

# Интеллектуальная система мониторинга технического состояния магистрального газопровода на основе методов искусственного интеллекта

М. С. Фёдоров

*Санкт-Петербургский  
государственный  
электротехнический  
университет ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*  
mfed.sibur@gmail.com

Ю. Н. Василевская

*Санкт-Петербургский Горный  
университет Императрицы  
Екатерины II*  
vasilevjaya665@gmail.com

А. А. Шабашкина

*Санкт-Петербургский Горный  
университет Императрицы  
Екатерины II*  
shabashkinaanastasia@yandex.ru

К. Р. Закревская

*Санкт-Петербургский Горный  
университет Императрицы  
Екатерины II*  
krnzkvc@gmail.com

**Аннотация.** В рамках данного исследования ставится задача анализа существующих методов диагностики состояния магистральных трубопроводов и определения возможностей применения датчиков и технологий искусственного интеллекта для повышения эффективности диагностических исследований на наличие дефектов, а также для улучшения качества обработки диагностических данных.

**Ключевые слова:** диагностика трубопроводов, магистральные газопроводы, неразрушающий контроль, датчики, искусственный интеллект, мониторинг технического состояния, обнаружение дефектов

## I. ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития топливно-энергетического комплекса обеспечение надежной и безопасной эксплуатации магистральных газопроводов является одной из ключевых задач газотранспортной отрасли. Магистральные газопроводы представляют собой сложные инженерные сооружения большой протяженности, функционирующие в условиях высоких рабочих давлений и значительных нагрузок, возникающих процессе транспортировки природного газа. Надежность функционирования таких объектов во многом определяется техническим состоянием линейной части трубопроводной системы.

Следует отметить, что в процессе длительной эксплуатации трубопроводы подвергаются воздействию различных факторов, включая коррозионные процессы, механические нагрузки, температурные колебания, а также влияние окружающей среды. Указанные воздействия могут приводить к постепенному ухудшению состояния металла труб, повреждению защитных покрытий и возникновению дефектов. При

отсутствии своевременного выявления и устранения подобных дефектов возрастает риск аварийных ситуаций, что может привести к значительным экономическим и экологическим последствиям [5, 6].

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель данного исследования заключается в обобщении существующих методов диагностики технического состояния магистральных газопроводов и в анализе потенциального применения современных сенсорных технологий и методов искусственного интеллекта для повышения эффективности обнаружения дефектов и обработки диагностических данных. Рассматриваются примеры реализации интеллектуальных систем мониторинга на основе гибридного подхода, включая фреймворки графовых нейронных сетей, методы инспекции, основанные на оценке рисков (RBI), и моделирование с использованием компьютерных симуляций [7, 8, 9].

Технической целью данного исследования является разработка архитектуры интеллектуальной системы мониторинга для оценки технического состояния линейного участка магистрального газопровода. Предлагаемая система предусматривает интеграцию разнородных диагностических данных, включая данные промыслового и внутреннего контроля, методы неразрушающего контроля, а также телеметрию с датчиков давления, температуры и вибрации. Кроме того, система обеспечивает автоматизированную генерацию рекомендаций по выбору методов ремонта и планированию эксплуатационно-технических вмешательств, включая оценку технической и экономической эффективности предлагаемых решений [10, 11].

### III. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

В данном исследовании рассматривается магистральный газопровод, являющийся ключевым элементом системы транспортировки газа и обеспечивающий его транспортировку на большие расстояния. Эксплуатационная надежность таких объектов напрямую зависит от технического состояния линейно части трубопроводов, которая постоянно подвергается воздействию эксплуатационных и природно-климатических факторов.

В процессе длительной эксплуатации трубопроводов происходит постепенное снижение их эксплуатационной надежности, обусловленное развитием коррозионных повреждений, механическими повреждениями и старением изоляционных покрытий. Для обеспечения безопасной и бесперебойной работы трубопроводной системы проводится комплекс мероприятий по техническому обслуживанию и капитальному ремонту газопроводов [1, 4].

Капитальный ремонт газопровода представляет собой комплекс технологических операций, направленных на восстановление, поддержание работоспособности трубопровода и его составляющих до уровня, обеспечивающего дальнейшую безопасную эксплуатацию. Проведение капитального ремонта включает несколько основных этапов, среди которых подготовительные работы, диагностическое обследование, выполнение ремонтных мероприятий и восстановление эксплуатационных параметров объекта [12, 13, 14].

Одним из ключевых этапов подготовки капитального ремонта является проведение диагностики технического состояния газопровода. Диагностика направлена на выявление дефектов металла трубы и сварных соединений, повреждений изоляционного покрытия, появления трещин, деформации труб. При эксплуатации магистральных трубопроводов применяются различные методы диагностики, которые условно можно разделить на две основные группы – внутритрубная диагностика и наружная диагностика.

К основным методам наружной диагностики относятся следующие виды контроля:

- визуально-измерительный контроль;
- магнитопорошковая диагностика;
- ультразвуковая диагностика;
- рентгенографическая диагностика;
- электрометрическая диагностика.

Одним из наиболее эффективных методов обследования состояния газопровода является внутритрубная диагностика, которая проводится с использованием специальных диагностических устройств – внутритрубных поршней. Эти устройства перемещаются по трубопроводу под действием потока транспортируемого газа и позволяют выявлять дефекты металла труб, коррозионные повреждения, деформации.

Для уточнения параметров обнаруженных дефектов и более детального обследования отдельных участков применяется наружная диагностика. Как правило, она проводится после вскрытия трубопровода в местах предполагаемого расположения дефектов и включает несколько методов неразрушающего контроля. Одним из

таких методов является магнитопорошковая диагностика, предназначенная для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов металла и сварных соединений. Метод основан на намагничивании исследуемого участка трубопровода и нанесении на его поверхность магнитного порошка, частицы которого концентрируются в местах нарушения однородности металла, что позволяет обнаружить трещины.

Ультразвуковая диагностика основана на распространении ультразвуковых волн в металле трубы и регистрации отраженных сигналов от внутренних дефектов. Анализ полученных сигналов позволяет выявлять трещины, расслоения, коррозионные повреждения, а также определять фактическую толщину стенки трубы.

Рентгенографическая диагностика применяется для обнаружения внутренних дефектов металла и сварных соединений. Метод основан на прохождении рентгеновского излучения через металл трубы и формировании изображения его внутренней структуры, что позволяет выявлять такие дефекты, как поры, трещины.

Визуально-измерительный контроль является одним из наиболее простых и распространенных методов диагностики и проводится путем непосредственного осмотра поверхности трубопровода и сварных соединений. В ходе такого контроля выявляются видимые дефекты, включая коррозионные повреждения, механические деформации, нарушения геометрии сварных соединений и повреждения изоляционного покрытия.

На практике наибольшую информативность при окончательной оценке состояния металла трубы и сварных соединений зачастую обеспечивает визуально-измерительный контроль, проводимый непосредственно после вскрытия трубопровода. Данный метод позволяет специалистам непосредственно оценить фактическое состояние металла, а также характер повреждения изоляционного покрытия [15, 16].

В зависимости от вида повреждения используются:

- точечный ремонт трубы;
- восстановление изоляционного покрытия;
- вскрытие и поднятие части трубы с последующей заменой дефектного участка.

Несмотря на высокую результативность методов диагностики магистральных газопроводов, которые известны на сегодняшний день, их использование непосредственно связано с накоплением большого объема разнородной информации, включающей данные об эксплуатационных характеристиках трубопровода, данные внутритрубного исследования на предмет дефектов, а также сведения о состоянии изоляционного покрытия. Тогда, обработка таких массивов данных с использованием существующих способов требует более высоких затрат времени и высокой квалификации персонала, что в реальности замедляет принятие решений о необходимости применения определенного метода проведения капитального ремонта.

В связи с этим, перспективным направлением развития систем диагностики магистральных газопроводов является применение современных технологий мониторинга, основанных на сенсорных системах и интеллектуальных методах обработки

данных. Реализация подобных решений позволит повысить точность обнаружения дефектов, улучшить оценку технического состояния трубопроводов и обеспечить более обоснованный выбор методов капитального ремонта [17, 18].

Для повышения надежности линейной части магистральных газопроводов (МГ) в качестве методологической основы предлагается использовать архитектуру интеллектуальной системы мониторинга (ИСМ), которая основана на гибридном вычислительном подходе. Новизна данного решения заключается в объединении аппарата графовых нейронных сетей (GNN), методов риск-ориентированного анализа (RBI) и инструментов имитационного моделирования. Это автоматизирует цикл обработки гетерогенных диагностических данных от начальной регистрации параметров до формирования обоснованных управленческих решений о ремонтных работах. Архитектура системы включает три иерархически соподчиненных уровня, реализующих сквозной конвейер обработки информации (рис. 1).

### Цели интеллектуальной системы мониторинга:

- повышение надежности магистральных газопроводов;
- автоматизация обработки разнородных диагностических данных;
- обеспечение непрерывного мониторинга технического состояния трубопровода;
- повышение точности выявления дефектов;
- прогнозирование развития дефектов;
- оптимизация планирования капитального ремонта на основе риск-ориентированного подхода;
- снижение эксплуатационных затрат [19, 20].

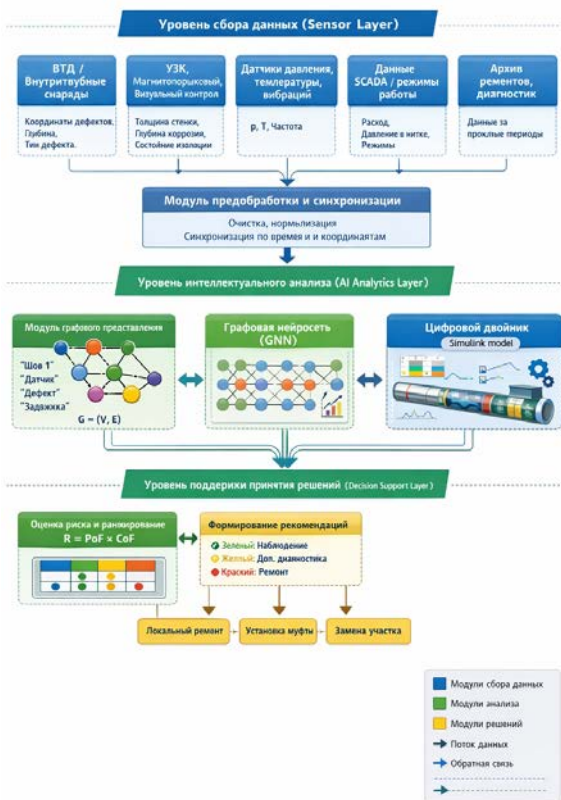


Рис. 1. Архитектура интеллектуальной системы мониторинга технического состояния магистрального газопровода

Нижний уровень (сбор и первичная обработка) отвечает за сбор данных из распределенных источников. В контуре сбора находятся результаты внутритрубной диагностики (координатная привязка, геометрические параметры дефектов, глубина коррозионных разрушений), данные неразрушающего контроля, непрерывный поток телеметрии от стационарных датчиков давления, вибрации и температуры, параметры эксплуатационных режимов, поступающие из SCADA-систем, а также архивные данные о предыдущих диагностиках и ремонтах. На данном этапе фильтруются высокочастотные шумы, устраняются аномальные выбросы, признаки масштабируются к единому диапазону, разнородные данные синхронизируются.

Ядро системы (второй уровень) — это комплекс взаимосвязанных аналитических модулей. Ключевым звеном является модуль графового представления, который осуществляет дискретизацию линейного объекта. Магистральный трубопровод отображается в виде ориентированного графа  $G = (V, E)$ , где множество вершин  $V$  включает в себя конструктивные элементы (сварные стыки, узлы запорной арматуры), локализованные дефекты и точки установки сенсоров, а множество ребер  $E$  моделирует линейные участки, соединяющие эти вершины. Каждой вершине ставится в соответствие вектор признаков  $x_i = (d_i, t_i, p_i, c_i)$ , собирающий и хранящий информацию о глубине дефекта ( $d_i$ ), толщине стенки ( $t_i$ ), текущем давлении ( $p_i$ ) и расчетной скорости коррозии ( $c_i$ ).

Для анализа топологической связности и прогнозирования дефектов используется графовая нейронная сеть, которая функционирует по принципу агрегации. На каждой итерации обновления скрытого состояния узла  $vv$  используется сверточное правило:

$$h_v(k+1) = \sigma(W(k) \cdot \text{AGGREGATE}(\{h_u(k): u \in N(v) \cup \{v\}\})), \quad (1)$$

где  $h_v(k+1)$  – вектор признаков узла  $v$  на  $k$ -м шаге,  $N(v)$  – множество смежных узлов,  $W(k)$  – матрица обучаемых весов, а  $\sigma$  – нелинейная функция активации.

Для физического представления этой операции необходимо создать математическую модель влияния соседних участков газопровода друг на друга, так как она крайне важна для прогноза распространения коррозионных разрушений. В результате работы графовой нейронной сети формируются прогнозные значения глубины образовавшегося дефекта (горизонт 1, 3 и 5 лет) и количественная оценка текущей вероятности отказа (PoF).

Помимо анализа GNN функционирует цифровой двойник, который создан в среде MatLAB Simulink и является виртуальной копией физического участка, представляющую собой объединенную гидравлическую и конечно-элементную прочностную модель. Благодаря этому модулю возможно проводить виртуальные испытания при различных сценариях, используя прогнозные данные параметров, полученные от графовой нейронной сети. Взаимодействие осуществляется итеративно: выходные данные блока прогнозирования развития дефектов подаются на вход имитационной модели. Это позволяет получать последовательные уточнения оценок потенциальных последствий отказов [17, 18].

Третий уровень (поддержка принятия решений) собирает и хранит в себе результаты расчетов. Вычисления интегрального показателя риска  $R_i = PoF_i \cdot CoF_i$  для каждого дискретного участка производятся с использованием е методологии риск-ориентированного подхода (RBI), где CoF – стоимость последствий аварии (прямые затраты на ремонт, потерю от недопоставки газа и экологический ущерб). Упорядочивание участков по величине  $R_i$  позволяет формировать конкретные рекомендации – от отсутствия необходимости вмешательства до назначения дополнительной диагностики или ремонта с указанием наиболее подходящего метода (например, установка ремонтной муфты, замена участка, локальная вырезка) и сроков реализации.

Физическая реализация предлагаемой системы представляет собой распределенную сеть датчиков с переменным шагом дискретизации. На линейных участках шаг установки сенсоров от 500 до 1000 метров, а в зонах повышенного риска, таких как водные переходы, тектонические разломы) шаг от 50 до 100 метров. Первичные преобразования производятся с помощью тензодатчиков для регистрации деформаций, пьезорезистивные датчики давления, распределенные волоконно-оптические сенсоры, проложенные вдоль оси трубопровода, и лазерные сканеры для детекции утечек метана. С модулей ввода-вывода промышленных контроллеров (например, SCADAPack) после аналого-цифрового преобразования данные поступают в SCADA-систему верхнего уровня, а затем в ядро ИСМ для графового анализа и моделирования.

Проверка предложенной методологии проведена на основе данных инвестиционного проекта капитального ремонта участка магистрального газопровода (протяженность 45,7 км). Исходные параметры проекта: капитальные вложения – 4 378,15 млн руб., плановый горизонт эксплуатации после ремонта – 10 лет, годовая пропускная способность – 339 913 161,37 м<sup>3</sup>, тариф на транспортировку – 7,67 руб./м<sup>3</sup>, ставка дисконтирования (WACC) – 12,38%. В структуре затрат на внедрение ИСМ преобладают капиталовложения в измерительные комплексы (40 млн руб.), волоконно-оптическую систему мониторинга (40–70 млн руб.), инфраструктуру сбора и передачи данных (15–20 млн руб.), серверное оборудование (10–25 млн руб.), специализированное программное обеспечение и разработку интеллектуальных модулей (30–80 млн руб.), а также пусконаладочные работы (30–50 млн руб.).

#### А. Сценарии

Для исследования было создано две различные модели:

**Базовый сценарий (классический подход).** В данном варианте предполагается эксплуатация по планово-предупредительным ремонтам (ППР). Ремонт проводится только по факту обнаружения дефектов при периодических диагностиках, когда параметры достигают предельно-допустимых значений, указанных в нормативных документах [3, 17].

**Гибридный сценарий (с использованием ИСМ).** Техническое состояние системы прогнозируется и решения о ремонте принимаются на основе оценок графовой нейросети и цифрового двойника, которые

предлагают наиболее подходящий момент для устранения дефектов до критического состояния объекта и оптимальный метод ремонта [4, 15].

Высокая точность прогнозирования локализации и скорости развития дефектов позволяет интеллектуальной системе мониторинга оптимизировать стратегию ремонта: локальный ремонт рекомендован для 68% участков с дефектами, установка усилительных муфт для 22% участков, замена участка всего лишь для 10% наиболее критических зон. Данные результаты сокращают капитальные затраты на 15% по смете, что составляет 715,11 млн руб.

Внедрение системы способствует снижению операционных рисков, так как раннее обнаружение дефектов предотвращает две внеплановые остановки транспорта газа в течение 10 лет эксплуатации газопровода. Одна аварийная остановка, включая упущенную выгоду и затраты на внеплановый ремонт, составляют ориентировочно 150 млн рублей. Следовательно, общая экономия от предотвращения аварийных ситуаций достигает 300 млн рублей [4, 21].

Показатели экономической эффективности проекта отображены в табл. 1. Их существенное улучшение подтверждается пересчетом дисконтированных денежных потоков с учетом полученной экономии при ставке дисконтирования 12,38%. С точки зрения экономической эффективности и технической безопасности гибридный подход к управлению надежностью магистрального трубопровода наиболее целесообразен.

ТАБЛИЦА 1. Показатели экономической эффективности

Показатель	Без ИСМ	С ИСМ	Изменение
Капитальные вложения, млн руб.	4 767,39	4 052,28	-715,11
NPV, млн руб.	7 145,13	8 520,24	+1 375,11
Индекс доходности PI	2,50	3,10	+0,60
Средняя вероятность отказа	0,38	0,22	-42%

Сравнительный анализ двух сценариев демонстрирует, что внедрение интеллектуальной системы мониторинга положительно влияет на показатели эксплуатационной надежности, так как снижается показатель средней вероятности отказа. Экономическая эффективность предлагаемого решения подтверждается сокращением капитальных затрат при увеличении чистой приведенной стоимости (NPV) и индекса доходности (PI).

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Архитектура интеллектуальной системы мониторинга, которая представлена в работе, обеспечивает методологическую основу для цифровой трансформации эксплуатации газотранспортных систем. Она построена на интеграции аппарата графовых нейронных сетей (GNN), методов риск-ориентированного анализа (RBI) и имитационном построении моделей цифровых двойников.

Благодаря предложенному подходу возможно осуществить переход от классической стратегии планово-предупредительных ремонтов (ППР) к модели предиктивного управления состоянием трубопровода,

что соответствует современным тенденциям цифровизации производства и повышению эксплуатационной надежности стратегически важной инфраструктуры.

Экономическая эффективность предложенного проекта аргументирована проверкой на основе данных инвестиционного проекта капитального ремонта магистрального газопровод.

Ключевыми результатами моделирования являются следующие показатели:

- сокращение капитальных затрат на ремонтные работы на 715 млн рублей;
- прирост чистой приведенной стоимости (NPV) на 1 375 млн рублей;
- снижение средней вероятности отказа на 42%.

Предложенное решение обладает научной новизной и практической значимостью, так как решает проблему неоднородности диагностических данных. Преимуществом перед классическими методами, которые направлены на нормативные исследования и локальную обработку параметров, разработанная система позволяет получать целостное представление о состоянии объекта на основе анализа разнородной информации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Nikolaev A.K., Romanov A.V., Zaripova N.A., Fetisov V.G. Modeling of flow in field pipeline to confirm effectiveness of insertion of splitting couplings in control of rill-washing corrosion, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Conference, 2018, 194 DOI: 10.1088/1755-1315/194/8/082030
- [2] Arefiev I.B., Afanaseva O.V. (2022). Implementation of Control and Forecasting Problems of Human-Machine Complexes on the Basis of Logic-Reflexive Modeling. Lecture Notes in Networks and Systems, 187-197. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-98832-6\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-98832-6_17)
- [3] Martirosyan A.V., Romashin D.V. (2026). Investigation of the Control Strategies for Enhancing the Efficiency of Natural Gas Separation and Purification Processes. Processes, 14(4), Article 700. <https://doi.org/10.3390/pr14040700>
- [4] Fetisov V.G., Nikolaev A.K., Lykov Y.V. Aggregative simulation method for implementing mathematical models for gas transmission systems 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 327 022033 DOI 10.1088/1757-899X/327/2/022033
- [5] Sidorenko A.A., Sidorenko S.A. (2026). A Comprehensive Strategy for Safe and Efficient Mining of Thick, Spontaneous Combustion-prone Coal Seams under Geodynamic Hazard Conditions. International Journal of Engineering Transactions B Applications, 39(4), 818-827. <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.04a.01>
- [6] Golovina E.I., Grebneva A. (2021). Some Aspects of Groundwater Resources Management in Transboundary Areas. Journal of Ecological Engineering, 22(4), 106-118. <https://doi.org/10.12911/22998993/134037>
- [7] Ilyushin Y.V., Nosova V. A. (2025). Development of Mathematical Model for Forecasting the Production Rate. International Journal of Engineering, 38(8), 1749-1757. <https://doi.org/10.5829/ije.2025.38.08b.02>
- [8] Sidorenko A.A., Sidorenko S.A. (2026). Ground control maturity levels: a conceptual model for transitioning from reactive to strategic management in coal mines. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026(2-1), 131-144. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2026\\_21\\_0\\_131](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2026_21_0_131)
- [9] Kleshnia V.A., Kukharova T., Fedosov I.S., Tsapleva V.V. (2025). Modeling of Pressure Control System in Oil Wells Accounting for Reservoir Non-Homogeneity. 64-67. <https://doi.org/10.1109/CTS67336.2025.11196275>
- [10] Andreeva E.S., Marinina O.A., Turovskaya L.G. Nanofluid flooding as a method of enhancing oil recovery: mechanism, advantages. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering, 2024, 335(6), p. 189-202 DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4408
- [11] Sidorenko A.A. et al 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1333 032078. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/3/032078>
- [12] Kukharova T., Martirosyan A., Asadulagi M.-A., Ilyushin Y. (2024). Development of the Separation Column's Temperature Field Monitoring System. Energies, 17(20), Article 5175. <https://doi.org/10.3390/en17205175>
- [13] Saveliev D.S., Sidorenko S.A. (2017). Effects of competitive martial arts on first-year students' psychophysiological potential. Teoriya I Praktika Fizicheskoy Kultury, 2017-January(5), 43-45.
- [14] Zakirova C., Sadykova R., Stroykov G., Zakirov Z. (2021). Formation of the Organizational Structure of Managing a Large Project of Oil Field Development. TEM Journal, 10(3), 1122-1129. <https://doi.org/10.18421/TEM103-16>
- [15] Chanysheva A.F. et al 2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 302 012068 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/302/1/012068>
- [16] Sidorenko A., Kriukov A., Meshkov A., Sidorenko S. (2025). A Comprehensive Technical and Economic Analysis of Rubber-Tyred Transport Implementation in Longwall Mining: A Case Study on the V.D. Yalovsky Coal Mine. Mining, 5(4), Article 65. <https://doi.org/10.3390/mining5040065>
- [17] Asadulagi M.M., Ioskov G.V., Tronina E.V. (2019). Synthesis of Lumped and Distributed Controllers for Control System of Hydrodynamic Process. 2019 International Multi Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies Fareastcon 2019, Article 8933859. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8933859>
- [18] Nikolaichuk L., Sinkov L., Malisheva A. (2017). Analysis of the problems and development prospects of the oil refining industry of Russia. Journal of Business and Retail Management Research, 11(4), 177-183. <https://doi.org/10.24052/jbrmr/v11is04/aotpadpoterior>
- [19] Golovina E.I. (2017). Strategic issues groundwater extraction management in Russia. Journal of Ecological Engineering, 18(3), 13-21. <https://doi.org/10.12911/22998993/70202>
- [20] Afanaseva O., Pervukhin D., Khatrusov A. Vibration-Based Condition Monitoring of Diesel Engines in Industrial Energy Applications: A Scoping Review. Energies 2025, 18, 5717. <https://doi.org/10.3390/en18215717>
- [21] Cherepovitsyn A., Rutenko E., Yudin S. (2023). Global challenges and opportunities for arctic oil and gas projects. E3s Web of Conferences, 378, Article 06007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337806007>