкового масла подтверждается в работе [6]. Однако в данной работе использовались растворы с более высокими концентрациями меди.

Методика проведения лабораторных исследований представлена на рис. 1.

Одной из первых задач, поставленных в исследовании, является нахождение оптимального соотношения объемов испытуемого раствора с объемом экстрагента (B:O).

На рис. 2 приведена зависимость концентрации извлеченной меди от соотношения B:O. Ожидаемый результат был спрогнозирован после проведения опытов.

Как следует из графика, максимальная эффективность извлечения меди составляет 6 к 1, что противоречит прогнозному значению, полученному по литературно-патентным исследованиям. Это означает, что экстракция меди из малоконцентрированных растворов имеет свои особенности по сравнению с растворами с высокой концентрацией.

В реалии сточные воды, загрязненные медью, имеют различные значения pH. Эти значения являются управляемыми факторами, то есть имеется возможность изменять их в технологическом процессе извлечения меди из сточных вод. Поэтому

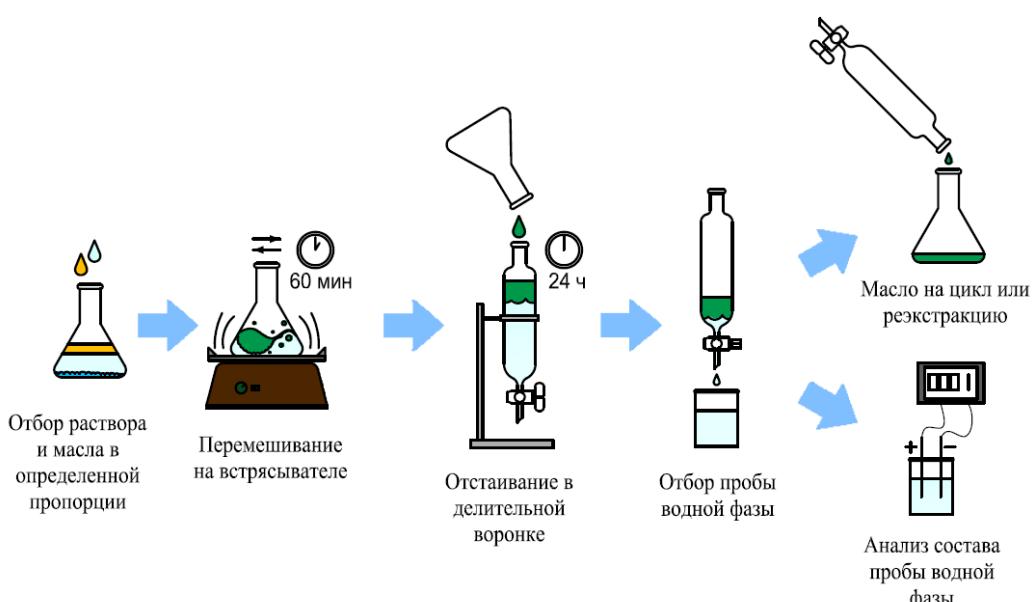


Рис. 1. Методика проведения лабораторных исследований

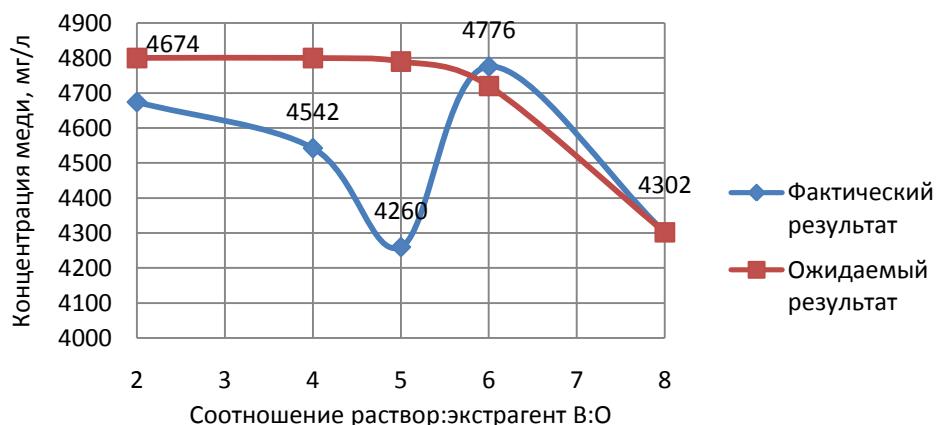


Рис. 2. График зависимости эффективности извлечения меди из раствора со значением pH 10,1 от соотношения раствора:экстрагент В:О

теоретический и практический интерес представляет установление влияния pH водного раствора на интенсивность извлечения меди.

Зависимость концентрации извлеченной маслом меди от pH раствора представлена на рис. 3.

Как следует из приведенного графика (рис. 3), наилучшим pH раствора является pH 7–9. До значений меньше 7 процесс извлечения меди из раствора протекает весьма слабо либо вовсе не идет. При значениях выше 9 мутность экстракта увеличивается при одновременном снижении эффективности извлечения меди (рис. 4).

Установленное наилучшее значение водородного показателя при экстракции меди подтверждается также такими показателями эффективности процесса экстракции оливковым маслом, как коэффициент распределения (отношение концентрации элемента А в органической среде к водной в условиях установившегося экстракционного равновесия (равновесные концентрации)), так и степень экстракции (доля экстрагируемого элемента,

перешедшего в экстракт, от общего его количества в обеих фазах). Результаты расчетов показаны на рис. 5, 6.

Как видно из рис. 5, 6, оптимальным значением водородного показателя исходного водного раствора является 8. Степень извлечения меди составляет (99,5 %).

Именно поэтому это значение водородного показателя было выбрано для последующих экспериментов.

Полученные результаты по выявлению оптимальных параметров процесса экстракции позволили провести итоговые исследования по вопросу выявления эффективности извлечения меди из растворов. Для этого было заготовлено пять проб с концентрацией меди 800 мл/л. Значение pH раствора – 8. Соблюдалось соотношение раствора к экстрагенту 6:1.

Результаты концентрации меди в экстракте и остаточная концентрация меди в растворе (рафинате) показаны на рис. 7.

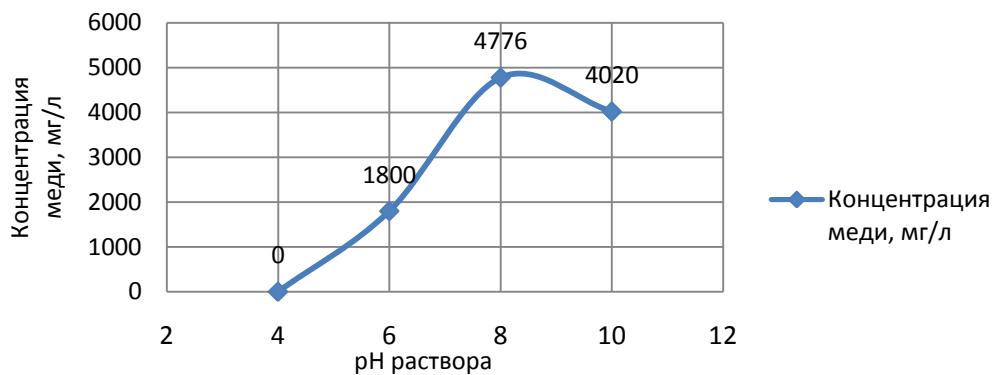


Рис. 3. Зависимость эффективности извлечения меди из раствора от pH

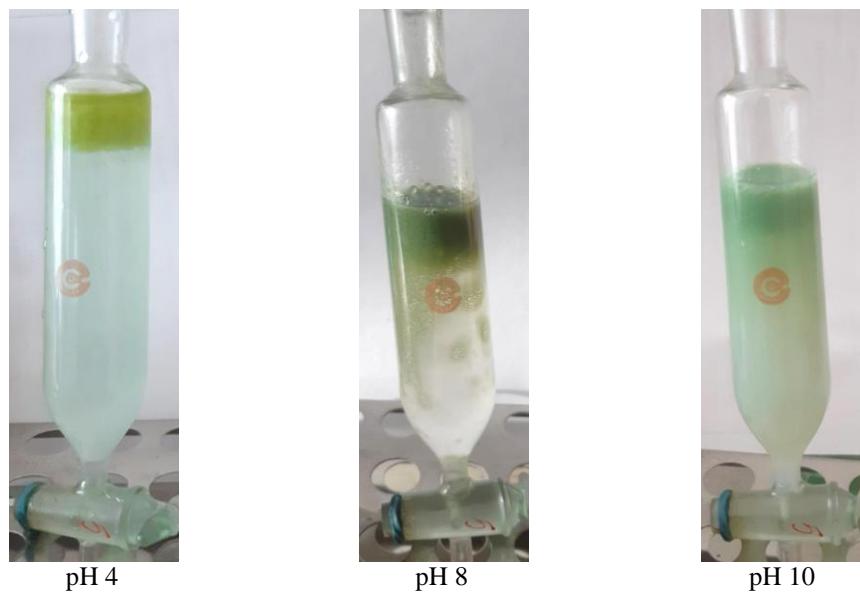


Рис. 4. Внешний вид экстракта при различных значениях водородного показателя исходного раствора



Рис. 5. Зависимость коэффициента распределения меди от водородного показателя исходного раствора

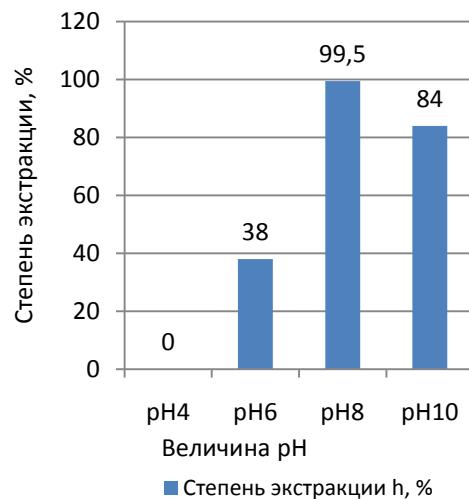


Рис. 6. Зависимость степени экстракции меди в оливковое масло от pH исходного раствора

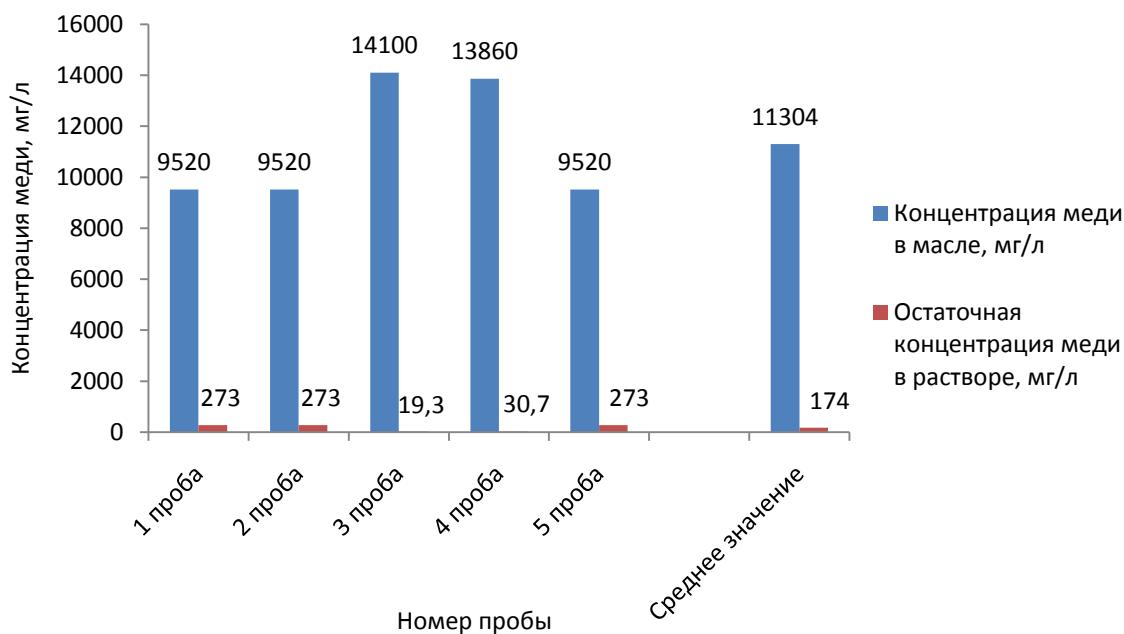


Рис. 7. Концентрации меди в растворе и в оливковом масле после экстракции

Как видно из рис. 7, максимальная концентрация меди в масле наблюдалась в третьей пробе. Среднее значение в группе составляет 11300 мг/л. Концентрация меди в экстракте увеличилась в 14 раз (с 800 мг/л до 11 300 мг/л).

Следует отметить, что извлечение меди из раствора с применением электроэкстракции возможно только тогда, когда ее концентрация превышает 635 мг/л. Только тогда медь будет осаждаться на электродах. Однако при столь малой концентрации затраты на электроэнергию столь высоки, что производство становится нерентабельным.

Таким образом, проведенными исследованиями было доказано, что количество меди, которую можно экстрагировать с помощью оливкового масла, в 17,8 раза превышает то количество, которое необходимо для процесса электролиза.

Полученными результатами было доказано, что оливковое масло является весьма эффективным экстрагентом и может применяться в технологии очистки сточных вод от меди и получения товарной продукции – чистовой меди.

Организовать добычу чистовой меди возможно в зоне затопления пиритовых хвостов в старой пойме р. Сак-Элга Челябинской области [11]. Экологические мероприятия, реализованные на этой реке в целях предотвращения загрязнения питьевого источника Челябинской агломерации – Аргазинского водохранилища, предусматривали отвод чистого стока реки по другому руслу и создание пруда для сбора оставшегося загрязненного стока реки на месте залегания пиритовых хвостов.

По нашим водобалансовым расчетам возможно организовать бессточный режим этого пруда, в этом случае загрязненный сток, поступающий в пруд, будет идти на испарение. Это приведет к тому, что концентрация меди в воде будет повышаться и возникнет возможность организовать эффективный процесс извлечения меди и других металлов (например, цинка) из этих вод.

Выводы и предложения

Проведенные исследования позволили выявить следующее:

1. Оптимальными управляемыми параметрами процесса экстракции меди с помощью оливкового масла, используемого в качестве экстрагента, при начальной концентрации меди в растворе 800 мл/л являются

- водородный показатель раствора равный 8;
- соотношение объема водного раствора к экстрагенту при экстракции 6 к 1.

2. Использование оливкового масла в экстракции из растворов с концентрацией 800 мл/л позволяет увеличить концентрацию меди в экстракте в 14 раз (с 800 мг/л до 11 300 мг/л).

3. Полученные значения концентрации в экстракте позволяют получать чистовую медь методом электроэкстракции.

4. Перспективным местом добычи меди из сточных вод и предотвращения загрязнения Аргазинского водохранилища – источника питьевого водоснабжения Челябинской агломерации – является пруд, созданный в зоне затопления пиритовых хвостов в старой пойме р. Сак-Элга.

Список литературы

1. Способ извлечения меди из водных растворов. А.с. RU2186135C1. Л.А. Воропанова, В.Н. Титухина, Ю.Е. Крутских. 2012.
2. Пирмагомедов Д.А. Защита водных объектов от загрязнений отвалами забалансовых медных руд (на примере Кальмакырского рудника): автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: РосНИИВХ, 1996. 20 с.
3. Мубанга П., Маковская О. Экстракция меди из растворов подземного выщелачивания с помощью M5774 // Физика. Технологии. Инновации: тезисы докладов VII Международной молодежной научной конференции, посвященной 100-летию Уральского федерального университета (Екатеринбург, 18–22 мая 2020 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2020. С. 596–597.
4. № 7-ФЗ от 10.01.2002 «Об охране окружающей среды» (редакция от 26.07.2019) [http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/].
5. Динмухаметова Л.С., Попов В.Г., Тягунова В.Г., Пояркова Е.В. Оптимизация технологии цементационного извлечения меди из сернокислых рудничных вод // Фундаментальные исследования. 2015. № 6-1. С. 9–13.
6. Хамхаш А. Исследование и разработка способов получения меди из концентратов месторождения Эрденэ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСиС, 2007. 29 с.
7. Синявская О.М. Разработка и обоснование параметров технологии переработки смешанных медных руд Жезказганского региона: дис. ... канд. техн. наук. Караганда, 2019. 172 с.
8. Современные проблемы химии и технологий экстракции. Сборник статей, Т.1. М.: РАН, 1999. 196 с.
9. Патент № 2049073 Российской Федерации, МКИ6 с 02 F1/ 42. Способ ионообменной очистки сточных вод и технологических растворов от ионов меди и никеля: № 94012920/26: заявл. 21.4.94: опубл. 27.11.95, бул. № 33/ Митченко Т.Е., Постолов Л.Е., Стендер П.В., Мотовски В.
10. Рыбаков Ю.С. Охрана и предотвращение загрязнения водных объектов от стока с техногенных образований: автореф. дис. канд. техн. наук. Екатеринбург: РосНИИВХ, 1998. 40 с.
11. Ulrich D.V., Timofeeva S.S., Denisov S.E. Assessment of ecological impact of mineral mining and processing industry in the Chelyabinsk Region // Gornyi Zhurnal. 2015. No. 5, pp. 94–99.

References

1. Voropanova L.A., Titukhina V.N., Krutskikh Yu.E. Sposob izvlecheniya medi iz vodnykh rastvorov [Method for extracting copper from aqueous solutions]. A.s. RU2186135C1 . 2012. (in Russ.)
2. Pirmagomedov D.A. Zashchita vodnykh ob"ektorov ot zagryazneniy otvalami zabalansovykh mednykh rud (na primere Kal'makyrskogo rudnika): Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. [Protection of water bodies from pollution by dumps of off-balance copper ores (on the example of the Kalmakyr mine). Abstract of cand. sci. diss.]. Yekaterinburg: RosNIIVKh; 1996. 20 p. (in Russ.)
3. Mubanga P., Makovskaya O. [Extraction of copper from underground leaching solutions using M5774. Physics. Technologies. Innovations. Abstracts of reports at the VII International Youth Scientific Conference dedicated to the 100th anniversary of the Ural Federal University (Yekaterinburg, May 18–22, 2020)]. In: Fizika. Tekhnologii. Innovatsii. Tezisy dokladov VII Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu Ural'skogo federal'nogo universiteta (Ekaterinburg, 18–22 maya 2020 g.]. Ekaterinburg, UrFU, 2020, pp. 596–597. (in Russ.)
4. № 7-FZ ot 10.01.2002 “Ob okhrane okruzhayushchey sredy” (redaktsiya ot 26.07.2019) [Federal Law No. 7-FZ dated January 10, 2002, “On Environmental Protection” (as amended on July 26, 2019)]. (in Russ.)
5. Din'mukhametova L.S., Popov V.G., Tyagunova V.G., Poyarkova E.V. [Optimization of the cementation extraction of copper from sulfuric mine waters]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Basic research], 2015, no. 6-1, pp. 9–13. (in Russ.)
6. Khamkhash A. Issledovanie i razrabotka sposobov polucheniya medi iz kontsentrata mestorozhdeniya Erdenet: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. [Research and development of methods for obtaining copper from the concentrate of the Erdenet deposit. Abstract of cand. sci. diss.]. Moscow: MISiS; 2007. 29 p. (in Russ.)
7. Sinyavskaya O.M. Razrabotka i obosnovanie parametrov tekhnologii pererabotki smeshannykh mednykhrud Zhezkazganskogo regiona: diss. kand. tekhn. nauk. [Development and substantiation of parameters of technology of processing of mixed copper ores of the Zhezkazgan region. Cand. sci. diss.]. Karaganda; 2019. 172 p. (in Russ.)
8. Sovremennye problemy khimii i tekhnologii ekstraktsii. Sbornik statey, T. 1 [Modern problems of chemistry and extraction technology. Collection of articles, Vol. 1]. Moscow, RAS, 1999. 196 p. (in Russ.)
9. Mitchenko T.E., Postolov L.E., Stender P.V., Motevski V. Sposob ionoobmennoy ochistki stochnykh vod i tekhnologicheskikh rastvorov ot ionov medi i nikelya [Method of ion-exchange purification of wastewater and process solutions from copper and nickel ions]. Patent RF no RU 2049073, MKI6 with 02 F1/ 42. №94012920/ 26.; application 21.04.94. published 27.11.95. bulletin No. 33. (in Russ.)

10. Rybakov Yu.S. Okhrana i predotvratshchenie zagryazneniya vodnykh ob'ektov ot stoka s tekhnogennykh obrazovaniy: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [Protection and prevention of water object pollution from runoff from man-made formations. Abstract of cand. sci. diss.]. Yekaterinburg: RosNIIVKh; 1998. 40 p. (in Russ.)

11. Ulrich D.V., Timofeeva S.S., Denisov S.E. Assessment of ecological impact of mineral mining and processing industry in the Chelyabinsk Region. *Gornyi Zhurnal*, 2015, no. 5, pp. 94–99.

Информация об авторах:

Сурина Мария Сергеевна, магистр, руководитель ООО «AC-Строй», Санкт-Петербург, Россия;
surinams@susu.ru

Денисов Сергей Егорович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия;
denisovse@susu.ru

Денисова Марина Викторовна, магистр, преподаватель кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; denisovamv@susu.ru

Касем Раби Хуссейн Мохаммед, аспирант кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; rabeagaseem@gmail.com

Величко Кирилл Владимирович, аспирант кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; k_velichko@mail.ru

Information about the authors:

Maria S. Surina, Master of Science, Director of OOO AS-Story, St. Petersburg, Russia; surinams@susu.ru

Sergey E. Denisov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Town Planning, Engineering Networks and Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; denisovse@susu.ru

Marina V. Denisova, Master of Science, Lecturer, the Department of Town Planning, Engineering Networks and Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; denisovamv@susu.ru

Rabi H.M. Qasem, Postgraduate student, the Department of Town Planning, Engineering Networks and Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; rabeagaseem@gmail.com

Kirill V. Velichko, Postgraduate student, the Department of Town Planning, Engineering Networks and Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; k_velichko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.05.2025, принята к публикации 20.08.2025.

The article was submitted 17.05.2025, approved after reviewing 20.08.2025.