# Многокомпонентная загрузка для очистки сточных вод

**Самодолова Олеся Александровна**
старший преподаватель, кафедра водопользования и экологии, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный, samodolova@mail.ru,

**Ульрих Дмитрий Владимирович**
доктор технических наук, доцент, декан факультета инженерной экологии и городского хозяйства, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, dulrikh@lan.spbgasu.ru,

**Лонзингер Татьяна Мопровна**
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем, Южно-Уральский государственный университет, lonzingertm@susu.ru,

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

**Самодолова Кристина Александровна**
студент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, kristina samodolova@mail.ru

Наиболее опасными поллютантами загрязняющие водные объекты в настоящее время являются тяжелые металлы, соединения которых имеют высокую растворимость в воде, например, алюминий и железо. Несмотря на то, что данные металлы широко распространены на планете (занимают 3 и 4 место по распространенности элементов в земной коре), их высокие концентрации в стоках крайне опасны для живых организмов, так как они способны накапливаться в донных отложениях, встраиваться в пищевые цепочки, замедляя рост и развитие растений. Эффективным методом по предотвращению попадания в водоемы тяжёлых металлов в результате сброса неочищенных поверхностных сточных вод с урбанизированных территорий является сорбция.

В статье описано исследование, посвящённое разработке эффективной многокомпонентной загрузки из материалов, являющихся отходами сельскохозяйственного производства, производства стекла и очистки воды: солома, лузга гречихи (гранулированная), скорлупа грецкого ореха, лузга конопли, отходы станции водоподготовки и пеностекло.

На их основе разработаны три состава многокомпонентной загрузки, изготовлены образцы и проведены исследования сорбционных характеристик в различных условиях. Полученные экспериментальные данные позволили выбрать оптимальный вариант состава многокомпонентной загрузки, состоящей из осадка очистки природных вод, скорлупы грецкого ореха, лузги конопли и гранулированной лузги гречихи. Эффективность очистки поверхностных сточных вод от алюминия и железа многокомпонентной сорбционной загрузкой составляет 99%.

**Введение**

В настоящее время одной из самых острых глобальных и региональных проблем является загрязнение водных объектов тяжелыми металлами. Тяжелые металлы накапливаются в донных отложениях и биомассе и способны передаваться по пищевым цепочкам. Помимо традиционных путей попадания этих поллютантов в водные объекты, например, сброс неочищенных промышленных сточных вод предприятий, эти загрязнения попадают в водоемы благодаря поверхностным сточным водам с урбанизированных территорий. Протекая по водонепроницаемым поверхностям по территории крупных промышленных городов, дождевые, талые и поливомоечные воды способны аккумулировать в себе органические и неорганические загрязнители перемещая их таким образом в водоем. По данным аналитической службы аудиторско-консалтинговой группы FinExpertiza на основе оперативных данных Росгидромета проблема экстремально высокого загрязнения рек, озер и других пресноводных объектов весьма велика. Самыми распространенными загрязняющими веществами из тяжелых металлов являлись соединения цинка, соединения меди, никеля, общего железа, алюминия [1].

Согласно анализу, проведенному нами и представленному в таблице 1, в поверхностных сточных водах крупных промышленных центров наиболее высокие концентрации имеют алюминий и железо.

Несмотря на то, что алюминий является третьим по распространению элементом в земной коре, он негативно влияет на экосистемы: токсичен для многих видов рыб, растений и беспозвоночных, оказывает влияние на pH воды, накапливается в тканях водных организмов и способен по пищевым цепочкам достигать организма человека, вызывая различные невротические и онкозаболевания, нарушает фосфорно-кальциевый обмен, тормозит синтез гемоглобина и другое [8]. Железо, идущее в списке самых распространённых элементов земной коры сразу после алюминия и занимающее четвертое место является также опасным при превышении ПДК. Железо относится к числу эссенциальных (жизненно важных) для человека микроэлементов, участвуя в процессах кроветворения, внутриклеточного обмена и регулирования окислительно-восстановительных процессов. Но его избыток способен вызывать в организме человека нарушения и патологии, в том числе накапливаться до токсической концентрации в органах и тканях, включая суставы, печень, эндокринные железы и сердце, нарушать функцию центральной нервной системы, усугубляя психические расстройства и нередко становится причиной развития дерматитов, и аллергических реакций [9].

*Таблица 1*
*Содержание тяжелых металлов в поверхностном стоке крупных промышленных центров городов, мг/л*

| № | Показатель | | Алюминий | Железо |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Челябинск (данные авторов) | min | 0,18 | 0,2 |
| | | max | 3,101 | 4,541 |
| 2 | Санкт- Петербург [2] | min | 0 | 1 |
| | | max | 0,6 | 2,06 |
| 3 | Пермь [3] | min | 0,07 | 0,03 |
| | | max | 0,45 | 0,64 |
| 4 | Самара [4] | min | 0,01 | 0,37 |
| | | max | 0,24 | 2,05 |
| 5 | Нижний Новгород [5] | min | - | 0,28 |
| | | max | - | 2,63 |
| 6 | Липецк [6] | min | - | 2,41 |
| | | max | - | 4,05 |
| 7 | Волгоград [7] | сред. | 0,223 | 0,422 |
| 8 | Хабаровск [6] | сред. | - | 1,56 |
| 9 | **ПДК, р.х.** | | **0,04** | **0,1** |

Поэтому высокие концентрации алюминия и железа в неочищенных поверхностных сточных вод с урбанизированных территорий, превышающие ПДК, являются опасным фактором, негативно влияющим на экологические системы. В качестве одного из способов предотвращения загрязнений водных объектов предлагается использование многокомпонентной сорбционной загрузки в биоинженерном сооружении.

Цель исследования – разработка многокомпонентной сорбционной загрузки для очистки от тяжелых металлов (алюминия и железа) поверхностных сточных вод с урбанизированных территорий.

**Материалы и методы исследования**

Для получения экологичного, доступного и экономически рентабельного продукта в качестве основы для многокомпонентной сорбционной загрузки были выбраны отходы производства: солома (С), лузга гречихи (гранулированная) (ЛГ), скорлупа грецкого ореха (СГО), лузга конопли (ЛК), отходы станции водоподготовки (ОСВ) и пеностекло (П).

Для улучшение сорбционных свойств выбранных материалов были использованы следующие технологические приёмы:

- пшеничная солома – была измельчена до размера частиц 2-10 мм, и прошла карбонизацию при температуре 80 °С на протяжении 10 минут, для повышения эффективности очистки и уничтожении возможной патогенной микрофлоры;

- скорлупа грецкого ореха - была измельчена до размера частиц 4-6 мм и подвергнута термической обработке (карбонизации) в течении 14-16 минут при температуре 295-300°С;

- отходы станции водоподготовки –обжиг при температуре 600 °С в течении 5 часов для удаления органической части.

Исходные материалы после обработки исследовали на электронном микроскопе. Результаты электронно-микроскопического исследования представлены на рисунке 1.




*Рисунок 1 – Результаты электронно-микроскопического анализа: а – солома; б – лузга гречихи; в – скорлупа грецкого ореха; г - лузга конопли; д -отходы станции водоподготовки; е – пеностекло*

На микрофотографиях видно, что все материалы обладают развитой поверхностью и пористостью, что является предпосылкой для применения их в качестве потенциальных сорбентов.

Исследования сорбционных характеристик, выбранных материалов (моносорбентов) проводились на смешанной пробе поверхностных сточных вод крупного промышленного города – Челябинска, концентрации алюминия и железа в которой приведены в таблице 2.

*Таблица 2*
*Химический состав сорбата для экспериментов, мг/л*

| Показатель | Al | Fe |
|---|---|---|
| Состав сорбата для моносорбентов | 2,707 | 2,624 |
| Состав сорбата для многокомпонентных загрузок | 3,101 | 4,541 |

Исследования проводились в статических и динамических условиях. Статические условия представлены 3 температурными режимами (-5, 10, 20°С), и различным временем экспозиции. Динамический режим сорбции изучали при температуре 20°С, и скорости фильтрации воды от 0,3 до 15 л/час.

По экспериментальным данным были выбраны материалы для многокомпонентной сорбционной загрузки и разработаны три варианта составов, соотношения компонентов в которых приведено на рисунке 2.

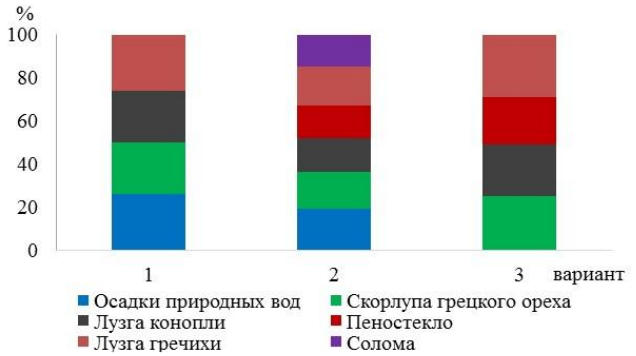



*Рисунок 2 – Состав многокомпонентных загрузок, %*

Вид материалов и их количество в многокомпонентной загрузке выбраны для обеспечения технологически обоснованной скорости фильтрации и глубокой очистки от поллютантов за счет формирования структуры материала с оптимальной пористостью.

**Результаты исследований и их обсуждение**

Для анализа степени извлечения алюминия и железа из поверхностного стока по экспериментальным данным были построены кинетические кривые (рисунки 3-4.)

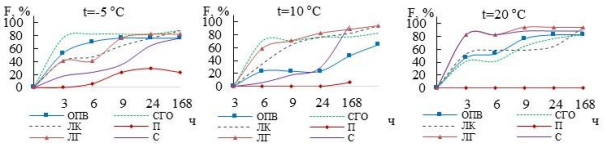



*Рисунок 3 – Кинетические кривые степени извлечения Al моносорбентами, %*

Из рисунка 3 видно, что алюминий максимально извлекается тремя материалами лузгой конопли, лузгой гречихи и соломой при температурах 10°С с эффективностью до 94%, при 20°С лузга конопли и лузга гречихи обеспечивают степень извлечения 94%, а солома – 88%.

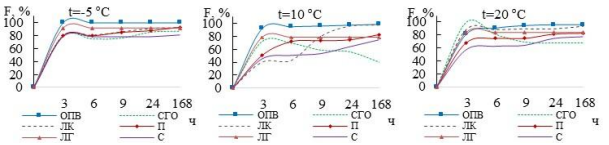



*Рисунок 4 – Кинетические кривые степени извлечения Fe моносорбентами, %*

Железо наиболее эффективно сорбируется осадком от очистки природных вод (99,9%, при температуре -5 °С, и 99% при +10 °С), лузгой конопли – 97% при температуре +10 °С и пеностеклом – 93% при температуре -5 °С.

При проведении исследований в динамическом режиме поверхностные сточные воды подавались через слой сорбента с заданной скоростью фильтрации от 0,3 до 15 л/час. Температура проведения эксперимента 20 °С. В динамических условиях наиболее эффективно поглощают алюминий из поверхностного стока скорлупа грецкого ореха, лузга конопли и солома. Степень извлечения составляет 99,9%. Сорбцию железа с эффективностью 99,9% обеспечивает загрузка из осадок очистки природных вод. Пеностекло и лузга гречихи извлекают из поверхностного стока 97% железа.

Результаты исследования многокомпонентной сорбционной загрузки в статических условиях представлены на рисунках 5 и 6. Варианты загрузок представлены кинетическими кривыми 1, 2, 3.

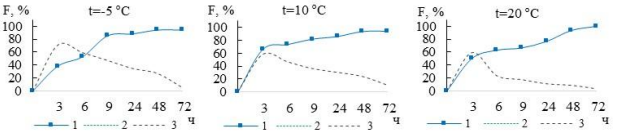



*Рисунок 5 – Кинетические кривые степени извлечения алюминия многокомпонентными загрузками, %*

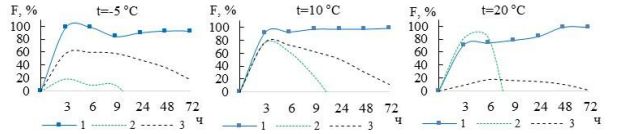



*Рисунок 6 – Кинетические кривые степени извлечения железа многокомпонентными загрузками, %*

Полученные данные показывают, что наиболее перспективным составом многокомпонентной сорбционной загрузки является вариант 1, так как позволяет достигать степень очистки стоков свыше 99%. Составы 2 и 3 показали степень очистки загрязненного стока 70%.

Исследования, проведенные в динамических условиях, подтвердили, что вариант многокомпонентной загрузки под номером 1 является наиболее эффективным для использования в технологиях очистки поверхностных сточных вод для извлечения алюминия и железа.

**Заключение и обсуждение**

Наличие тяжёлых металлов в водоемах, в том числе алюминия и железа приводят к негативным экологическим последствиям. Они способны накапливаться в донных отложениях, биомассе растений.

Для предотвращения загрязнения водных объектов используют сорбционные технологии. Снизить затраты позволяет использование в качестве материалов сорбционной фильтрующей загрузки отходов производства: соломы, лузги гречихи (гранулированная), скорлупы грецкого ореха, лузги конопли, отходов станции водоподготовки, пеностекла.

Полученные данные показали наличие потенциальной возможности для эффективного извлечения поллютантов из поверхностных сточных вод исследованными сорбентами.

По результатам проведённых экспериментов, были разработаны три варианта многокомпонентной сорбционной загрузки:

состав под номером 1 – осадки природных вод – 26%, скорлупа грецкого ореха- 24%, лузга конопли – 24%, лузга гречихи (гранулы) – 26%;

состав под номером 2 – осадки природных вод – 19%, скорлупа грецкого ореха – 17%, лузга конопли – 16%, пеностекло – 15%, лузга гречихи (гранулы) – 18%, солома – 15%;

состав под номером 3 – скорлупа грецкого ореха – 25%, лузга конопли – 24%, пеностекло – 22%, лузга гречихи (гранулы) – 29%.

Установлено, что многокомпонентная сорбционная загрузка (состав под номером один), состоящая из осадка природных вод, скорлупы грецкого ореха, лузги конопли и гранулированной лузги гречихи является наиболее эффективной и способна удалять из поверхностного стока свыше 99% алюминия и железа.

**Литература**

1. Количество экстремальных загрязнений рек и водоемов возросло в полтора раза. https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2024/kol-ekstr-zagr-rek-vozroslo/?utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com (дата обращения 09.06.2025).

2. Феофанов Ю.А., Мишуков Б.Г. Особенности формирования состава поверхностных сточных вод и выбор сооружений по их очистке // Вода и экология: проблемы и решения. – 2017. – № 3(71). – С. 49-66. – DOI 10.23968/2305-3488.2017.21.3.49-66.

3. Щукин, И.С., Мелехин А.Г. Качественный состав поверхностного стока с территории г. Перми // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2012. – № 4(8). – С. 110-118.

4. Палагин Е.Д., Быкова П.Г., Пахомова У.М. Исследование основных закономерностей в варьировании качественного состава поверхностных сточных вод Г.О. Самара // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2011. – № 2. – С. 80-82. – DOI 10.17673/Vestnik.2011.02.18.

5. Козлов А.В., Машкин А.М., Дедык В.Е., Воронцова А.А., Акафьева Д.В., Соколов И.С., Кондрашин Б.В., Миронова Ю.И., Тарасов И.А. Эколого-гидрохимическое состояние акваторий Оки и Волги в черте городской агломера-

ции Нижнего Новгорода по показателям катионно-анионного состава и содержания тяжелых металлов // Современные проблемы науки и образования. 2017. № 4.
6. Панфилова О.Н. Доочистки сточных вод от ионов тяжелых металлов сорбентами на основе природных материалов: дис. … канд.тех. наук: 2.1.4 / Панфилова Олга Николаевна. - Самара 2023, 144 с.
7. Москвичева Е.В., Войтюк А.А., Доскина Э.П., Игнаткина Д.О., Юрьев Ю.Ю., Щитов Д.В. Совершенствование технологии очистки городских сточных вод с использованием сорбента на основе избыточного активного ила // ИВД. 2015. №2-2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-tehnologii-ochistki-gorodskih-stochnyh-vod-s-ispolzovaniem-sorbenta-na-osnove-izbytochnogo-aktivnogo-ila (дата обращения: 11.06.2026).
8. Алюминий в воде: невидимая угроза для здоровья и окружающей среды. https://greenium.ru/14464/ (дата обращения 09.06.2026).
9. Влияние железа на качество воды и здоровье. https://www.cge48.ru/nashi-uslugi/laboratornye-issledovaniya_-ispytaniya_-izmereniya/sanitarno-gigienicheskie-issledovaniya/issledovaniya-vody/vliyanie-zheleza-na-kachestvo-vody-i-zdorove..htm (дата обращения 09.06.2026).

**Multi-component loading for wastewater treatment**

**Samodolova O.A., Ulrikh D.V., Lonzinger T.M., Denisov S.E., Samodolova K.A.**
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, South Ural State University, Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov

*JEL classification: C10, C50, C60, C61, C80, C87, C90*

The most dangerous pollutants currently contaminating water bodies are heavy metals, the compounds of which have high solubility in water, for example, aluminum and iron. Despite the fact that these metals are widely distributed on the planet (they rank 3rd and 4th in terms of the abundance of elements in the Earth's crust), their high concentrations in wastewater are extremely dangerous for living organisms, as they can accumulate in bottom sediments, become integrated into food chains, and slow down the growth and development of plants. Sorption is an effective method for preventing the entry of heavy metals into water bodies as a result of the discharge of untreated surface wastewater from urbanized areas. The article describes a study devoted to the development of an effective multi-component bed made from materials that are waste products from agricultural production, glass manufacturing, and water treatment: straw, buckwheat husk (granulated), walnut shells, hemp husk, waste from water treatment plants, and foam glass.

Based on these, three formulations of a multicomponent loading were developed, samples were manufactured, and studies of the sorption characteristics were conducted under various conditions. The obtained experimental data made it possible to select the optimal composition of the multicomponent loading, which consists of natural water treatment sludge, walnut shells, hemp husks, and granulated buckwheat husks. The efficiency of treating surface wastewater from aluminum and iron using a multicomponent sorption loading is 99%.

Keywords: aluminum, iron, water body, multicomponent loading, surface wastewater.

**References**

1. The number of extreme cases of water pollution in rivers and water bodies has increased by 1.5 times. https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2024/kol-ekstr-zagr-rek-vozroslo/?utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com (accessed on 09.06.2025).
2. Feofanov Yu.A., Mishukov B.G. Features of the composition formation of surface wastewater and the choice of treatment facilities // Water and Ecology: Problems and Solutions. – 2017. – No. 3(71). – Pp. 49–66. – DOI 10.23968/2305-3488.2017.21.3.49-66.
3. Shchukin, I.S., Melekhin A.G. The qualitative composition of surface runoff from the territory of the city of Perm // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Urbanistics. – 2012. – No. 4(8). – Pp. 110–118.
4. Palagin E.D., Bykova P.G., Pakhomova U.M. Study of the main patterns in the variation of the qualitative composition of surface wastewater in the Samara City District // Vestnik SGASU. Urban Planning and Architecture. – 2011. – No. 2. – pp. 80-82. – DOI 10.17673/Vestnik.2011.02.18.
5. Kozlov A.V., Mashakin A.M., Dedyk V.E., Vorontsova A.A., Akafyeva D.V., Sokolov I.S., Kondrashin B.V., Mironova Yu.I., Tarasov I.A. Ecological and hydrochemical state of the Oka and Volga water areas within the urban agglomeration of Nizhny Novgorod in terms of cationic-anionic composition and heavy metal content // Modern problems of science and education. 2017. № 4.
6. Panfilova O.N. Post-treatment of wastewater from heavy metal ions with sorbents based on natural materials: dis. ... Candidate of Technical Sciences: 2.1.4 / Olga Nikolaevna Panfilova. - Samara 2023, 144 p.
7. Moskvicheva E.V., Voityuk A.A., Doskina E.P., Ignatkina D.O., Yuryev Yu.Y., Shields D.V. Improving the technology of urban wastewater treatment using a sorbent based on excess activated sludge // IVD. 2015. №2-2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-tehnologii-ochistki-gorodskih-stochnyh-vod-s-ispolzovaniem-sorbenta-na-osnove-izbytochnogo-aktivnogo-ila (date of request: 06/11/2026).
8. Aluminum in water: an invisible threat to health and the environment. https://greenium.ru/14464/ (accessed on 09.06.2026).
9. The impact of iron on water quality and health. https://www.cge48.ru/nashi-uslugi/laboratornye-issledovaniya_-ispytaniya_-izmereniya/sanitarno-gigienicheskie-issledovaniya/issledovaniya-vody/vliyanie-zheleza-na-kachestvo-vody-i-zdorove.htm (accessed on 09.06.2026).