

УДК 622.692
DOI:10.31660/0445-0108-2025-3-148-157
EDN: VAPZMM

Интеллектуальный мониторинг утечек нефтепродуктов при повреждениях сборно-разборных трубопроводов

Л. В. Сеоев, М. Ю. Земенкова*, С. Ю. Подорожников, Е. Л. Чижевская

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

**mizemenkova@mail.ru*

Аннотация. Современный трубопроводный транспорт углеводородов характеризуется широким спектром различных технологий и оборудования. Система магистральных нефтепродуктопроводов (МНПП) включает сборно-разборные трубопроводы (СРТ).

СРТ представляют собой мобильные инженерно-технические комплексы, предназначенные для временной транспортировки нефти, светлых нефтепродуктов и жидкого углеводородного сырья, используются при заполнении и опорожнении МНПП при проведении плановых ремонтных работ, а также при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на объектах нефтегазовой отрасли.

В процессе эксплуатации СРТ особое внимание уделяют обеспечению надежности и безопасности использования, реализуя поручение Президента Российской Федерации и распоряжение Правительства Российской Федерации о повышении эффективности системы транспортировки нефти и нефтепродуктов на основе внедрения передовых технологий. Тем не менее анализ опыта развертывания СРТ показывает, что общее количество потерь за период использования СРТ протяженностью 150 км может составить до 5,5 % (≈ 300 тыс. т) от общего количества поданных нефтепродуктов, а задачи предиктивного мониторинга и своевременного обнаружения аварий и повреждений трубопровода остаются нерешенными.

Согласно классификации потерь нефтепродуктов на СРТ одним из проблемных вопросов являются потери, связанные с нарушением герметичности линии трубопровода вследствие аварий и неисправностей. В целях сокращения потерь нефтепродуктов в результате утечек на объектах МНПП применяются различные системы и методы, основанные на вариативных принципах действия и физических явлениях.

Однако для мобильных сборно-разборных нефтепродуктотранспортных систем такие решения отсутствуют, а разработка прогрессивных способов и средств мониторинга состояния СРТ в процессе эксплуатации, реализованных в автоматизированных системах и программном обеспечении на основе искусственного интеллекта, актуальна.

В статье представлен параметрический метод обнаружения утечек нефтепродуктов на мобильных сборно-разборных трубопроводах, предложен прототип и архитектура системы мониторинга утечек нефтепродуктов, включающей программный уровень на основе искусственного интеллекта.

Ключевые слова: сборно-разборный трубопровод, нефтепродукты, утечка, мониторинг, эксплуатация систем трубопроводного транспорта

Для цитирования: Интеллектуальный мониторинг утечек нефтепродуктов при повреждениях сборно-разборных трубопроводов / Л. В. Сеоев, М. Ю. Земенкова, С. Ю. Подорожников, Е. Л. Чижевская. – DOI 10.31660/0445-0108-2025-3-148-157 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2025. – № 3. – С. 148–157. – EDN: VAPZMM

Intelligent monitoring of oil product leaks in case of damage of collapsible pipelines

**Lazar V. Seoev, Maria Yu. Zemenkova, Sergey Yu. Podorozhnikov,
Elena L. Chizhevskaya**

Abstract. Modern pipeline systems for hydrocarbon transportation utilize a diverse array of technologies and equipment. The main oil product pipelines (MOPP) include modular (disassemblable) pipeline systems (MPS). MPS are mobile engineering complexes designed for the temporary transportation of crude oil, light petroleum products, and liquid hydrocarbons. These systems are utilized during the filling and emptying of MOPPs, as well as for scheduled maintenance and emergency response situations within the oil and gas sector.

During the operation of MPS, significant attention is focused on reliability and safety, in accordance with the directives from the President and Government of the Russian Federation aimed at improving the efficiency of oil and petroleum transport through advanced technologies. However, analyzing the experience of deploying the SRT indicate that, over distances of up to 150 km, losses can amount to 5, 5% (approximately 300,000 tons) of the total volume of transported oil products. Additionally, issues related to predictive monitoring and the timely detection of pipeline accident and damages remain largely unresolved.

One of the primary causes of product loss, as classified in MPS incidents, is the loss of pipeline integrity due to mechanical failures or operational accidents. To mitigate these losses, various monitoring systems and techniques are employed across MOPP facilities, relying on different operational principles and physical phenomena.

However, effective solutions for mobile modular pipeline systems are not available. Therefore, the development of advanced automated monitoring systems based on artificial intelligence is an urgent challenge. This paper presents a parameter-based method for detecting oil product leaks in modular pipeline systems and proposes a prototype and architecture of the oil product leakage monitoring system that incorporates a software layer powered by artificial intelligence.

Keywords: collapsible pipeline, oil product, leaks, monitoring, operation of pipeline transport systems

For citation: Seoev, L. V., Zemenkova, M. Yu., Podorozhnikov, S. Yu., & Chizhevskaya, E. L. (2025). Intelligent monitoring of oil product leaks in case of damage of collapsible pipelines. *Oil and Gas Studies*, (3), pp. 148-157. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2025-3-148-157

Введение

Современный трубопроводный транспорт углеводородов характеризуется широким спектром различных технологий и оборудования. Система магистральных нефтепродуктопроводов (МНПП) включает сборно-разборные трубопроводы (СРТ).

В процессе эксплуатации СРТ особое внимание уделяют обеспечению надежности и безопасности использования, реализуя поручение Президента Российской Федерации¹ и распоряжение Правительства Российской Федерации² о повышении эффективности системы транспортировки нефти и нефтепродуктов на основе внедрения передовых технологий. Тем не менее, анализ опыта развертывания СРТ показывает, что общее количество потерь за период использования СРТ (рис. 1) протяженностью 150 км может составить до 5,5 % (≈ 300 тыс. т) от общего количества поданных нефтепродуктов [1], а задачи предиктивного мониторинга и своевременного обнаружения аварий и повреждений трубопроводом остаются открытыми [2].

¹ Перечень поручений по итогам совещания с членами Правительства (утв. Президентом РФ 12.02.2025 № Пр-285)

² Распоряжение Правительства РФ №1523-р от 9 июня 2020г. об утверждении Энергетической стратегии РФ до 2035г.

Согласно классификации потерь нефтепродуктов на СРТ [3] одним из проблемных вопросов являются потери (рис. 2), связанные с нарушением герметичности линии трубопровода вследствие аварий и неисправностей (рис. 3). В целях сокращения потерь нефтепродуктов в результате утечек на объектах МНПП применяются различные системы и методы, основанные на вариативных принципах действия и физических явлениях.

Однако для мобильных сборно-разборных нефтепродуктотранспортных систем такие решения отсутствуют, а разработка прогрессивных способов и средств мониторинга состояния СРТ в процессе эксплуатации, реализованных в автоматизированных системах и программном обеспечении на основе искусственного интеллекта, актуальна.



Рис. 1. Повреждения СРТ в период эксплуатации

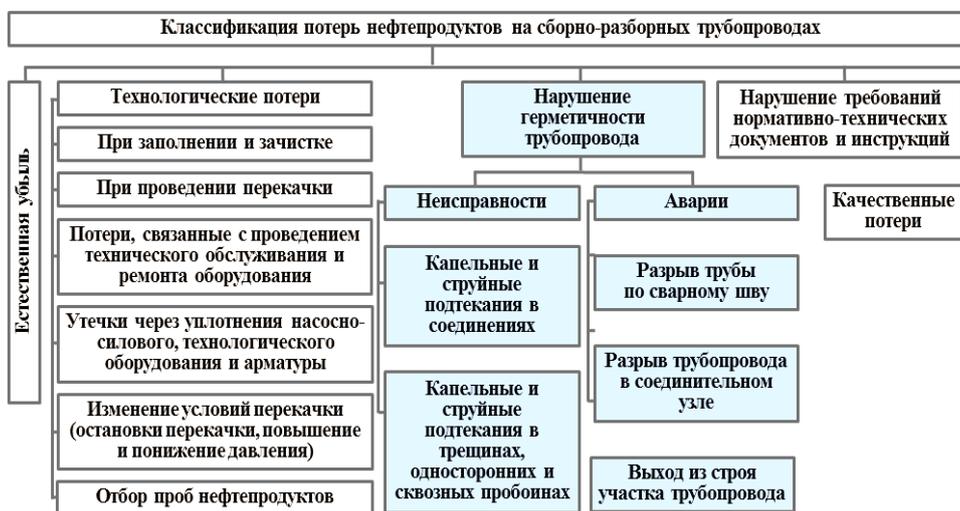


Рис. 2. Классификация потерь нефтепродуктов на СРТ



Рис. 3. Примеры повреждений СРТ

Объект, методы исследования и результаты

Объект исследования — СРТ с раструбным соединением. СРТ представляют собой мобильные инженерно-технические комплексы (таблица), предназначенные для временной транспортировки нефти, светлых нефтепродуктов и жидкого углеводородного сырья, и используются при заполнении и опорожнении МНПП при проведении плановых ремонтных работ, а также при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на объектах нефтегазовой отрасли.

Техническая характеристика СРТ

| Показатель | Марки трубопроводов | | |
|-----------------------------|---------------------|--------------------|----------|
| | ПМТ-150 | ПМТП-100 | ПМТП-150 |
| Длина комплекта, км | 150 | | |
| Условный диаметр труб, мм | 150 | 100 | 150 |
| Производительность, т/сут. | 2000 | 1200 | 3000 |
| Рабочее давление, МПа | 2,5 | 6,0 | |
| Испытательное давление, МПа | 3,8 | 7,5 | |
| Тип соединения труб | Муфтовое | Раструбное | |
| Длина трубы, м | 6,0 | | |
| Масса трубы, кг | 78,0 | 36,2 | 80,9 |
| Материал трубы | Ст. 10 | Ст. 16ГС, Ст.09Г2С | |
| Способ монтажа трубопровода | Ручной | | |

В качестве инструментария для мониторинга и обнаружения утечек нефтепродуктов на СРТ предлагается использовать параметрический метод [6], основанный на анализе гидродинамических параметров трубопровода при его повреждении (рис. 4).

При возникновении аварийной ситуации в линии СРТ в каком-либо месте x между насосными станциями величины гидравлических уклонов i_i , давлений p_i и расходов Q_i , изменятся. Координата нарушения герметичности трубопровода вычисляется с использованием зависимостей [4]:

$$x = L \frac{|i_{\text{экв}}| - |i_2|}{|i_1| + |i_2|}, \quad (1)$$

где L — протяженность трубопровода между насосными станциями, м; $i_{\text{экв}}$ — эквивалентный гидравлический уклон, соответствующий участку L ; i_1 — гидравлический уклон, соответствующий участку x ; i_2 — гидравлический уклон, соответствующий участку $L-x$, или после преобразования с использованием зависимости гидравлического уклона от расхода на основе обобщенной формулы Л. С. Лейбензона [5]:

$$x = L \frac{Q_{\text{экв}}^{2-m} - Q_2^{2-m}}{Q_1^{2-m} + Q_2^{2-m}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{экв}}$ — эквивалентный расход, соответствующий участку L , м³/ч; Q_1 — расход, соответствующий участку x , м³/ч; Q_2 — расход, соответствующий участку $L-x$, м³/ч; m — коэффициент, зависящий от режима течения и области гидравлического трения.

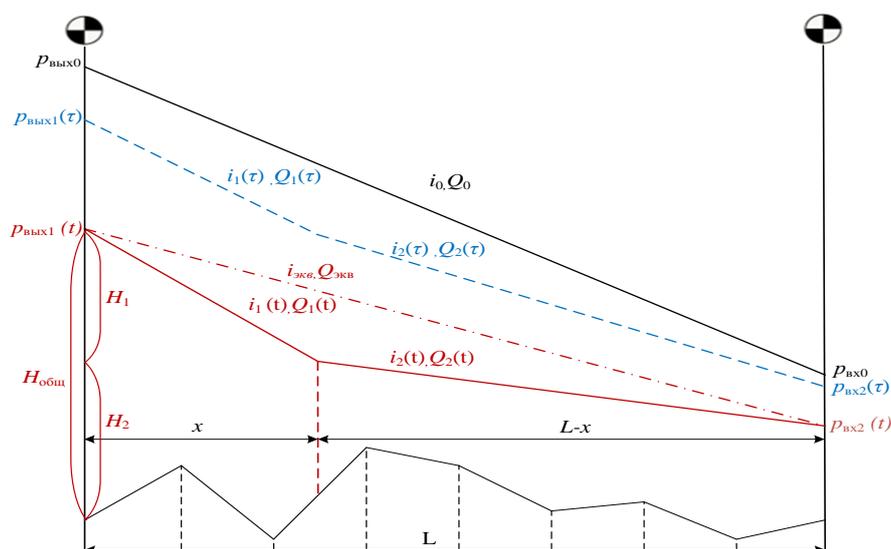


Рис. 4. Графическая интерпретация изменения гидродинамических параметров СРТ при его повреждении

Рассмотренный выше метод реализован в специальном программном обеспечении³, алгоритм⁴ которого представлен на рисунке 5.

³ RU, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Обнаружение местоположения и интенсивности истечения топлив при авариях и повреждениях полевого магистрального трубопровода» №2023666287, 2023.

⁴ RU, патент на изобретение «Автоматизированный комплекс мониторинга процесса транспортирования нефтепродуктов по наземному сборно-разборному трубопроводу с соединением «Раструб», №2812007 С1, МПК G05B 19/418 (2006.01), 2024.

Чувствительность данного метода, несмотря на реализацию в автоматизированном обеспечении, исключающем влияние человеческого фактора, ограничена погрешностью измерений применяемого приборного оборудования (манометров, датчиков давления, счетчиков-расходомеров). Использование средств измерений с повышенным классом точности позволяет решить проблемы обнаружения утечек малой интенсивности.

Тем не менее, несмотря на объективные преимущества, рассмотренное техническое решение не позволяет предотвратить аварийные разливы нефтепродуктов на стадии предпосылок.

Однако использование искусственного интеллекта и самообучаемых нейронных сетей значительно повышает эффективность систем обнаружения утечек.

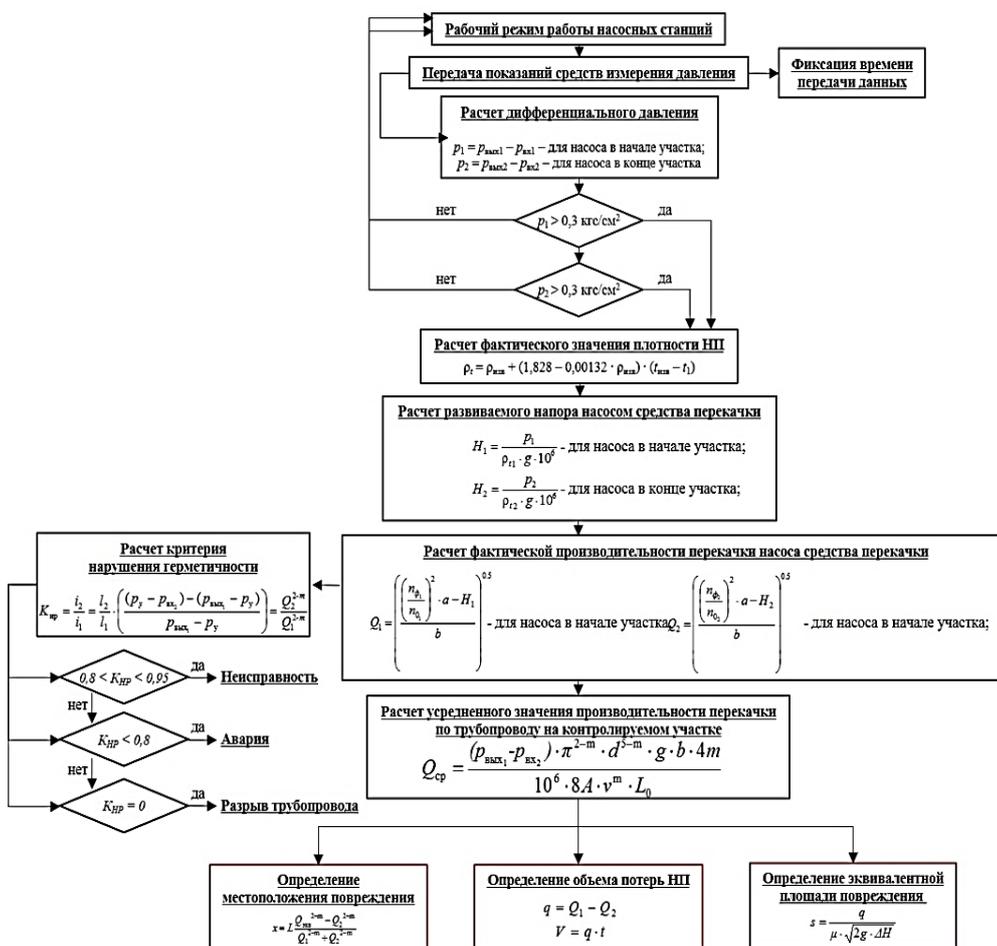


Рис. 5. Алгоритм специального программного обеспечения мониторинга утечек нефтепродуктов на СРТ

Рассмотрим прототип системы мониторинга утечек нефтепродуктов на СРТ, включающей программный уровень на основе искусственного интеллекта (рис. 6).

Система — сложный аппаратный комплекс, ранжированный по трем уровням: нижний, средний и верхний. Нижний уровень включает в себя средства измерения, инструментальное обеспечение для формирования базы данных. Датчики измеряют давления на входе и выходе насосной станции. Средний уровень состоит из локальных измерительных блоков, собирающих технологические данные средств измерений нижнего уровня. Из собранных данных формируются информационные пакеты, снабженные метками времени. Пакеты по каналам связи передаются на сервер системы. В совокупности нижний и средний уровни являются реализацией метода, представленного на рисунке 4. Верхний уровень состоит из сервера системы и одного или нескольких автоматизированных рабочих мест (АРМ) диспетчера. На АРМ установлено специальное программное обеспечение с системой поддержки принятия решения на основе искусственного интеллекта. Специальное программное обеспечение в автоматизированном режиме обрабатывает информационные пакеты среднего уровня.

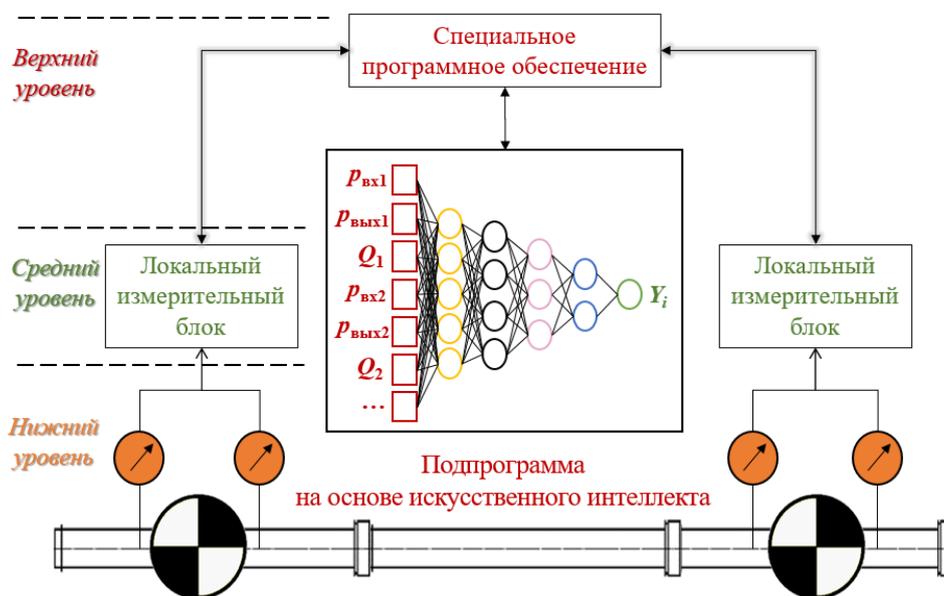


Рис. 6. Архитектура системы интеллектуального мониторинга утечек нефтепродуктов при повреждении СРТ

С использованием искусственного интеллекта подтверждается или опровергается наличие утечки в трубопроводе, могут быть оценены параметры утечки. В таком случае нейросеть формирует заключение Y_i в бинарной форме. При необходимости и технической возможности система переводит работу насосных станций в аварийный режим или представляет диспетчеру информацию для принятия решения. Математическое обеспечение интеллектуальной системы основано на алгоритмах обучения многослойных перцептронов, например, обратного распространения ошибки, Левенберга — Марквардта и др. [6, 7]. Обучение нейросетей осуществляется

на универсальных базах данных, позволяющих в любых условиях развертывания осуществлять оперативный контроль, адаптированных к условиям сооружений сборно-разборного трубопровода и особенностям эксплуатации объекта. Интеллектуальный модуль может быть обучен на специальных базах данных в особых случаях, например, для сложных инженерно-геологических условий, сооружения в чрезвычайных ситуациях высокой опасности.

Выводы

Применение предложенной системы мониторинга утечек нефтепродуктов при повреждениях, базирующейся на применении передовых высокопроизводительных методов вычислений с использованием искусственного интеллекта и нейронных сетей, позволит усилить обоснованность и улучшить качество принимаемых решений при обнаружении утечек, снижая влияние человеческого фактора, а также заранее прогнозировать изменение состояния целостности линейной части мобильных нефтепродуктопроводов.

Особую актуальность разработанные алгоритм и СОУ приобретает в случае необходимости оперативного подтверждения или опровержения факта утечки в период использования СРТ при ликвидации экологических катастроф или чрезвычайных ситуациях на объектах нефтегазовой отрасли. Таким образом, описанный в настоящей статье подход может быть использован эксплуатирующими организациями при контроле технического состояния мобильных СРТ для определения местоположения и расхода утечек нефтепродуктов в режиме реального времени в автоматизированном формате.

Список источников

1. Серeda, В. В. Полевые сборно-разборные трубопроводы — создание, развитие, применение / В. В. Серeda. — Москва : Воентелит, 2001. — 352 с. Текст : непосредственный.
2. Интеллектуальный мониторинг утечек нефтепродуктов при эксплуатации магистральных и мобильных нефтепродуктотранспортных систем / Сеоев, Л. В., Мельников, Д. И., Земенкова, Ю. Д. [и др.]. — Текст : непосредственный // Деловой журнал Neftegaz.RU. — 2022. — № 5–6. — С. 90–92.
3. Классификация потерь горючего при использовании полевых магистральных трубопроводов / Л. В. Сеоев, Д. А. Дроздов, Д. И. Мельников [и др.]. — Текст : непосредственный // Рассохинские чтения – 2025: материалы 17 международной конференции (6–7 февраля 2025 г., Ухта) / под редакцией Р. В. Агинеи. — Ухта : УГТУ, 2025. — С. 261–271.
4. Сеоев, Л. В. Способ определения места нарушения герметичности полевого магистрального трубопровода при авариях и неисправностях / Л. В. Сеоев, Д. А. Дроздов, Д. У. Думболов. — Текст : непосредственный // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. — Вып. 61 / под общ. ред. В. А. Маркина. — Москва : 25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России, 2023. — 368 с.
5. Дроздов, Д. А. Исследование гидравлического сопротивления сборно-разборных трубопроводов / Д. А. Дроздов, Л. В. Сеоев. — Текст : непосредственный // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. — Вып. 59 / под общей редакцией В. А. Маркина, Н. Н. Гришина. — Москва : 25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России, 2020. — 783 с.

6. Земенкова, М. Ю. Методологическое обеспечение мониторинга безопасности объектов транспорта и хранения нефти и газа на основе интеллектуальных экспертных систем : специальность 05.26.02 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Земенкова Мария Юрьевна; Ф Г А О У В О «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина», 2021. – 443 с. – Текст : непосредственный.

7. Земенкова, М. Ю. Интеллектуальный мониторинг состояний объектов трубопроводного транспорта углеводородов с применением нейросетевых технологий / М. Ю. Земенкова, Е. Л. Чижевская, Ю. Д. Земенков. – DOI 10.31897/PMI.2022.105. – Текст : непосредственный // Записки Горного института. – 2022. – Т. 258. – С. 933–944.

References

1. Sereda, V. V. (2001). Polevye sborno-razbornye truboprovody — sozdanie, razvitie, primeneniye. Moscow, Voentelit Publ., p. 352. (In Russian).

2. Seoev, L. V., Mel'nikov, D. I., Zemenkova, Yu. D., Chizhevskaya, E. L., & Podorozhnikov, S. Yu. (2022). Intellektual'nyy monitoring utechek nefteproduktov pri ekspluatatsii magistral'nykh i mobil'nykh nefteproduktotransportnykh system. Nefte-gaz.RU, (5-6), pp. 90-92. (In Russian).

3. Seoev, L. V., Drozdov, D. A., Mel'nikov, D. I., Dumbolov, D. D., Povetkin, P. E., & Gorozhanin, I. V. (2025). Klassifikatsiya poter' goryuchego pri ispol'zovanii polevykh magistral'nykh truboprovodov. Rassokhinskie chteniya – 2025: materialy 17 mezhdunarodnoy konferentsii. Ukhta, UGTU Publ., pp. 261-271. (In Russian).

4. Seoev, L. V., Drozdov, D. A., & Dumbolov, D. U. (2023). Sposob opredeleniya mesta narusheniya germetichnosti polevogo magistral'nogo truboprovoda pri avariyaх i neispravnostyakh. Trudy 25 GosNII MO RF. Moscow, 25 GosNII khimmotologii Minoborony Rossii, (61), 368 p. (In Russian).

5. Drozdov, D. A. & Seoev, L. V. (2020). Issledovanie gidravlicheskogo soprotivleniya sborno-razbornykh truboprovodov. Trudy 25 GosNII MO RF. Moscow, 25 GosNII khimmotologii Minoborony Rossii, (59), 783 p. (In Russian).

6. Zemenkova, M. Yu. Metodologicheskoe obespechenie monitoringa bezopasnosti ob'ektov transporta i khraneniya nefti i gaza na osnove intellektual'nykh ekspertnykh sistem. Diss. ... doktora tekhn. nauk / Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet nefti i gaza (natsional'nyy issledovatel'skiy universitet) imeni I. M. Gubkina», 2021. – 443 p. (In Russian).

7. Zemenkova, M. Yu., Chizhevskaya, E. L., & Zemenkov, Yu. D. (2022). Intelligent monitoring of the condition of hydrocarbon pipeline transport facilities using neural network technologies. Journal of mining institute, (258), pp. 933-944. (In Russian). DOI: 10.31897/PMI.2022.105

Информация об авторах / Information about the authors

Сеоев Лазарь Валерьевич, соискатель кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, ORCID: <https://orcid.org/0000-0007-9241-9325>

Lazar V. Seoev, Applicant of the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, ORCID: <https://orcid.org/0000-0007-9241-9325>

Земенкова Мария Юрьевна, доктор технических наук, профессор кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, *muzemenkova@mail.ru*, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8106-0683>

Подорожников Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2828-8020>

Чижевская Елена Леонидовна, кандидат экономических наук, доцент кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0158-3538>

Maria Yu. Zemenkova, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, *muzemenkova@mail.ru*, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8106-0683>

Sergey Yu. Podorozhnikov, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2828-8020>

Elena L. Chizhevskaya, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0158-3538>

Статья поступила в редакцию 30.04.2025; одобрена после рецензирования 12.05.2025; принята к публикации 19.05.2025.

The article was submitted 30.04.2025; approved after reviewing 12.05.2025; accepted for publication 19.05.2025.