



Оптимизация структуры парка грузовых автомобилей для обслуживания магистральных газопроводов

Н. С. Захаров, Н. О. Сапоженков , В. А. Ракитин

Тюменский индустриальный университет

Тюмень, ул. Володарского, 38, 625000, Российская Федерация

sapozhenkovno@tyuiu.ru



Аннотация. На основе апробированных методов обработки статистических данных проанализирован опыт эксплуатации газомоторной техники на примере газодизельных модификаций седельных тягачей КАМАЗ с учетом фактической надежности, особенностей конструкции топливной аппаратуры и показателей грузоподъемности. Анализ частоты выполнения транспортных заданий по перевозке грузов проводился на основе путевых листов и утвержденных графиков строительно-монтажных работ по содержанию объектов газотранспортной инфраструктуры с оценкой затрат на техническое обслуживание и формализацией критерии оптимизации транспортных маршрутов. В ходе сравнения седельных тягачей с традиционными и газомоторными двигателями установлены новые закономерности формирования себестоимости перевозок и разработана многокритериальная система оценки эффективности, учитывающая экономические, эксплуатационные и логистические параметры. Для практического использования полученных результатов предложена модель на смешанных эффектах с функцией единичного скачка, применение которой позволяет снизить себестоимость транспортных работ на 18 % за счет повышения коэффициента использования парка и оптимизации логистических маршрутов доставки грузов на объектах газотранспортной системы.

Ключевые слова: себестоимость перевозок, эффективность транспортного обеспечения, топливная аппаратура, АГНКС, оптимизация маршрутов

Благодарности. Исследование выполнено за счет средств гранта НО «Благотворительный фонд «ЛУКОЙЛ».

Для цитирования: Захаров Н. С., Сапоженков Н. О., Ракитин В. А. Оптимизация структуры парка грузовых автомобилей для обслуживания магистральных газопроводов. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(4):86–99. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-86-99> EDN: QVRJKP

Truck fleet structure optimization for main gas pipelines servicing

Nikolay S. Zakharov, Nikolay O. Sapozhenkov , Vladimir A. Rakitin
Industrial University of Tyumen
Tyumen, 38 Volodarskogo St., 625000, Russian Federation

sapozhenkovno@tyuiu.ru

Abstract. Based on proven statistical data, the experience of operating gas-powered vehicles was analyzed using the example of gas-diesel modifications of KAMAZ truck tractors, taking into account actual reliability, design features of the fuel system, and load capacity. The analysis of the cargo transportation tasks frequency was conducted based on waybills and approved schedules for construction and installation work for the maintenance of gas transportation infrastructure facilities. It also included an assessment of maintenance costs and formalization of criteria for optimizing transport routes. During the comparative analysis of tractor trucks with conventional and gas-powered engines, new patterns of transportation cost formation were established and a multi-criteria efficiency assessment system was developed. This system takes into account economic, operational, and logistical parameters. For practical application of the obtained results, a mixed-effects model with a single-step function was proposed. The use of this model makes it possible to reduce the transportation costs by 18% by increasing the fleet utilization rate and optimizing logistics routes for cargo delivery at the facilities of the gas transmission system.

Keywords: transportation costs, efficiency of transport support, fuel equipment, CNG stations, route optimization

Acknowledgements. The research was supported by a grant from the LUKOIL Charitable Fund.

For citation: Zakharov N. S., Sapozhenkov N. O., Rakitin V. A. Truck fleet structure optimization for main gas pipelines servicing. *Architecture, Construction, Transport.* 2025;5(4):86–99. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-86-99>

1. Введение / Introduction

Применение расширенного перечня транспортных и транспортно-технологических машин в области добычи, переработки и транспортировки газа обусловлено особенностями производственно-технологических процессов в этой сфере [1, 2]. В решении транспортно-логистических задач, осуществляемых на значительном удалении от основных производственно-технических комплексов, особую значимость имеют факторы климатической вариативности и специфика маршрутной сети, характеризующейся преимущественным отсутствием твердых дорожных покрытий [1].

Данные условия эксплуатации предопределяют преобладание в структуре транспортного и специализированного технологического парка грузовых автомобилей широкого спектра функционального применения. Формирование структуры автотранспортного парка грузовых машин осуществляется с учетом комплексного анализа габаритно-массовых характеристик транспортируемых грузов, специфических требований к процессу перевозки и дорожных условий. При оценке конкурентоспособности транспортных средств ключевыми параметрами выступают показатели безопасности эксплуатации, экологической эффективности, эксплуатационной надежности и топливной экономичности.

Выбор грузового автотранспорта производится по нескольким критериям: показателю грузоподъемности, функциональной специализации, конструктивным особенностям и типу используемого топлива [3, 4]. Актуальная методологическая парадигма формирования автотранспортного парка газодобывающих предприятий основана на принципе комплексного обеспечения всего спектра производственных задач: от пассажирской и грузовой логистики до реализации узкоспециализированных технических операций, поэтому учитывает климатические факторы, параметры дорожно-транспортной инфраструктуры и организационно-эксплуатационные показатели [5, 6]. Это позволяет обеспечивать непрерывность транспортного сервиса в соответствии с отраслевыми нормативными требованиями и техническими регламентами по переработке нефтегазоконденсатных ресурсов.

Вместе с тем экономическая эффективность перехода на газомоторное топливо определяется совокупностью факторов, включающих инвестиционные затраты на монтаж специализированного оборудования, увеличение массы транспортного средства и модификацию рабочих параметров двигателей внутреннего сгорания [3, 4, 7–10]. При малой интенсивности эксплуатации данные факторы могут привести к экономически нецелесообразному росту эксплуатационных расходов, обусловленному превышением периода окупаемости над средним сроком владения транспортным средством и влиянием технологических изменений при производстве новой техники на показатели эксплуатации парков по критериям безотказности, обеспеченности ресурсами и трудоемкости технического обслуживания [11–13]. Поэтому управление парком газомоторной техники в условиях ужесточения требований к обеспечению безопасности эксплуатации и целевых показателей развития инфраструктуры для заправки и хранения газа с учетом расположения автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС) является актуальной проблемой. Для ее решения необходимо проведение дополнительных исследований в контексте разработки новых походов к формированию логистических маршрутов с учетом фактической надежности, эксплуатационных расходов и специфики выполнения транспортных работ.

Таким образом, целью исследования являлось повышение эффективности эксплуатации парка газомоторных седельных тягачей на основе оптимизации маршрутов перевозок в зависимости от срока службы и частоты расположения АГНКС. В качестве объекта исследования выступала комплексная система транспортного обеспечения работ по обслуживанию магистральных газопроводов, а предметом – структурная организация грузового автопарка. Для достижения поставленной цели потребовалось решить ряд задач, включая выявление взаимосвязей между ключевыми факторами, расчет экономических показателей и разработку математических моделей, что позволило снизить затраты на организацию перевозок и сформулировать практические рекомендации по оптимизации структуры парка грузовых автомобилей для транспортного обеспечения технологических процессов по обслуживанию магистральных газопроводов. Научная новизна работы заключается в разработке математической модели на смешанных эффектах для оптимизации структуры парка грузовых автомобилей, которая, в отличие от известных подходов, комплексно учитывает динамику изменения эксплуатационных затрат в зависимости от срока службы и логистических ограничений, связанных с неравномерностью расположения газозаправочной инфраструктуры.

Анализ опыта эксплуатации и ранее выполненных исследований показал, что вопросам изучения эффективности эксплуатации транспортных и транспортно-технологических машин посвящено много работ отечественных и зарубежных ученых [3, 4, 6, 7, 10–19]. Установлены закономерности формирования технического состояния по показателям надежности [12], потока требований к ресурсам [12, 13, 15], оптимального срока службы [11], стоимости [9, 20] и других критериев, применение которых в составе разработанных методик и методологий [3, 4, 10] повышает эффективность транспортного обеспечения технологических процессов с учетом особенностей выполнения транспортной работы, технических характеристик и условий эксплуатации [12] в составе парков транспортных и транспортно-технологических машин. Для совершенствования топливных систем современных грузовых автомобилей характерно регулярное изменение конструкции составных элементов, свойств материалов и алгоритмов управления [13, 15, 16], в результате чего изменяются параметры рабочих процессов, повышается производительность, улучшаются показатели топливной экономичности [17, 18, 20]. Прогрессирующий рост стоимости традиционных энергоносителей является причиной трансформации приоритетов в области оптимизации структуры автопарков, стимулирует переход на экономически более эффективные газовые виды топлива. Особую актуальность данная тенденция приобретает в контексте промышленных предприятий, где транспортные средства эксплуатируются в интенсивном многосменном режиме, обеспечивая максимально быструю окупаемость затрат

на переоборудование. Исследователи отмечают [5, 6, 10, 13, 16], что вариация условий и интенсивности эксплуатации приводит к деградации работоспособности технологического транспорта, что негативно отражается на экономической эффективности транспортных операций вследствие роста числа отказов, увеличения затрат на техническое обслуживание, приобретение комплектующих и необходимости содержания дополнительных резервных транспортных единиц для компенсации технологических простоев, обусловленных внеплановыми простоями. Поэтому оценка целесообразности использования газомоторной техники должна учитывать динамику изменения показателей эксплуатации в течение установленных сроков службы¹. В Концепции развития рынка газомоторного топлива в РФ на период до 2035 года² обозначена необходимость проведения научно-исследовательских работ и последующего внедрения эффективных технологических решений для использования газомоторного топлива. Оптимизация осуществляется на основе результатов анализа данных ГЛОНАСС-мониторинга с последующим формированием датасетов по интенсивности эксплуатации с привязкой к геопозиционированию по критериям расположения газозаправочных станций, поэтому определение параметров математических моделей для формирования маршрутов на основе алгоритмов оптимизации является актуальным направлением совершенствования методов управления корпоративными автопарками.

2. Материалы и методы / Materials and methods

Для предприятий по добыче, переработке и транспортировке газа вопросы, связанные с использованием газомоторного топлива, имеют стратегическое значение. По официальным данным, в дочерних обществах ПАО «Газпром» доля машин на газомоторном топливе превышает 63 % и составляет 23.5 тыс. ед.³, а к концу 2025 г. концерн ставит цель стать обладателем самого крупного в России парка техники на природном газе⁴, что обеспечивает репрезентативную базу для сопоставления дизельных и газодизельных комплектаций с учетом особенностей климата в северных регионах, фактических наработок на отказ и удаленности АГНКС.

В качестве методологии исследований выбрана концепция формирования качества автомобилей [1, 2]. Системный подход в ее основе предполагает рассмотрение структуры автопарка в виде системы, взаимосвязи между элементами которой определяются функциональными зависимостями и моделями, отражающими действительные закономерности формирования численных значений показателей воздействия исследуемых факторов. Для этого составляется схема системы формирования транспортных затрат при организации перевозки грузов с использованием седельных тягачей, определяются связи между элементами, вход, выход и характер взаимодействия с внешней средой.

В качестве исходных данных для оценки надежности использовались базы данных предприятий сервиса технологического транспорта, корпоративные отчеты по эксплуатации в транспортных

¹ Лобода В. Свыше 70 % автотранспортных средств в РФ имеют возраст от 10 лет и старше. URL: <https://www.autostat.ru/news/58195/> (дата обращения: 01.10.2025).

² Концепция развития рынка газомоторного топлива в Российской Федерации до 2035 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.08.2025 № 2366-р. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202509080022?index=2>

³ Отчет ПАО «Газпром» за 2024 год. URL: <https://www.gazprom.ru/investors/disclosure/reports/2024/> (дата обращения: 01.10.2025).

⁴ ПМЭФ-2025: «Газпром» сформировал крупнейший в России парк экологичной техники для перевозки сжиженных газов. URL: <https://www.gazprom.ru/press/news/2025/june/article581809/> (дата обращения: 01.10.2025).

подразделениях для обслуживания магистральных газопроводов за 2019–2024 гг.⁵, публикации о сравнении газодизельных и дизельных автомобилей с учетом сезонного влияния на поток отказов и особенностей эксплуатации газобаллонных автомобилей [3, 5, 11, 15, 17–19], исследования надежности двухтопливных модификаций [7–9], практические обзоры по использованию КАМАЗ [3, 13] и требования заводов-изготовителей по применению ГБО⁶. Удельные эксплуатационные затраты в модели включают в себя расходы на проведение регламентных работ в соответствии с действующей на предприятиях системой планово-предупредительных ремонтов, поэтому график ТО и нормативы трудоемкости заложены в расчет стоимости текущего ремонта для каждой группы автомобилей.

В процессе структурной оптимизации транспортного парка в зависимости от специфики решаемых задач дифференцируются три базовых системных состояния:

- существующая конфигурация парка обеспечивает полное покрытие транспортных потребностей, необходима оптимизация схемы использования наличного подвижного состава;
- текущая структура парка обеспечивает частичное покрытие необходимого объема перевозок, требуется оптимальное наращивание транспортного потенциала;
- отсутствие собственных транспортных мощностей при известных характеристиках доступного подвижного состава, что вызывает необходимость формализации параметров маршрутов для привлечения транспортных средств на аутсорсинговой основе.

Фундаментальными исходными параметрами при проведении структурной оптимизации автомобильного парка выступают:

- прогнозируемые транспортные объемы;
- спецификация транспортируемых грузов;
- технические характеристики подвижного состава.

Структура парка является оптимальной в случае, когда суммарные затраты имеют минимальное значение, поэтому в качестве показателя эффективности функционирования может быть использован коэффициент себестоимости транспортной работы K_c :

$$K_c = (\sum V_j p_j - \sum C_i) / \sum C_i,$$

где V_j – объем j -го транспортной работы;

p_j – стоимость j -го работ;

C_i – затраты на эксплуатацию i -й группы автомобилей.

Из уравнения следует, что при фиксированных объемах и стоимости транспортных работ затраты на эксплуатацию автомобилей существенно влияют на эффективность перевозок, поэтому оценка численных значений показателей эксплуатации осуществлялась на основе пассивного эксперимента, в ходе которого по методике [2] обрабатывались данные по наработкам на отказ, условиям и интенсивности эксплуатации грузовых автомобилей в подразделениях технологического транспорта обслуживающих предприятий единой газотранспортной системы. Сравнение осуществлялось по стандартным показателям надежности автопарков:

- интенсивность отказов, п/км;
- средняя наработка на отказ, км;
- среднее время восстановления, ч;

⁵ См. сноска 3.

⁶ Газомоторная техника КАМАЗ. URL: <https://www.truck-holding.ru/gazomotornaya-technika-kamaz/> (дата обращения: 01.10.2025).

- коэффициент технической готовности;
- структура отказов по подсистемам (топливная аппаратура, газобаллонное оборудование высокого давления, арматура/магистрали, электронные блоки управления подачей газа, дизельные форсунки и ТНВД, охлаждение и пр.).

Формирование модели себестоимости перевозок, адекватно отражающей влияние пространственного распределения заправочной инфраструктуры, представляет собой методологическую задачу по оценке динамики изменения затрат на топливное обеспечение и обслуживание парка по мере приращения наработки. Использование детерминированных и стохастических зависимостей [6] эффективно в условиях стабильной и однородной эксплуатационной среды, однако при анализе парка на газомоторном топливе на первый план выходит принципиально иной фактор – дискретная и зачастую неравномерно распределенная сеть АГНКС, которая вносит в систему ярко выраженную нелинейность и не всегда точно описывается традиционными линейными или степенными моделями. Ключевая сложность моделирования заключается в необходимости корректного описания переходной области между двумя асимптотическими режимами функционирования: экономически эффективным газодизельным режимом при наличии доступной инфраструктуры и вынужденным переходом на дизельное топливо при ее отсутствии.

Кусочно-линейная аппроксимация фиксирует наличие порога, но не отражает операционной реальности, в которой решение о смене топливного режима определяется не только структурой маршрута, но и остатком топлива, графиком работы станций и изменением параметров рабочих процессов техники по мере приращения наработки. Машинное обучение требует большого объема данных и не всегда позволяет экстраполировать результаты за пределы условий обучения из-за структуры «черного ящика» при имитационном моделировании и дальнейшем масштабировании. В этом контексте применение модели с функцией единичного скачка представляется методологически обоснованным компромиссом, поскольку, с одной стороны, сохраняет аналитическую форму, удобную для последующего анализа чувствительности и интеграции в оптимизационные алгоритмы, что соответствует требованию практической применимости, а с другой – математически воспроизводит саму суть исследуемого процесса, выраженную через плавное, а не моментальное изменение доминирующего вклада в себестоимость при изменении соотношения «пробег – расстояние до АГНКС». Важным достоинством такого подхода является его сочетаемость с устоявшимся нормативным аппаратом. Модель не заменяет, а содержательно дополняет классические компоненты – нормативы расхода топлива, функции затрат на ремонт, амортизационные отчисления.

Таким образом, для воспроизведения полученных результатов были рассчитаны показатели влияния наиболее значимых факторов, установлен закон распределения отказов газомоторных и дизельных седельных тягачей и определены параметры математической модели на смешанных эффектах с функцией единичного скачка, применение которой позволяет осуществлять имитационное моделирование состояний транспортной системы в зависимости от срока службы и частоты расположения АГНКС на протяжении маршрутов следования для определения себестоимости перевозок.

3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

Ключевым преимуществом газомоторного топлива выступает его сравнительно низкая стоимость с умеренной среднегодовой динамикой индексации стоимости кубометра газа относительно альтернативных видов топлива.

В современной практике эксплуатации грузового автотранспорта природный газ (метан CH₄) применяется в двух агрегатных состояниях при различных параметрах давления:

- компримированном (КПГ/CNG): характеризуется сжатием газа до давления 200 бар, что обеспечивает уменьшение объема в 200 раз;

- сжиженном (СПГ/LNG): достигается путем технологической переработки с охлаждением до температуры -162°C и последующим хранением в специализированных криогенных емкостях под давлением до 16 бар, что обеспечивает сокращение объема в 600 раз.

Технологическая дифференциация позволяет оптимизировать выбор типа газомоторного топлива в зависимости от специфических требований конкретного транспортного предприятия и особенностей эксплуатации автотранспортных средств. В целях достижения оптимального запаса хода газомоторной техники возникает необходимость применения дополнительного комплекса топливных баллонов для обеспечения автономности работы, сопоставимой с дизельными модификациями, что одновременно приводит к снижению полезной грузоподъемности и транспортного объема в диапазоне 8–15 %.

Данный аспект зачастую не указывается производителями при формировании коммерческих предложений потенциальным заказчикам, так как для транспортных операций, не предполагающих полного использования номинальной грузоподъемности, указанное ограничение не оказывает существенного влияния на эффективность эксплуатации. С учетом таких ограничений газомоторная техника демонстрирует значительные преимущества по ключевым экономическим показателям, включая себестоимость тонно-километра и период окупаемости, снижение которого обусловлено развитием государственных программ субсидирования, компенсирующих затраты на установку специализированного оборудования и обслуживание топливной системы. Дополнительную инвестиционную привлекательность создают низкая стоимость газового топлива, возможности расширенной комплектации и увеличения запаса хода путем монтажа дополнительных топливных емкостей. Конструктивные особенности газомоторных тягачей принципиально отличаются от традиционных дизельных аналогов наличием специализированной системы хранения метана, представленной комплексом баллонов высокого давления либо криогенными резервуарами. Однако независимо от применяемого типа газового топлива (КПГ или СПГ) и пропорций его использования совместно с дизельным топливом в двухтопливных модификациях базовая конструкция двигателя внутреннего сгорания остается неизменной.

Анализ показал, что надежность дизельных тягачей подтверждается увеличенным пробегом до капитального ремонта, высоким коэффициентом технической готовности с меньшим количеством отказов и временем восстановления (таблица 1).

Газодизельные тягачи уступают по надежности, что выражается в росте отказов на 20 % и увеличении простоев почти на 37 %. Затраты на техническое обслуживание газомоторных и дизельных комплектаций в составе парков техники транспортных подразделений газодобывающих производств отличаются в основном из-за стоимости устранения отказов топливной системы, так как

Таблица 1 Показатели надежности седельных тягачей с дизельными и газодизельными топливными системами

Table 1. Reliability indicators for truck tractors with diesel and gas-diesel fuel systems

Показатель	Дизельные тягачи	Газодизельные тягачи	Разница, %
Средний пробег до капитального ремонта, тыс. км	650	580	-10.8
Среднегодовой коэффициент технической готовности, %	0.92	0.88	-4.3
Удельное количество отказов на 10 тыс. км пробега, ед.	0.35	0.42	20
Среднее время восстановления после отказа, ч	6.5	7.4	13.8
Доля простоев в ремонте от календарного времени эксплуатации, %	5.2	7.1	36.5
Удельные эксплуатационные затраты на 1 км пробега, руб.	64	58	-9.4
Удельная экономия по топливным затратам, %	-	15	15

работа газобаллонного оборудования осуществляется при высоком давлении 200–260 бар, для чего используются дополнительные рукава высокого давления, запорная арматура, мультиклапаны, редукторы испарения, регуляторы давления и рампы дозирования, чувствительность которых к температуре и качеству газа по наличию влаги, масляного тумана и механических примесей повышает риски зависания клапанов из-за обмерзания, нарушения целостности уплотнений, роста топливных коррекций и повышения вибрационной нагрузки на элементы крепления баллонов и газовой арматуры, поэтому использование большего количества составных элементов с необходимостью применения расширенного перечня технических воздействий по настройке и регулировке способствует росту удельных затрат по мере увеличения срока службы. Проверка по критерию Пирсона показала, что распределение наработок на отказ элементов топливных систем дизельных и газодизельных автомобилей с коэффициентами вариации 0.39 и 0.48 соответствует закону Вейбулла при уровне значимости 0.05 (рис. 1).

Вместе с тем параметры сгорания метана способствуют снижению нагарообразования и частично улучшают состояние масла, что косвенно поддерживает ресурс цилиндрапоршневой группы и турбокомпрессора при правильной настройке дозирования. Это подтверждается рядом инженерных отчетов и программ [3, 9], что с учетом разницы в топливе при эксплуатации газодизельных тягачей обеспечивает снижение себестоимости пробега за счет экономии топлива на 15 % и частично компенсирует рост затрат на поддержание работоспособности, поэтому в условиях удаленных районов и высокой интенсивности эксплуатации дизельные комплектации остаются более предпочтительными, в то время как газодизельные целесообразны на маршрутах с регулярным доступом к инфраструктуре СПГ/КПГ с акцентом на топливную экономичность. Топливные резервуары для СПГ характеризуются более выгодными технико-экономическими параметрами по сравнению с системами хранения КПГ в части вместимости, массогабаритных показателей и стоимостных характеристик. Однако практическая целесообразность применения конкретного типа газомоторного топлива в значительной степени определяется доступностью соответствующей заправочной инфраструктуры. Это обусловлено существенными различиями в технологическом оснащении АГНКС, так как для КПГ требуется специализированное компрессорное оборудование, обеспечивающее превышение рабочего давления по сравнению с СПГ в 10 и более раз, а для СПГ необходимы криогенные заправочные комплексы с дорогостоящими системами регазификации и специфическими заправочными модулями. В связи с этим АГНКС редко интегрируют обе технологии из-за значительных различий в процессах производства, хранения и транспортировки различных типов газового топлива. Инфраструктура АГНКС характеризуется неравномерным территориальным распределением с преимущественной концентрацией в центральных регионах Российской Федерации. При этом наблюдается существенная дифференциация в доступности для транспортных средств, использующих КПГ и СПГ. Данная особенность создает определенные ограничения для эффективной эксплуатации газомоторной техники, особенно при осуществлении грузоперевозок на дальние дистанции по маршрутам с низкой транспортной активностью и в регионах с недостаточным уровнем газификации.

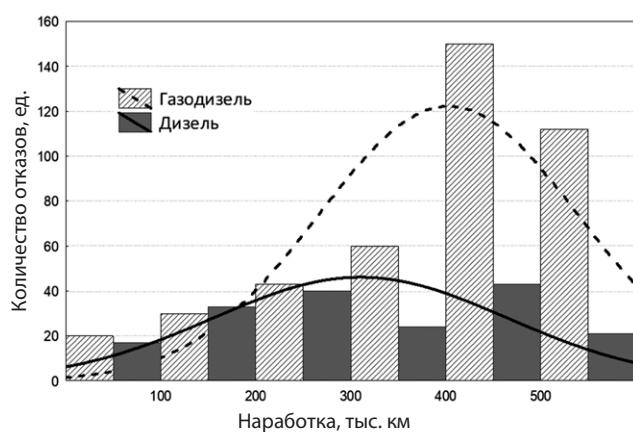


Рис. 1. Сравнение наработок на отказ седельных тягачей КАМАЗ с различными топливными системами (график составлен авторами)

Fig. 1. Comparison of the failure rate of KAMAZ truck tractors with different fuel systems (graph constructed by the authors)

Для оценки целесообразности применения стандартных газодизельных комплектаций автомобилей в условиях, когда удаленность между заправочными станциями превышает средний запас хода на газомоторном топливе 500 км, задача сводится к корректному математическому описанию плавного перехода между этими режимами, а не простого усреднения. В таких случаях может быть использована модель на смешанных эффектах с функцией единичного скачка, применение которой позволяет оценить величину изменения топливных затрат при переходе в дизельный режим на участках с недостаточной частотой расположения АГНКС:

$$C_{km}(T, L) = \frac{y_1(T) \cdot L}{1 + e^{-i2k(S-L)}} + \frac{y_2(T) \cdot L + y_1(T) \cdot S - y_2(T) \cdot S}{1 + e^{-i2k(L-S)}},$$

где C – себестоимость перевозки, руб./т-км;

T – срок службы, лет;

L – пробег, км;

$y_{1,2}$ – модель изменения себестоимости транспортной работы для газодизельной и дизельной комплектации тягача, руб./т-км;

S – расстояние между АГНКС, км;

K – поправочный коэффициент.

Уравнение показывает, что при переходе на газомоторное топливо возникает принципиально новая нелинейная зависимость, где себестоимость тонно-километра становится функцией не только пробега и срока службы, но и соотношения между протяженностью маршрута L и расстоянием до ближайшей АГНКС S . Система ведет себя по-разному в двух асимптотических режимах: при избытке инфраструктуры $S < L$ и при ее дефиците $S > L$. Коэффициент K при этом выполняет роль калибруемой константы, которая может быть оценена на основе данных телематического мониторинга ГЛОНАСС и отражает фактическую степень интенсивности логистического порога в конкретных региональных условиях. Это позволяет имитировать изменение себестоимости перевозок в зависимости от расстояния между АГНКС S и пробега L для планирования точек заправки и распределения участков маршрута между топливными режимами для минимизации суммарной стоимости тонно-километра. Оптимизация маршрутов позволяет повысить коэффициент использования парка за счет снижения количества простоев, связанных с ожиданием заправки или ремонтом при рациональном распределении техники между задачами.

Структура модели $y_i(T)$ отражает затраты на топливо и расходы на обеспечение работоспособности, состоящие из амортизационных отчислений, стоимости текущего ремонта и операционных затрат:

$$y_i(T) = C_j^{Fuel} + \frac{C_j^a}{T} + C_R(T) + C_{op},$$

где C_j^{Fuel} – топливные затраты, руб./т-км;

C_j^a – амортизационные отчисления, руб./т-км;

$C_R(T)$ – модель стоимости текущего ремонта, руб./т-км;

C_{op} – постоянные затраты для операционной деятельности (ТО, шины, зарплата водителя и пр.), руб./т-км.

Значения параметров зависят от конкретной стратегии обновления парка, графика ТО, условий лизинга, средней загрузки и доли порожних пробегов. Для автопоездов с большей фактической полезной нагрузкой себестоимость на тонно-километр еще ниже. Коэффициент K корректируется по действующей карте и зависит от плотности расположения газозаправочной инфраструктуры, поэтому

му чем больше АГНКС на маршруте, тем сильнее сглажен переход в дизельный режим и меньше значения K .

В качестве исходных данных в расчетах использовалась информация о стоимости дизельного топлива – 71.49 руб./л (среднее по РФ на 11 августа 2025 г.) в сравнении с КПГ (CNG) на АГНКС «Газпром» 27.06 руб./ m^3 (с 1 августа 2025 г.; динамика за месяц – 0.83 руб.). Расчетные нормы расхода для дизельных комплектаций КАМАЗ-5490 при движении по шоссе на скорости 80–85 км/ч составляют 29–30 л/100 км, в то время как при двойном питании на газодизельных комплектациях типовой режим подмешивания, близкий к практикам dual-fuel, составляет 15.5 л дизельного топлива и 14 m^3 КПГ на 100 км либо 40 л/100 км при движении исключительно на КПГ. Полезная нагрузка для обеих комплектаций составляет 20 т, но у газодизельных версий фактические значения ниже на 8–15 %, что обусловлено дополнительной массой топливного газового оборудования, а именно количеством, емкостью и конструкцией баллонов. Значения поправочного коэффициента K в расчетах принимаются 0.02, что отражает среднюю плотность расположения АГНКС на участке следования (рис. 2).

Предложенная модель является закономерным развитием классических методов технико-экономического анализа применительно к новому классу задач, обусловленных технологическим переходом на альтернативные виды топлива. Кроме того, она позволяет преодолеть ограничения традиционных моделей в описании систем с пространственно-дискретными ресурсами как инструмент для обоснования управлеченческих решений по оптимизации структуры парка в условиях неоднородной инфраструктурной обеспеченности и комплексной оценки себестоимости транспортных операций с учетом динамики эксплуатационных затрат. В частности, модель учитывает прогрессирующий рост расходов на устранение технических неисправностей и экономические потери, связанные с вынужденными простоями, которые увеличиваются пропорционально сроку эксплуатации седельных тягачей. Оценка адекватности полученной модели осуществлялась по дисперсионному отношению Фишера и средней ошибке аппроксимации на основе данных путевых листов, заказ-нарядов на ТО и фактической бухгалтерской отчетности, для исследуемых процессов значения вероятности составили 0.95 и 12 % соответственно. В ходе моделирования были получены значимые данные, демонстрирующие экономическую эффективность использования газодизельных транспортных средств при соблюдении определенных эксплуатационных условий. Максимальная рентабельность достигается на маршрутах, где расстояние между доступными АГНКС не превышает 500 км, а степень загрузки транспортного средства, выраженная через коэффициент использования грузоподъемности, находится в пределах от 0.73 до 0.85. При соблюдении этих параметров наблюдается существенное снижение транспортных издержек – экономический эффект выражается в уменьшении стоимости перевозки 1 т·км на 18 %. Такое сокращение затрат обеспечивается благодаря оптимальному балансу между эксплуатационными характеристиками газодизельных систем и логистической доступностью заправочной инфраструктуры. Если стоимость КПГ опускается до 25–26 руб./ m^3 по акциям EcoGas или региональным программам, экономия растет на 2–3 % по топливной части. При росте стоимости дизельного топлива выше 72–75 руб./л себестоимость дорожает линейно и при шаге 1 руб./л добавляет 0.0043 руб./т·км.



Рис. 2. Зависимость стоимости эксплуатации газодизельных седельных тягачей от срока службы и частоты расположения АГНКС (график составлен авторами)

Fig. 2. Dependence of truck tractors operating cost on the service life and frequency of the CNG stations location (graph constructed by the authors)

4. Заключение / Conclusions

Таким образом, на структуру парка влияет множество факторов, к наиболее значимым относят параметры транспортной работы, себестоимость перевозок и надежность. Применение технологического транспорта на газомоторном топливе является одним из наиболее перспективных направлений совершенствования деятельности транспортных подразделений и стратегически важным для энергетического суверенитета страны по критериям экономичности, экологичности и безопасности. Вместе с тем эффективность эксплуатации газомоторных комплектаций существенно зависит от срока службы, качества технического обслуживания топливных систем и степени развитости газозаправочной инфраструктуры в регионах присутствия, что требует внесения дополнительных корректировок для учета частоты расположения АГНКС на пути следования при формировании логистических маршрутов и обязательного дооснащения производственно-технических баз транспортных подразделений специальным оборудованием с проведением дополнительной подготовки обслуживающего персонала. Срок окупаемости затрат на приобретение более дорогих комплектаций грузовых автомобилей на газомоторном топливе в сравнении с аналогами на традиционном топливе сокращается за счет субсидий со стороны государства и низкой стоимости газа (в 2 и более раз). При неполном использовании грузоподъемности это позволяет существенно повысить эффективность транспортного обеспечения технологических процессов по обслуживанию магистральных газопроводов. В ценах августа 2025 г. на территории Российской Федерации топливные затраты для дизельных комплектаций составляют 1.07 руб./т·км. против 0.8 руб./т·км у газодизельных в топливной компоненте, что с учетом разницы в коэффициенте использования полезной массы превышает 25 %. Другим значимым критерием является срок службы, который существенно влияет на себестоимость перевозок в диапазоне от 3 до 7 лет, что ведет к росту на 7–9 % и при недостаточной частоте расположения АГНКС на протяженных маршрутах следования вызывает необходимость применения дизельных комплектаций. При $S < L$ применение стандартных газодизельных комплектаций экономически оправдано даже при умеренной плотности АГНКС. Исследования показали, что при соблюдении предложенных ограничений по длине ездки и сроку службы себестоимость 1 т·км двухтопливных газомоторных комплектаций седельных тягачей может быть снижена на 18 %, поэтому полученные результаты могут быть использованы для оптимизации структуры парка и повышения экономических показателей эксплуатации автомобилей в транспортных подразделениях газодобывающих производств.

Результаты демонстрируют как значительную сходимость с выводами предшественников в общих тенденциях, так и уточняющий частный вклад в конкретных условиях. Выводы о снижении себестоимости 1 т·км коррелируют с результатами большинства отечественных и зарубежных исследований, где последовательно подтверждается, что основной экономический эффект газомоторной техники формируется за счет более низкой стоимости метана относительно дизельного топлива при условии интенсивной эксплуатации. Выявленное в работе снижение показателей надежности газодизельных тягачей согласуется с исследованиями, посвященными особенностям эксплуатации газобаллонного оборудования, что не противоречит общему тезису о повышенной сложности, но переводит предмет изучения из качественной в количественную плоскость и является развитием идей, заложенных в более ранних работах.

Акцент на критической важности развитости сети АГНКС для экономической эффективности газомоторного парка является общим местом. Принципиальная новизна и меньшая степень прямой сходимости полученных результатов заключается в том, что этот фактор не просто констатируется, а становится ядром формализованной экономико-математической модели, которая позволяет не только констатировать проблему «больших плеч», но и количественно оценить пороговое значение с расчетом себестоимости для смоделированного распределения АГНКС. Таким образом,

результат не опровергает предыдущие исследования, а предоставляет инструмент для проверки и применения теоретических выводов на практике. Классические методики формирования парков и современные методы удаленного мониторинга могут быть дополнены полученными результатами в части практического использования. Если традиционные подходы позволяют рассчитывать необходимое количество техники по характеристикам и производительности, то представленная модель ориентирована на решение задач по оптимизации соотношения дизельной и газовой техники с учетом карты АГНКС и графиков поставок, так как игнорирование этого аспекта может нивелировать топливную экономию на предприятиях и снизить ресурс наиболее уязвимых агрегатов топливной аппаратуры за счет увеличения доли работы в нештатных режимах, что согласуется с концепциями ресурсного обеспечения, поэтому результаты не противоречат ранее установленным закономерностям, а развивают предметную область на основе аналитических инструментов для адресной масштабируемой и количественно обоснованной оптимизации структуры парка.



Вклад авторов. Авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Author contribution. All authors contributed equally to preparing the publication.

Конфликт интересов. Захаров Н. С. является членом редакционной коллегии журнала «Архитектура, строительство, транспорт» с 2021 года. Он не принимал участия в принятии решения о публикации статьи, рукопись прошла стандартную процедуру рецензирования, предусмотренную редакционной политикой журнала. Авторам неизвестно о других конфликтах интересов.

Conflict of interest. Nikolay S. Zakharov has been a member of the editorial board of the journal "Architecture, Construction, Transport" since 2021. He did not participate in the decision-making process regarding the publication of this article. The manuscript underwent the standard peer-review procedure in accordance with the journal's editorial policy. The authors declare no other conflicts of interest.

Список литературы

1. Захаров Н. С. *Моделирование процессов изменения качества автомобилей*. Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет; 1999. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21266500>
2. Захаров Н. С., Сапоженков Н. О. Моделирование процессов формирования уровня заряженности автомобильных аккумуляторных батарей в зимний период. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2016;(3):232–237.
3. Запорожец А. В., Банкет М. В. Современные проблемы эксплуатации газобаллонных автомобилей, работающих на компримированном природном газе. *Грузовик*. 2023;(10):35–39. <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2023-10-35-39>
4. Бабицкий Б. И. Факторы, сдерживающие развитие рынка СПГ в России. *Инновационная наука*. 2023;(11-2):73–77.
5. Захаров Н. С., Новоселов О. А., Ракитин В. А. Методика сравнительной оценки потребительских свойств автомобилей. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2014;(6):158–160. URL: <https://ntvprt.ru/ru/archive-vyuruskov>
6. Кузнецов Е. С. *Управление технической эксплуатацией автомобилей*. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Транспорт; 1990.
7. Шкред Л. Я., Иванов А. В. Об экономической целесообразности использования газодизельных грузовых АТС. *Автомобильная промышленность*. 2014;(1):1–3.
8. Гордеев Д. С., Томаев А. О. Сценарный анализ перспектив применения альтернативных видов топлива в автомобильном транспорте в России. *Мир транспорта*. 2023;21(4):88–98. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-10>
9. Арыстанбаев Т. С., Аширов А. С., Тохтаров Е. К. Перспективы использования природного газа в качестве моторного топлива. *Транспорт на альтернативном топливе*. 2021;(S1):62–73.

10. Уразметова Л. Р. Показатели оценки развития рынка газомоторного топлива Российской Федерации. *Промышленность: экономика, управление, технологии*. 2023;2(3):47–59.
11. Макарова А. Н. *Методика оперативного корректирования нормативов периодичности технического обслуживания с учетом фактических условий эксплуатации автомобилей: автореферат диссертации кандидата технических наук*. Оренбург: Оренбургский государственный университет; 2016. 16 с.
12. Фурман В. В., Марков В. А., Плахов С. В. Использование газомоторного топлива в автомобильных газодизелях. *Автомобильная промышленность*. 2023;(3)19–24.
13. Дубов Г. М., Яцевич М. Ю., Бороненков Д. А., Якобсон Д. М. Опыт использования сжиженного природного газа как газомоторного топлива на технологическом транспорте. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(3):73–81. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-73-81>
14. Хатьков В. Ю. Состояние рынка производства и использования газомоторного топлива. *Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права*. 2022;(3):182–194. <https://doi.org/10.21295/2223-5639-2022-3-182-194>
15. Старцев А. В., Сторожев И. И., Цихалевский И. С., Мишин Я. А., Шарапов А. Т. Теоретические предпосылки перевода тягового подвижного состава на газомоторное топливо. *Транспорт Урала*. 2023;(3):75–78. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-3-75-78>
16. Каменский Д. И., Шрам В. Г. Математическая модель использования сжиженного нефтяного газа в качестве газомоторного топлива. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023;(3):416–420.
17. Hall C., Kassa M. Advances in combustion control for natural gas–diesel dual fuel compression ignition engines in automotive applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;148:111291. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111291>
18. Rotaru S., Pana C., Negurescu N., Cernat A., Fuiorescu D., Nutu Cr. Experimental investigations of an automotive diesel engine fuelled with natural gas in dual fuel mode. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;997:012130. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/997/1/012130>
19. Thipse S. Advancing Sustainable and Intelligent Mobility: Integrating Machine Learning, Alternative Fuels and Innovative Technologies. *ARAI Journal of Mobility Technology*. 2025;5. <https://doi.org/10.37285/ajmt.5.4.0>
20. Дубов Г. М., Яцевич М. Ю., Якобсон Д. М., Бороненков Д. А. Особенности и перспективы использования сжиженного природного газа как газомоторного топлива на автотранспорте. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(2):41–52. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-2-41-48>

References

1. Zakharov N. S. *Simulation of processes of change in quality cars*. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University; 1999. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21266500>
2. Zakharov N. S., Sapozhenkov N. O. Modelling of formation car batteries level of charge in winter. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2016;(3):232–237. (In Russ.)
3. Zaporozhets A. V., Banket M. V. Modern problems of operation of gas-cylinder cars running on compressed natural gas. *Gruzovik*. 2023;(10):35–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2023-10-35-39>
4. Babitskiy B. I. Factors hindering the development of the LNG market in Russia. *Innovation Science*. 2023;(11-2):73–77. (In Russ.)
5. Zakharov N. S., Novoselov O. A., Rakitin V. A. A method of a comparative assessment of cars consumer properties. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. (In Russ.) 2014;(6):158–160. URL: <https://ntvprt.ru/ru/archive-vypuskov>
6. Kuznetsov Ye. S. *Management of technical operation of vehicles*. 2nd edition, revised. Moscow: Transport; 1990. (In Russ.)
7. Shkret L. Ya., Ivanov A. V. On the economic feasibility of using gas-diesel freight vehicles. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2014;(1):1–3. (In Russ.)
8. Gordeev D.S., Tomaev A.O. Scenario Analysis of the Prospects for the Use of Alternative Fuels for Road Transport in Russia. *World of Transport and Transportation*. 2023;21(4):88–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-10>
9. Arystanbayev T. S., Ashirov A. S., Tokhtarov Ye. K. Prospects for using natural gas as a motor fuel. *Transport na al'ternativnom toplive*. 2021;(S1):62–73. (In Russ.)

10. Urazmetova L. R. Indicators for assessing the development of the Russian gas engine fuel market. *Industry: Economics, Management, Technology*. 2023;2(3):47–59. (In Russ.)
11. Makarova A. N. *Methodology for promptly adjusting maintenance interval standards based on actual vehicle operating conditions: Abstract of a candidate's dissertation*. Orenburg: Orenburg State University; 2016. 16 p. (In Russ.)
12. Furman V. V., Markov V. A., Plakhov S. V. Use of gas motor fuel in automobile gas diesel engines. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2023;(3)19–24. (In Russ.)
13. Dubov G. M., Yatsevich M. Y., Boronenkov D. A., Yakobson D. M. Experience in the use of liquefied natural gas as a gas motor fuel in technological transport. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;(3):73–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.56195/207933322025-25-3-73-81>
14. Khatkov V. Yu. State of the market for the production and use of natural gaz motor fuel. *Herald of the Belgorod University of Cooperation, Economics and Law*. 2022;(3):182–194. (In Russ.) <https://doi.org/10.21295/2223-5639-2022-3-182-194>
15. Startsev A. V., Storozhev I. I., Tsikhalevskiy I. S., Mishin Ya. A., Sharapov A. T. Theoretical background of the transfer of traction rolling stock to gas engine fuel. *Transport of the Urals*. (In Russ.) 2023;(3):75–78. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-3-75-78>
16. Kamensky D. I., Shram V. G. Mathematical model of the use of liquefied petroleum gas as a gas engine fuel. *Izvestiya Tula State University*. 2023;(3):416–420.
17. Hall C., Kassa M. Advances in combustion control for natural gas–diesel dual fuel compression ignition engines in automotive applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;148:111291. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111291>
18. Rotaru S., Pana C., Negurescu N., Cernat A., Fuiorescu D., Nutu Cr. Experimental investigations of an automotive diesel engine fuelled with natural gas in dual fuel mode. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;997:012130. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/997/1/012130>
19. Thipse S. Advancing Sustainable and Intelligent Mobility: Integrating Machine Learning, Alternative Fuels and Innovative Technologies. *ARAI Journal of Mobility Technology*. 2025;5. <https://doi.org/10.37285/ajmt.5.4.0>
20. Dubov G. M., Yatsevich M. Yu., Yakobson D. M., Boronenkov D. A. Peculiarities and prospects for the use of liquefied natural gas as a gas motor fuel in motor vehicles. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(2):41–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/207933322025-25-2-41-48>



Информация об авторах

Захаров Николай Степанович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры сервиса автомобилей и технологических машин, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, zakharovns@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8415-0505>

Сапоженков Николай Олегович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры сервиса автомобилей и технологических машин, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, sapozhenkovno@tyuiu.ru

Ракитин Владимир Александрович, соискатель кафедры сервиса автомобилей и технологических машин, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, rakitinva@mail.ru

Information about the authors

Nikolay S. Zakharov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Automotive Service and Technological Machinery, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, zakharovns@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8415-0505>

Nikolay O. Sapozhenkov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Automotive Service and Technological Machinery, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, sapozhenkovno@tyuiu.ru

Vladimir A. Rakitin, Applicant in the Department of Automotive Service and Technological Machinery, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, rakitinva@mail.ru

Получена 20 января 2025 г., одобрена 05 декабря 2025 г., принята к публикации 10 декабря 2025 г.

Received 20 January 2025, Approved 05 December 2025, Accepted for publication 10 December 2025