

УДК 628.34

DOI: 10.22213/2410-9304-2025-2-37-43

Результаты исследований технологического процесса обработки водопроводного осадка*

М. В. Паршикова, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Е. Л. Лагутина, соискатель, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

С. Г. Паршиков, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В статье представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных на экспериментальных площадках базовой кафедры «Инженерные системы ЖКХ» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова и очистных сооружениях канализации МУП г. Ижевска «Ижводоканал». Целью экспериментов являлось исследование влияния водопроводного осадка на свойства композиционных керамических (обжиговых) строительных материалов – прочность на сжатие, огневая усадка, а также на свойства фильтрующего материала, предназначенного для глубокой очистки (доочистки) городских сточных вод. Рассмотрена научная предпосылка возможного применения водопроводного осадка в качестве дополнительной присадки к природной глине при создании композиционных керамических строительных материалов (кирпич, плитка) с возможным использованием в зеленом строительстве, а вследствие сохранения реакционной способности гидроксида алюминия – использование в качестве фильтрующего материала для глубокой очистки (доочистки) сточных вод. Представлены этапы проведения экспериментальных исследований по изготовлению и испытанию образцов из экологически чистого обжигового керамического строительного материала с применением водопроводного осадка станции подготовки воды из источника водоснабжения – река Кама. Представлены основные направления утилизации водопроводного осадка, преимущественно уплотненного, которые используются в «зеленом» строительстве. Исследования проводились в рамках программы развития научных и научно-педагогических кадров ИжГТУ имени М. Т. Калашникова «Научное обоснование технологии утилизации отходов животноводства и осадков сточных вод в едином цикле на биогазовой установке». Представлены результаты оценки эффективности удаления железа, марганца, нефтепродуктов, взвешенных веществ, снижения показателя химического потребления кислорода (ХПК) из сточной воды, профильтрованной через слой загрузки, состоящей из водопроводного осадка.

Ключевые слова: водопроводный осадок, зеленое строительство, коагулянты, очистка, строительные материалы.

Введение

Ежесуточная деятельность человека связана с потреблением питьевой воды. В крупных городах, как правило, водоснабжение осуществляется из поверхностных источников водоснабжения (рек, озер, водохранилищ) с последующей водоподготовкой, включающей реагентную обработку, отстаивание и фильтрование. В качестве реагента, способствующего выделению примесей воды в виде осадка и, соответственно, осветлению и обезжелезиванию воды, используются коагулянты – минеральные соли железа или алюминия.

Процесс коагуляции примесей воды сопровождается образованием хлопьев гидроксида алюминия, на поверхности которых адсорбируются частицы песка, глины, органические вещества, а также техногенные примеси, такие как железо, марганец, входящие в состав при-

родной воды. Хлопьеобразование с последующей адсорбцией примесей воды способствуют эффективному осаждению примесей воды в отстойниках водоочистных станций в виде осадков [1].

На водопроводной станции города Ижевска, подготавливающей воду из водохранилища на реке Каме, ежесуточно образуется до 1,5 тонны осадка влажностью 99,9 %. В соответствии с проектной документацией, обработка осадка заключается в его механическом обезвоживании до влажности 75 % с использованием центрифуг и последующим размещением на полигоне твердых бытовых отходов в виде отхода пятого класса опасности [2].

С учетом отечественного и зарубежного опыта [3–5] возникла научная гипотеза о том, что водопроводные осадки станции подготов-

© Паршикова М. В., Лагутина Е. Л., Паршиков С. Г., 2025

* Исследования проводились в рамках Программы развития научных и научно-педагогических кадров ИжГТУ имени М. Т. Калашникова «Научное обоснование технологии утилизации отходов животноводства и осадков сточных вод в едином цикле на биогазовой установке» (шифр ПМВ-24), приказ ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» от 27.12.2023 г. № 1565.

ки воды города Ижевска, вследствие высокого содержания в своем составе гидроксида алюминия, оксидов кремния, железа могут применяться в зеленом строительстве в качестве одного из компонентов керамических строительных материалов.

На основании материалов предыдущих исследований НИР ВиВ-1/14С от 11.08.2014 г. «Создание современной лаборатории контроля качества воды для исследования состава природных вод», ВиВ-1/15С от 13.07.2015 г. «Модернизация технологии биологической очистки сточных вод очистных сооружений канализации МУП г. Ижевска «Ижводоканал» разработана программа проведения эксперимента по актуальной тематике водоканалов УР [6].

Продолжение научных экспериментов по актуальной тематике водоканалов Удмуртской Республики с 2016 по 2024 год направлено на исследование технологии утилизации осадков сточных вод, а также водопроводного осадка с целью разработки оптимальной технологии утилизации органических отходов 4-го, 5-го класса опасности.

Объектом исследования в ходе проведения эксперимента является определение способов создания экологически чистых керамических строительных материалов и фильтрующего материала (загрузки) для глубокой очистки (доочистки) сточных вод в зеленом строительстве.

Предметом исследования является изучение свойств, которые проявляют новые экологически чистые материалы, изготовленные с применением водопроводного осадка, и как сами материалы влияют на состояние окружающей среды и здоровье человека.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования по возможному применению водопроводного осадка в «зеленом» строительстве

Совместное применение оксихлорида и сульфата алюминия позволяет снизить общий расход коагулянта по Al_2O_3 на 10–15 %. В результате введения в природную воду коагулянта, основанием которого является алюминий, получается гидроокись алюминия $Al(OH)_3$.

Механизму образования и формирования гидроокиси алюминия в водных растворах посвящено множество работ, что свидетельствует о сложности изучения таких систем и сложности этого вопроса для решения многих практических задач [7, 8].

Исследования, проводимые ведущими российскими и зарубежными учеными, показали высокую эффективность использования фильтрующего материала, полученного из водопроводного осадка, для удаления фосфатов из сточных вод, что имеет высокое экологическое значение [9–11].

Этапы проведения исследования:

1) изготовить образцы (по 5 штук для трех вариантов с концентрацией водопроводного осадка влажностью 5, 7 и 10 % по массе сырьевой смеси) экологически чистого обожженного керамического строительного материала с применением водопроводного осадка станции подготовки воды из источника водоснабжения – река Кама;

2) испытать полученные образцы керамики на прочность с целью возможного их применения в зеленом строительстве;

3) испытать полученный из водопроводного осадка фильтрующий материал на способность глубокой очистки сточных вод от фосфатов и загрязняющих веществ органической природы;

4) оценить влияние водопроводных осадков в составе экологически чистых керамических строительных материалов и фильтрующего материала на состояние окружающей среды, здоровье человека.

Практическая значимость экспериментальных исследований заключается в возможности использования результатов опытов в создании технологий утилизации водопроводных осадков, вторичного использования реакционной способности их компонентов в зеленом строительстве.

Испытания керамических образцов

Исследования проводились в рамках программы развития научных и научно-педагогических кадров ИжГТУ имени М. Т. Калашникова «Научное обоснование технологии утилизации отходов животноводства и осадков сточных вод в едином цикле на биогазовой установке».

В результате проведенных испытаний полученных образцов керамических изделий на экспериментальной площадке разработаны практические рекомендации по применению осадков как одного из компонентов экологически чистых строительных материалов в зеленом строительстве. На рис. 1 и 2 представлены результаты испытаний керамических образцов с концентрацией водопроводного осадка влажностью 5, 7 и 10 % по массе сырьевой смеси.

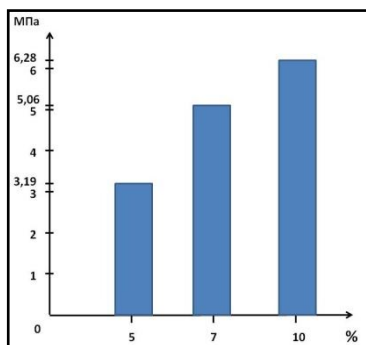


Рис. 1. Результат эксперимента по определению предела прочности на сжатие керамических (обжиговых) образцов (среднее значение для 5 образцов)

Fig. 1. Result of the experiment to determine the compressive strength of ceramic (fired) samples (average value for 5 samples)

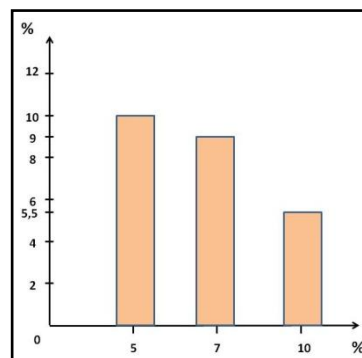


Рис. 2. Результат эксперимента по определению потерь (огневая усадка) при обжиге керамических образцов (среднее значение для 5 образцов)

Fig. 2. Result of the experiment to determine losses (fire shrinkage) during firing of ceramic samples (average value for 5 samples)

Испытания фильтрующей загрузки

Эффективность задержания фосфатов составила 90 %, остальных показателей – 26–50 %, что стало достаточным для достижения предельно-допустимых показателей, установленных для водного объекта, в который осуществ-

ляется сброс очищенных сточных вод г. Ижевска.

Показатели, полученные в результате фильтрации биологически очищенных сточных вод г. Ижевска, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Эффективность задержания загрязняющих веществ сточной воды фильтрующей загрузкой, полученной из водопроводного осадка

Table 1. Efficiency of wastewater pollutant retention by filter media obtained from tap water sludge

Параметр	Показатели, мг/дм ³						
	Фосфаты по Р	ХПК* (химическая потребность в кислороде)	Взвешенные вещества	Al**	Fe**	Mn**	Нефтепродукты
Очищенная сточная вода, прошедшая биологическую очистку (до фильтрации)	5	35	12	0,002	0,02	0,003	0,04
Сточная вода после фильтрации	0,5	26	6	0,018	0,01	0,0015	0.012
Предельно-допустимая концентрация для воды водного объекта	0,7	80	10	0,04	0,1	0,01	0,05
Эффективность глубокой очистки (доочистки), %	90	25,7	50	10	50	50	70

* Химическая потребность в кислороде

** Растворимые формы

В лаборатории биотехнологий проведен анализ по определению химического состава и физико-химических показателей водопроводного осадка, данные исследований представлены в

табл. 2 и 3. Сравнительные показатели водопроводного осадка и глины г. Ижевска представлены в табл. 3.

Таблица 2. Физико-химические показатели водопроводного осадка станции подготовки воды г. Ижевска

Table 2. Physicochemical parameters of water sludge from the water treatment plant in Izhevsk

№ п/п	Показатель	Единица измерения	Значение показателя
1	Влажность	%	99,7–99,9
2	Потери при прокаливании	%	12,8–16,1
3	Состав прокаленного осадка:	%	1,6–7
3.1	SiO ₂	%	30–47
3.2	Al ₂ O ₃	%	5–10
3.3	Fe ₂ O ₃	%	1–3
3.4	CaO	%	0,3–1,3
3.5	MgO	%	2590–1870
4	Начальное удельное сопротивление осадка фильтрации, г·10 ⁻¹⁰	см/г	

Таблица 3. Сравнительные показатели водопроводного осадка и глины г. Ижевска

Table 3. Comparative indicators of water sediment and clay in Izhevsk

Вещество	Показатель, %					
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Потери при прокаливании
Осадок	1–3	50,3–56,0	30–47	5–10	0,3–1,3	12,8–16,1
Глина	0,5–4,8	30,0–70,0	31–40	2,0–6,0	0,2–3,0	3,0–20,0

Результат экологической оценки

Исследование безопасности образцов керамического кирпича и фильтрующего материала проводилось по методике МУ 2.1.674-97 «Санитарно-гигиеническая оценка строительных материалов

с добавлением промтоходов». Интенсивность гамма-излучения водопроводного осадка, глины, песка, готовых образцов керамического кирпича, фильтрующего материала составила 0,08–0,09 мкЗв/ч.

Таблица 4. Концентрации растворимых форм металлов в водных вытяжках керамики через 30 суток экспозиции образцов керамики, мг/дм³

Table 4. Concentrations of soluble forms of metals in aqueous extracts of ceramics after 30 days of exposure of ceramic samples, mg/dm³

Среда	pH исходное	pH вытяжки	Концентрации металлов в вытяжках через 30 сут.						
			Pb	Cu	Fe	Ni	Co	Zn	Cr
Дистиллированная вода	6,5	7,2	0,0006	0,0045	0,0021	0,00007	0,0007	0,0024	0,00004
Буферно-ацетатный раствор	4,8	6,8	0,0005	0,0053	0,0015	0,00012	0,0004	0,0034	0,0008
ПДК для вод поверхностных водных объектов			0,01	1	0,3	0,02	0,1	5	0,05

По мнению российских и зарубежных ученых, а также результатам наших исследований технологического процесса обработки водопроводного осадка, возможно применение водопроводного осадка реализовать при производстве строительных материалов и строительстве дорог, в случае его укладки в дорожное полотно

[12–14]. Одним из методов обработки осадка является применение биореакторов, которые используются в зеленом строительстве. Итоговое решение по определению метода обработки водопроводного осадка и способа его применения должно проводиться с учетом экологической значимости и технико-

экономической эффективности рассматриваемой технологии [15].

Выводы

Изготовленные с использованием водопроводного осадка образцы керамических изделий прошли испытание на прочность при сжатии и по данной характеристике соответствуют марке изделия М50 по ГОСТ 530–2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия», огневую усадку и безопасность.

Тяжелые металлы в составе керамического кирпича в сочетании с глиной образуют устойчивые связи, что гарантирует безопасность полученных кирпичей.

Полученный фильтрующий материал обеспечивает эффективное задержание фосфатов сточных вод без миграции алюминия, железа и других компонентов водопроводного осадка в фильтрованную (через новый фильтрующий материал) воду.

Библиографические ссылки

1. *Абрамова А. А., Исаков В. Г., Непогодин А. М.* Зеленые технологии в очистке поверхностных и сточных вод объектов ЖКХ // Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования : материалы VIII Междунар. конф. : в 2 т. Т. 1. Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2019. С. 460–465.

2. Оценка загрязненности городских сточных вод антибиотическими препаратами цефалоспориновой группы и возможности их определения спектрофотометрическим методом / А. А. Абрамова, А. М. Батueva, А. В. Васильев, М.Ю. Дягелев, Е. Д. Наумкина, И. О. Чурсин // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2021. № 2. С. 53–65. DOI: 10.15593/2409-5125/2021.02.05.

3. *Безбородова О. Е.* Комплексная утилизация сточных вод предприятий. Диссертация. М. : LAP Lambert Academic Publishing, 2019. 124 с.

4. *Благоразумова А. М.* Обработка и обезвоживание осадков городских сточных вод : учеб. пособие. СПб. : Лань, 2021. 208 с.

5. *Волкова А. А., Шишукнов В. Г.* Системный анализ и моделирование процессов в техносфере : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. 244 с.

6. Метод сравнительной оценки тепловых потерь биореакторов на этапе аванпроекта биогазовой установки / В. Н. Диденко, М. В. Свалова, А. В. Исаев, Н. Д. Узаков // Энергосбережение и водоподготовка. 2019. № 5 (121). С. 61–65.

7. *Оковитая К. О.* Повышение эффективности работы метантенков // Эффективные технологии в области водоподготовки и очистки в системах водоснабжения и водоотведения. 2021. С. 54–56.

8. *Провоторова А. А.* Сравнительный анализ использования аэротенков и метантенков при очистке сточных вод // Современная наука и ее ресурсное

обеспечение: Инновационная парадигма : сборник статей по материалам VI Международной научно-практической конференции. 2021. С. 97–102.

9. *Смирнова А. Р.* Пути повышения эффективности работы метантенков // Научный форум: технические и физико-математические науки : сборник статей по материалам XXXI Международной научно-практической конференции. 2020. С. 23–30.

10. *Суворова Е. В., Микрюкова Е. М.* Преодоление проблем с очисткой сточных вод от плотных эмульсий в нефтеперерабатывающей промышленности // Строительство и застройка: Жизненный цикл – 2020 : материалы V Международной (XI Всероссийской) конференции. Чебоксары, 2020. С. 415–422.

11. *Таскаев М. В., Гарибянова Л. А., Свалова М. В.* Анализ конструкции метантенков для обработки осадка с очистных сооружений // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20, № 1. С. 96–105.

12. *Ханова Е. Л., Сахарова А.А., Геращенко А.А.* Способ интенсификации работы метантенков с разделением фаз брожения // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. № 1 (74). С. 72–79.

13. *Юхин Д. П.* К вопросу повышения эффективности функционирования метантенка биогазовой установки // Наука молодых – инновационному развитию АПК : материалы XII национальной научно-практической конференции молодых ученых. 2019. С. 168–172.

14. *NilgünBalkaya, ErcanErkan.* Phosphate removal from wastewater by using water treatment sludge// Desalination and Water Treatment. 2019. No. 17. Pp. 61-69.

15. *Baowei Wang, Zhiwen Wang, Tao Chen, Xueming Zhao.* Development of novel bioreactor control systems based on smart sensors and actuators // Front Bioeng. Biotechnol. Sec. Bioprocess Engineering. 2020. 15p. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00007>.

References

1. *Abramova A.A., Isakov V.G., Nepogodin A.M.* [Green technologies in surface and wastewater treatment of housing and communal services facilities]. [Materials of the VIII International Conference «Technical Universities: integration with European and world education systems»]: in 2 vols. 1. Izhevsk: Publishing House of Kalashnikov ISTU. 2019. Pp.460-465 (in Russ.).

2. *Abramova A.A., Batueva A.M., Vasilev A.V., Dyagelev M.Y., Naumkina E.D., Chursin I.O.* [Assessment of wastewater pollution with antibiotic drugs of the cephalosporin group and the possibility of their determination by spectrophotometric method]. PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urban development. 2021. No. 2. Pp. 53-65 (in Russ.). DOI: 10.15593/2409-5125/2021.02.05.

3. *Bezborodova O. E.* [Complex utilization of wastewater of enterprises. Dissertation]. Moscow: LAP Lambert Academic Publishing, 2019. 124 p. (in Russ.).

4. *Razdorazumova A.M. Obrabotka i obezvozhivanie osadkov gorodskih stochnyh vod : ucheb. posobie* [Treatment and dewatering of urban sewage sludge: textbook]. St.P.Lan. 2021. 208 p. (in Russ.).

5. Volkova A.A., Shishkunov V.G. *Sistemnyj analiz i modelirovanie processov v tekhnosfere : ucheb. posobie* [System analysis and modeling of processes in the technosphere : textbook]. Ekaterinburg: Izd-v. Ural. Unta. 2019. 244 p. (in Russ.).

6. Didenko V.N., Svalova M.V., Isaev A.V., Uzakov N.D. [Method of comparative assessment of heat losses of bioreactors at the stage of an advance project of a biogas plant]. Scientific and Technical journal «Energy saving and water treatment». 2019. No. 5. Pp. 61-65 (in Russ.).

7. Okovitaya K.O. [Improving the efficiency of metantankov]. Effective technologies in the field of water treatment and purification in water supply and sanitation systems. 2021. Pp. 54-56 (in Russ.).

8. Provotorova A.A. *Sravnitel'nyj analiz ispol'zovaniya aerotankov i metantankov pri oчитke stochnyh vod* [Comparative analysis of the use of aerotanks and methane tanks in wastewater treatment]. *Sovremennaya nauka i ee resursnoe obespechenie: Innovacionnaya paradigma : sbornik statej po materialam VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proc. Modern science and its resource support: An innovative paradigm. Collection of articles based on the materials of the VI International Scientific and Practical Conference]. 2021. Pp. 97-102 (in Russ.).

9. Smirnova A.R. *Puti povyshenii effektivnosti raboty metantankov* [Ways to improve the efficiency of metantankov]. *Nauchnyj forum: tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki : sbornik statej po materialam XXXI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proc. Scientific Forum: technical and physical-mathematical sciences. Collection of articles based on the materials of the XXXI International Scientific and Practical Conference]. 2020. Pp. 23-30 (in Russ.).

10. Suvorova E.V., Mikryukova E.M. *Preodolenie problem s oчитkoj stochnyh vod ot plotnyh emul'sij v*

neftepererabatyvayushchej promyshlennosti [Overcoming problems with wastewater treatment from dense emulsions in the oil refining industry]. *Stroitel'stvo i zastrojka: ZHiznennyj cikl – 2020 : materialy V Mezhdunarodnoj (XI Vserossijskoj) konferencii*. [Proc. Construction and development: Life cycle - 2020. Materials of the V International (XI All-Russian) Conference]. 2020. No. 1. Pp. 415-422 (in Russ.).

11. Taskaev M.V., Garifianova L.A., Svalova M.V. [Design analysis of digesters for sludge treatment from sewage treatment plants]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2022. Vol. 20, no. 1. Pp. 96-105 (in Russ.).

12. Khanova E. L., Sakharova A.A., Gerashchenko A.A. [Method of intensification of the work of methane tanks with separation of fermentation phases]. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2019. No. 1. Pp. 72-79 (in Russ.).

13. Yukhin D. P. *K voprosu povysheniya effektivnosti funkcionirovaniya metantenka biogazovoj ustanovki* [On the issue of improving the efficiency of the functioning of the biogas plant's methane tank]. *Nauka molodyh – innovacionnomu razvitiyu APK : materialy XII nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenykh* [Proc. Naukamolodykh - innovative development of the agroindustrial complex. Materials of the XII National Scientific and Practical Conference of young scientists]. 2019. Pp.168-172 (in Russ.).

14. NilgünBalkaya, ErcanErkan. Phosphate removal from wastewater by using water treatment sludge// Desalination and Water Treatment. 2019. No. 17. Pp. 61-69.

15. Baowei Wang, Zhiwen Wang, Tao Chen, Xueming Zhao. Development of novel bioreactor control systems based on smart sensors and actuators. Front Bioeng. Biotechnol. Sec. Bioprocess Engineering. 2020.15p. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00007>.

* * *

Research Results of Water Sludge Treatment Technological Process

M. V. Parshikova, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical Univrsity, Izhevsk, Russia

E. L. Lagutina, PhD Candidate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

S. G. Parshikov, Master's Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

The article presents the results of experimental research conducted at the experimental sites of the Kalashnikov Izhevsk State Technical University basic department «Engineering systems of housing and communal services» and sewage treatment facilities of Municipal Unitary Enterprise «Izhvodokanal». The aim of the experiments was to study the influence of water supply sludge on the composite ceramic (fired) building material properties: compressive strength, fire shrinkage, as well as on the properties of filtering material intended for deep treatment (additional treatment) of municipal wastewater. The scientific premise of the possible water-pipe sludge application as an additional additive to natural clay in the production of composite ceramic building materials (bricks, tiles) with possible use in «green» construction, and due to the preserved aluminum hydroxide-reactivity - the use as a filtering material for deep treatment (after-treatment) of wastewater is considered. The stages of experimental research on manufacturing and testing of samples of ecologically clean firing ceramic building material with the use of water sludge from the water treatment plant from the water supply source - the River Kama - are presented. The main directions of water supply sludge utilization, mainly compacted sludge, to be applied in «green» construction are presented. The research was carried out within the framework of the program of development of scientific and pedagogical personnel of Kalashnikov Izhevsk State Technical University

«Scientific substantiation of the animal waste and sewage sludge utilization technology in a single cycle at a biogas plant». The results of efficiency evaluation of iron, manganese, petroleum products, suspended solid removal, reduction of chemical oxygen demand (COD) from wastewater filtered through the loading layer consisting of tap sludge are presented.

Keywords: water sludge, green building, coagulants, treatment, construction materials.

Получено: 05.02.25

Образец цитирования

Паршикова М. В., Лагутина Е. Л., Паршиков С. Г. Результаты исследований технологического процесса обработки водопроводного осадка // Интеллектуальные системы в производстве. 2025. Т. 23, № 2. С. 37–43. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-2-37-43.

For Citation

Parshikova M.V., Lagutina E.L., Parshikov S.G. [Research Results of Water Sludge Treatment Technological Process]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 37-43 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2025-2-37-43.