

**ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ
И ДИАГНОСТИКИ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
ПОГРУЗОЧНО-ДОСТАВОЧНЫХ МАШИН**

О.М. БУХТЕЕВ, асп.

Национальный исследовательский технологический университет МИСИС,
119049, Москва, Ленинский пр., 4, стр. 1, e-mail: olemakk@mail.ru

© Бухтеев О.М., 2025

Рассмотрены наиболее актуальные методики применения цифровых технологий для повышения эффективности эксплуатации дизельных двигателей погрузочно-доставочных машин. Проанализированы основные направления использования цифровых двойников, математического моделирования и систем мониторинга в реальном времени. Особое внимание уделено методам диагностики технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса силовых установок. Рассмотрены перспективы развития интеллектуальных систем технического обслуживания на основе технологий промышленного интернета вещей.

Ключевые слова: цифровые модели, дизельные двигатели, погрузочно-доставочные машины, диагностика, техническое обслуживание, цифровые двойники, математическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Горнодобывающая промышленность сегодня сталкивается с серьезными вызовами. Месторождения становятся все глубже, условия разработки усложняются, а требования к надежности оборудования возрастают. В этой ситуации погрузочно-доставочные машины (ПДМ) являются своего рода «рабочими лошадками» подземного транспорта, но их дизельные двигатели работают в крайне неблагоприятных условиях [1].

Традиционный подход к обслуживанию по регламенту часто приводит к парадоксальным ситуациям: либо производят замену еще работоспособных деталей, либо ждут полного отказа оборудования. Такая практика особенно болезненна для горных предприятий, где каждый часостояния ПДМ оборачивается значительными потерями [2]. Именно поэтому цифровые технологии в диагностике и эксплуатации дизельных двигателей привлекают все больше внимания. Возможность «заглянуть внутрь» работающего двигателя, не разбирая его, и спрогнозировать его поведение открывает принципиально новые перспективы [3].

ЦИФРОВАЯ ДИАГНОСТИКА: ОТ ПРОСТОГО К СЛОЖНОМУ

Развитие диагностических систем для дизельных двигателей прошло долгий путь. Если в 70-80-х годах прошлого века говорили о «документах на машинном носителе», то современные системы бортовой диагностики способны контролировать десятки параметров одновременно [4]. Однако не все параметры одинаково информативны для оценки состояния двигателя.

Специфика работы ПДМ накладывает свои ограничения на выбор диагностических методов. В отличие от автомобильных двигателей, которые работают в относительно предсказуемых условиях, силовые установки горных машин подвергаются воздействию экстремальных факторов [5]. Высокая запыленность, ограниченное охлаждение, резкие перепады нагрузки – все это создает уникальные условия их эксплуатации.

Компьютерная диагностика современных дизелей базируется на анализе сигналов, поступающих от множества датчиков [6]. Однако простое считывание кодов ошибок, как показывает практика, не всегда дает полную картину. Намного эффективнее оказывается анализ трендов – отслеживание того, как меняются ключевые параметры во времени [7].

Портативные анализаторы для диагностики крупных дизельных двигателей находят все более широкое применение в различных отраслях [8]. Для ПДМ это особенно актуально, поскольку возможности демонтажа и детальной диагностики в подземных условиях весьма ограничены. Такая машина представляет собой целый инженерный комплекс, сочетающий в себе функции погрузки и транспортировки больших объемов грузов в небольших замкнутых пространствах, без чего невозможно полноценное функционирование современного горного производства. Конструкцию ПДМ можно разделить на четыре основных элемента (рис. 1).

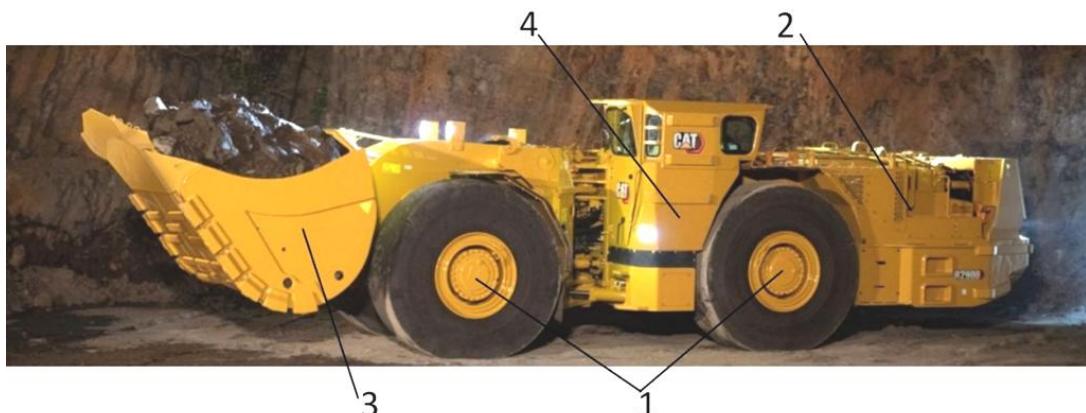


Рис. 1. Внешний вид ПДМ CAT R2900: 1 – ходовая часть; 2 – силовая установка; 3 – погрузочно-транспортный модуль; 4 – кабина оператора

Бортовые системы современных ПДМ способны фиксировать различные параметры в процессе работы, что и позволяет формировать комплексную цифровую картину процесса функционирования основных систем.

КОНЦЕПЦИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ: РЕАЛЬНОСТЬ ИЛИ ПЕРСПЕКТИВА?

Цифровой двойник – это виртуальная копия реального объекта, которая «живет» в компьютере и обновляется в режиме реального времени [9]. Для дизельных двигателей ПДМ такая технология имеет большие перспективы.

Опыт создания цифровых двойников морских газотурбинных двигателей в СПбПУ показывает серьезный потенциал этого направления [10]. Конечно, адаптация подобных решений для горных машин потребует учета специфики их эксплуатации, но основные принципы остаются теми же.

Главное преимущество цифровых двойников заключается в возможности проведения виртуальных экспериментов [11]. Можно «ломать» виртуальный двигатель

сколько угодно раз, изучая различные сценарии отказов и не рискуя при этом реальным оборудованием. Для ПДМ, где любая поломка чревата серьезными простоями, это особенно ценно.

Интересно, что цифровые двойники позволяют не только моделировать текущее состояние, но и прогнозировать поведение двигателя в различных условиях [12]. Такой подход открывает возможности для оптимизации режимов работы и предупреждения аварийных ситуаций.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Цифровые технологии базируются на комплексной математической основе [13]. Наиболее актуальные подходы к моделированию дизельных двигателей учитывают сложную физику процессов горения, теплообмена и механического взаимодействия деталей [14]. Так, эффективная мощность двигателя N_e зависит от многих параметров и определяется из выражения:

$$N_e = \frac{P_e \cdot V_{раб} \cdot n_B \cdot z_u \cdot z}{120}, \quad (1)$$

где P_e – среднее эффективное давление; $V_{раб}$ – рабочий объем камеры; n_B – число оборотов; z – число пар камер в двигателе; z_u – число совершаемых за один оборот вала рабочих циклов, рассчитываемое по формуле

$$z_u = \frac{2 \cdot i_B \cdot z_0}{t}, \quad (2)$$

где i_B – передаточное отношение привода; z_0 – число циклов изменения рабочего объема за один оборот ротора; t – число тактов цикла.

Особенность работы дизельных двигателей в составе транспортных средств заключается в необходимости учета динамических нагрузок [15]. Для ПДМ эта задача осложняется спецификой подземных условий – ограниченным пространством, повышенной влажностью, запыленностью.

Разработка математических моделей для двигателей внутреннего сгорания показывает, что наиболее эффективны комбинированные модели [16]. Они сочетают детерминированные физические законы со статистическими методами, что позволяет учесть как закономерности, так и случайные факторы.

Стоит отметить важность учета токсических характеристик дизельных двигателей [17], особенно в условиях подземных работ. Модели должны оценивать не только технические параметры двигателей [18], но и их влияние на окружающую среду и условия труда.

СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА: ГЛАЗА И УШИ СОВРЕМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Современные системы мониторинга дизельных двигателей работают по принципу непрерывного сбора данных [19]. Для ПДМ такие системы должны быть особенно надежными, учитывая тяжелые условия эксплуатации, такие как вибрация и запыленность.

Телематические системы мониторинга, успешно применяемые для дизельных электростанций, демонстрируют высокую эффективность удаленного контроля [20]. Адаптация подобных решений для ПДМ требует учета специфики подземных условий, но основные принципы остаются применимыми.

Большое значение здесь имеет правильный выбор диагностических параметров. Не все показатели одинаково информативны для оценки состояния двигателя [21]. Для

дизельных двигателей ПДМ особое значение приобретают параметры, связанные с работой в запыленной среде и условиях ограниченного охлаждения.

Применение вероятностных методов распознавания неисправностей помогает повысить достоверность диагностики [22]. Это критически важно для ПДМ, где ложные сигналы о неисправностях могут привести к необоснованным простоям дорогостоящего оборудования [23].

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА И ПЛАНИРОВАНИЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ

Одна из главных задач цифровых систем – научиться предсказывать, когда потребуется ремонт. Традиционные подходы, основанные только на учете мото-часов, показали свою недостаточность [24]. Фактический ресурс двигателя зависит от большого количества факторов, которые не учитывает простой подсчет наработанного времени.

Примером может служить комплексный анализ множества параметров и их изменения во времени [25]. Такой метод позволяет учесть индивидуальные особенности каждого двигателя и конкретные условия эксплуатации.

В качестве примера можно рассмотреть график результата расчета остатка мото-часов двигателя Caterpillar C9.3B (рис. 2) с использованием параметра «дымность» – натурального показателя ослабления светового потока, приведенного к шкале дымометра с базой 0,43 м согласно ГОСТ Р 51250-99 [26] и измеряемого в m^{-1} .

$$R = \frac{TS - TS_{np}}{\frac{d(TS)}{dt}} \cdot k_{\text{эксп}} , \quad (3)$$

где R – остаточный ресурс, мото-часы; TS – текущий интегральный показатель технического состояния; TS_{np} – предельное значение показателя технического состояния; $d(TS)/dt$ – скорость изменения интегрального показателя; $k_{\text{эксп}}$ – корректирующий коэффициент условий эксплуатации, показывающий поглощение света при его прохождении через отработанные газы.

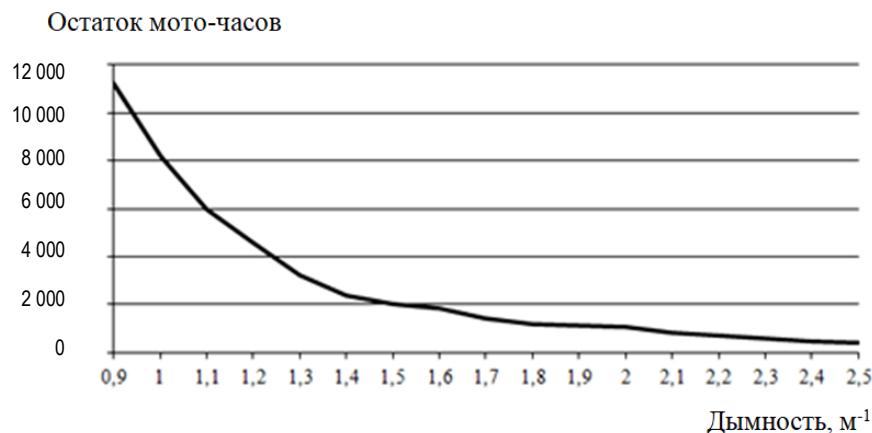


Рис. 2. Зависимость остаточного ресурса двигателя Caterpillar C9.3B от показателя дымности

Байесовские методы обновления параметров прогнозных моделей обеспечивают адаптацию системы к накапливаемому опыту [27]. Это особенно важно для ПДМ, поскольку каждое месторождение имеет свои уникальные условия эксплуатации.

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ: СЕТЕВОЙ ЭФФЕКТ

Интеграция дизельных двигателей ПДМ в экосистему промышленного интернета вещей открывает новые горизонты [28]. Когда все машины «общаются» между собой и с центральной системой управления, появляется возможность оптимизировать работу парка техники в целом.

Технологические машины все чаще оснащаются интеллектуальными системами самодиагностики [29]. Это создает предпосылки для реализации концепции «умных» горных предприятий [30], где оборудование само сообщает о своих потребностях в обслуживании: дизельный двигатель ПДМ самостоятельно анализирует состояние систем и заблаговременно «просит» заменить фильтр или провести регулировку топливной аппаратуры [31].

Особенно интересны возможности коллективного «обучения» парка машин. Если одна ПДМ сталкивается с проблемой в определенных условиях, эта информация может предупредить аналогичные ситуации на других машинах [32]. Беспроводные сенсорные сети, адаптированные для подземных условий, решают проблему передачи данных в сложной инфраструктуре подземных выработок [33].

ОСОБЕННОСТИ ГОРНЫХ УСЛОВИЙ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Горнодобывающая промышленность предъявляет особые требования к надежности оборудования [34]. Дизельные двигатели ПДМ в основном работают в тяжёлых условиях, сильно отличающихся от стандартных условий эксплуатации автотранспорта. Подземные выработки – это агрессивная среда с высокой влажностью, запыленностью и ограниченной вентиляцией.

Техническая эксплуатация горных машин имеет свою специфику [35]. Ограниченный доступ к оборудованию, сложность эвакуации неисправных машин и высокая стоимость простоев делают стратегию предиктивного обслуживания не просто желательной, а фактически необходимой.

Внедрение цифровых технологий требует значительных первоначальных инвестиций, но экономический эффект в долгосрочной перспективе может быть весьма существенным [36].

Нельзя забывать и о человеческом факторе. Снижение количества внезапных отказов ПДМ означает не только экономию средств, но и повышение безопасности труда горняков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение цифровых моделей для совершенствования эксплуатации дизельных двигателей ПДМ представляет собой закономерный этап развития горнодобывающей промышленности. Сочетание цифровых двойников, систем реального времени мониторинга и математического моделирования позволяет перейти от реактивного к проактивному подходу в обслуживании оборудования.

Наибольшую ценность эти технологии приобретают в условиях усложнения горно-геологических условий и повышения требований к экологической безопасности. Цифровизация процессов эксплуатации дизельных двигателей ПДМ – это практическая необходимость для создания эффективных и безопасных горнодобывающих предприятий.

Однако полная реализация потенциала цифровых технологий потребует решения ряда технических и организационных задач. Но направление развития определено, и первые успешные примеры уже демонстрируют перспективность выбранного пути.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хорешок А.А., Кудреватых А.В., Кузнецов В.В. Характеристика методов технического обслуживания горно-транспортного оборудования // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. № S5. С. 48–61.
2. Диагностика дизельных двигателей. Приборы для диагностики дизеля // ЭДИАЛ. 2024. URL: <https://www.edial.ru/articles/edial-sposobi-diag-diz-dvig/> (дата обращения: 20.05.2025).
3. Цифровые двойники и численное моделирование: разбираем технологии // Добывающая промышленность. 2021. 22 ноября. URL: <https://dprononline.unsolution/tsifrovye-dvojnikи-i-chislennoe-modelirovanie-razbiraem-tehnologii/> (дата обращения: 20.05.2025).
4. Диагностика и ремонт дизельных двигателей: как обеспечить долгосрочную работу вашей техники // Влпасифик. 2025. 19 марта. URL: <https://vlpacific.ru/article/diagnost/> (дата обращения: 20.05.2025).
5. Компьютерная диагностика дизельных двигателей // Дизель-Мотор. 2020. URL: <https://www.dieselmotors-spb.ru/diagnostika-dizelnyh-dvigatelej.html> (дата обращения: 20.05.2025).
6. Диагностика дизельных двигателей – исследование ЗР // За рулем. 2017. 28 сентября. URL: <https://www.zr.ru/content/articles/908489-doktor-dizel/> (дата обращения: 20.05.2025).
7. Портативные анализаторы дизельных двигателей // SmartTools. 2021. 11 февраля. URL: <https://smarttools.pro/catalog/diagnostika-dizelnyh-dvigatelej/> (дата обращения: 20.05.2025).
8. Digital Twin – цифровая копия физической системы // Хабр. 2025. 4 марта. URL: <https://habr.com/ru/articles/887936/> (дата обращения: 20.05.2025).
9. Цифровой двойник морского газотурбинного двигателя // Центр НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии». 2023. URL: https://nticenter.spbstu.ru/nti_projects/71 (дата обращения: 20.05.2025).
10. Цифровой двойник морского газотурбинного двигателя: итоги трех этапов (2021–2023 гг.) // FEA.RU | CompMechLab. 2024. URL: <https://fea.ru/project/236> (дата обращения: 20.05.2025).
11. What Is a Digital Twin? // IBM. 2025. 20 мая. URL: <https://www.ibm.com/think/topics/what-is-a-digital-twin> (дата обращения: 20.05.2025).
12. Цифровые и интеллектуальные технологии // ОДК. 2024. URL: <https://www.uecrus.com/innovations/tsifrovye-i-intellektualnye-tehnologii/> (дата обращения: 20.05.2025).
13. Симуков И.В. Математическое моделирование основных технических параметров двухблочного роторного двигателя внутреннего сгорания новой конструкции: дис. ... канд. техн. наук. Брянск, 2009. 193 с.
14. Балагин О.В., Чулков А.В., Балагин Д.В., Якушин Р.Ю. Математическое моделирование процесса технической эксплуатации автономных локомотивов // *Молодой ученый*. 2017. № 4 (138). С. 3–7.
15. Аверченков В.И., Федоров В.П., Хейфец М.Л. Основы математического моделирования технических систем. Брянск: Изд-во БГТУ, 2004. 271 с.
16. Евтухов А.В. Моделирование токсических характеристик автотранспортных средств с дизельными двигателями // *iPolytech Journal*. 2006. Т. 4. № 4 (28). С. 84–87.
17. Старокожев М.А. *Теоретические основы разработки двухблочного роторно-поршневого двигателя методом математического моделирования*: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2013. 171 с.

18. Диагностика дизельных двигателей // ТМ-Сервис. 2024. URL: <https://tm-service.ru/diagnosticheskie-raboty/diagnostika-dizelnykh-dvigateley/> (дата обращения: 20.05.2025).
19. Контроль и мониторинг дизельных электростанций ДЭС и ДГУ // MONTRANS. 2024. URL: <https://montrans.ru/resheniya/monitoring-des> (дата обращения: 20.05.2025).
20. Диагностика топливной системы дизельного двигателя // Форсунка-Питер. 2024. URL: <https://forsunka-piter.ru/stati/diagnostika-toplivnoj-sistemy-dizelnogo-dvigatelya.html> (дата обращения: 20.05.2025).
21. Кулагин А.В. Диагностирование состояния судовых дизельных двигателей вероятностным методом распознавания неисправностей // *Научные проблемы водного транспорта*. 2021. № 69. С. 109–122.
22. Jiang J., Li H., Mao Z., Liu F., Zhang J., Jiang Z., Li H. A digital twin auxiliary approach based on adaptive sparse attention network for diesel engine fault diagnosis // *Scientific Reports*. 2022. V. 12. № 1. P. 675–693.
23. Александров А.В., Алексахин С.В., Долгов И.А. [и др.]. Техническая эксплуатация, диагностирование и ремонт двигателей внутреннего сгорания: учебник. М.: ИНФРА-М, 2023. 544 с.
24. Bondarenko A., Fukuda T. Development of a diesel engine's digital twin for predicting propulsion system dynamics // *Energy*. 2020. V. 196. P. 117–126.
25. ГОСТ Р 51250-99. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Дымность отработавших газов. Нормы и методы определения. М.: Издательство стандартов, 1999. 19 с.
26. Калачин С.В., Кухмазов К.З., Мурог И.А., Определение эффективного алгоритма машинного обучения для прогнозирования режимов работы дизельного двигателя // *Нива Поволжья*. 2023. № 2. С. 66–73.
27. Техническое обслуживание дизельного двигателя – что нужно знать? // Дизель-Мотор. 2020. URL: <https://www.dieselmotors-spb.ru/informatsiya/tehnicheskoe-obsluzhivanie-dizelnogo-dvigatelya-chto-nuzhno-znat.html> (дата обращения: 20.05.2025).
28. Гоголев Г.В. Эксплуатация современных судовых дизельных установок: учебное пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2024. 460 с.
29. Точная настройка предприятия: цифровые двойники // Controleng.ru. 2021. 26 января. URL: <https://controleng.ru/innovatsii/cifrovye-dvojnik/tochnaya-nastrojka/> (дата обращения: 20.05.2025).
30. Yang X., Bi F., Cheng J., Tang D., Shen P., Bi X. A Multiple Attention Convolutional Neural Networks for Diesel Engine Fault Diagnosis // *Sensors*. 2024. V. 24. № 9. P. 2708.
31. Singh R.R., Bhatti G., Kalel D., Vairavasundaram I., Alsaif F. Building a Digital Twin Powered Intelligent Predictive Maintenance System for Industrial AC Machines // *Machines*. 2023. V. 11. Is. 8. P. 796.
32. Fu Y., Zhu G., Zhu M., Xuan F. Digital Twin for Integration of Design-Manufacturing-Maintenance: An Overview // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2022. V. 35. № 1. P. 80.
33. Горные машины и комплексы для добычи руд // Геологический портал GeoKniga. 2018. URL: <http://www.geokniga.org/books/14895> (дата обращения: 20.05.2025).
34. Герике Б.Л., Абрамов И.Л., Герике П.Б., Стратегия технического обслуживания горных машин по фактическому состоянию на основе методов вибродиагностики и неразрушающего контроля // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2008. № 3. С. 11–14.

35. Хорош А.И., Хорош И.А. Дизельные двигатели транспортных и технологических машин: учебное пособие. М.: Лань, 2020. 176 с.

Для цитирования: Бухтеев О.М. Применение цифровых моделей для совершенствования процесса эксплуатации и диагностики дизельных двигателей погрузочно-доставочных машин // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 38–45.

THE APPLICATION OF DIGITAL MODELS TO IMPROVE THE OPERATION AND DIAGNOSTICS PROCESS OF DIESEL ENGINES IN LOAD-HAUL-DUMP MACHINES

О.М. BUKHTEEV, Postgraduate

National Research Technological University "MISIS",
Building 1, 4, Leninsky pr., Moscow, 119049, e-mail: olemakk@mail.ru

The most relevant techniques for applying digital technologies to improve the efficiency of diesel engines in load-haul-dump (LHD) machines are examined. The main areas of utilizing digital twins, mathematical modeling, and real-time monitoring systems are analyzed. Special attention is given to methods for diagnosing technical conditions and predicting the remaining service life of power units. The prospects for developing intelligent maintenance systems based on Industrial Internet of Things (IIoT) technologies are explored.

Keywords: digital models, diesel engines, load-haul-dump machines, diagnostics, maintenance, digital twins, mathematical modeling.

Поступила в редакцию/received: 24.06.2025; после рецензирования/revised: 30.06.2025;
принята/accepted: 03.07.2025

УДК 622.2

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-45-63

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ САПОНИТСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

А.С. ДАНИЛОВ¹, канд. техн. наук, Э.А. КРЕМЧЕЕВ², д-р техн. наук,
Н.М. МАГДЕЕВА¹, студ.

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
199106, Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., д. 2, e-mail: Danilov_AS@pers.spmi.ru

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
190121, Санкт-Петербург, ул. Союза Печатников, д. 16, e-mail: kremcheev@mail.ru

© Данилов А.С., Кремчев Э.А., Магдеева Н.М., 2025

Статья посвящена описанию современных технологий переработки сапонитсодержащих отходов, широко применяемых для очистки сточных вод в строительстве и сельском хозяйстве. Рассмотрены состав и основные свойства указанных отходов. Проанализированы различные способы сгущения сапонитсодержащих