

Научная статья
УДК 621.436

<https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-6-109>

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ СЕРЫ В ДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ НА БЕЗОТКАЗНОСТЬ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ В ГАРАНТИЙНЫЙ ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ

М. Ф. Тетерин

Научно-технический центр ПАО «КАМАЗ», Набережные Челны, Россия
e-mail: Maksim.Teterin@kamaz.ru

Р. Ф. Калимуллин

Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия
e-mail: rkalimullin@mail.ru

А. Т. Кулаков

Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия
e-mail: alttrak09@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена решению актуальной научно-практической задачи количественной оценки фактического состояния качества дизельного топлива в Российской Федерации и его влияния на эксплуатационную надежность автомобильной техники.

Основной целью научного исследования является повышение эффективности эксплуатации грузовых автомобилей с высокотехнологичными дизелями за счет полноценного обеспечения их качественным топливом.

Решением частной задачи в рамках настоящей статьи является получение модели влияния повышенного содержания серы в дизельном топливе на эксплуатационную надежность топливной аппаратуры автомобильного двигателя.

В статье проведен анализ эволюции 8-цилиндровых V-образных автомобильных дизельных двигателей КАМАЗ с 1976 г. по настоящее время, который показал взаимосвязь между технологическим совершенством двигателя, его ресурсом и экологическими свойствами, группой эксплуатации применяемого моторного масла и сроком его смены, содержанием серы в дизельном топливе.

На основе данных по мониторингу показателей качества дизельного топлива, используемого в ходе испытаний и эксплуатации автомобилей КАМАЗ, за период с 2003 по 2023 год, установлено, что наибольшее число отклонений зафиксировано по показателю «содержание серы». Так же установлено, что доля дизельного топлива уровня Евро-5 с содержанием серы до 10 ppm составляет не менее 80%, начиная с 2019 года и по настоящее время. Тем не менее, в эксплуатации продолжает присутствовать некачественное топливо, не соответствующее требованиям нормативных документов.

Используя анализ литературных источников, авторы показали существенное влияние содержания серы в топливе на ресурс моторного масла, надежность двигателя, его механизмов и систем, в том числе топливной аппаратуры.

На основе анализа многолетних статистических данных показателей качества дизельного топлива и дефектов топливной аппаратуры двигателей КАМАЗ построена линейная модель влияния повышенного содержания серы (более 350 ppm) на безотказность топливной аппаратуры в гарантийный период эксплуатации.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что в эксплуатации выявлены закономерности изменения по календарным годам доли дизельного топлива с повышенным содержанием серы (более 350 ppm) и доли дефектов топливной аппаратуры двигателей КАМАЗ, что позволило установить между данными показателями прямую корреляционную зависимость с конкретными параметрами.

Теоретическая ценность для развития научной специальности «Эксплуатация автомобильного транспорта» заключается в том, что выявленные закономерности вносят вклад в изучение влияния показателей качества одного из автомобильного эксплуатационного материала – дизельного топлива, на безотказность топливной аппаратуры автомобильных двигателей.

Направлением дальнейших научных изысканий является совершенствование процессов контроля показателей качества дизельного топлива, что будет способствовать повышению эксплуатационной надежности топливной аппаратуры автомобильных двигателей.

Ключевые слова: дизельное топливо, содержание серы, пробы топлива, мониторинг, показатели качества, суррогатное топливо, дефекты, топливная аппаратура.

Для цитирования: Тетерин М. Ф., Калимуллин Р. Ф., Кулаков А. Т. Влияние содержания серы в дизельном топливе на безотказность топливной аппаратуры автомобильного двигателя в гарантийный период эксплуатации // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2024. – № 6. – С. 109–121. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-6-109>.

Original article

THE EFFECT OF SULFUR CONTENT IN DIESEL FUEL ON THE RELIABILITY OF FUEL EQUIPMENT OF AN AUTOMOBILE ENGINE DURING THE WARRANTY PERIOD OF OPERATION

M. F. Teterin

Scientific and Technical Center of PJSC KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russia
e-mail: Maksim.Teterin@kamaz.ru

R. F. Kalimullin

Naberezhnye Chelny Institute (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Kazan (Volga region) Federal University», Naberezhnye Chelny, Russia
e-mail: rkalimullin@mail.ru

A. T. Kulakov

Naberezhnye Chelny Institute (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Kazan (Volga region) Federal University», Naberezhnye Chelny, Russia
e-mail: altrak09@mail.ru

Abstract. The article is devoted to solving an urgent scientific and practical problem of quantifying the actual state of diesel fuel quality in the Russian Federation and its impact on the operational reliability of automotive equipment.

The main purpose of the scientific research is to increase the efficiency of operation of trucks with high-tech diesels by fully providing them with high-quality fuel.

The solution to a particular problem in the framework of this article is to obtain a model of the effect of increased sulfur content in diesel fuel on the operational reliability of the fuel equipment of an automobile engine.

The article analyzes the evolution of KAMAZ 8-cylinder V-shaped automobile diesel engines from 1976 to the present, which showed the relationship between the technological perfection of the engine, its resource and environmental properties, the operating group of the engine oil used and its change period, the sulfur content in diesel fuel.

Based on data on monitoring the quality indicators of diesel fuel used during testing and operation of KAMAZ vehicles for the period from 2003 to 2023, it was found that the largest number of deviations was recorded in the indicator «sulfur content». It has also been established that the share of Euro-5 diesel fuel with a sulfur content of up to 10 ppm is at least 80%, starting in 2019 and up to the present. Nevertheless, low-quality fuel continues to be present in operation, which does not meet the requirements of regulatory documents.

Using the analysis of literary sources, the authors showed a significant effect of the sulfur content in fuel on the life of engine oil, the reliability of the engine, its mechanisms and systems, including fuel equipment.

Based on the analysis of long-term statistical data on diesel fuel quality indicators and defects in the fuel equipment of KAMAZ engines, a linear model of the effect of increased sulfur content (more than 350 ppm) on the reliability of fuel equipment during the warranty period of operation is built.

The scientific novelty of the results obtained lies in the fact that in operation patterns of changes in the proportion of diesel fuel with a high sulfur content (more than 350 ppm) and the proportion of defects in the fuel equipment of KAMAZ engines were revealed, which made it possible to establish a direct correlation between these indicators with specific parameters.

The theoretical value for the development of the scientific specialty «Operation of motor transport» lies in the fact that the revealed patterns contribute to the study of the influence of quality indicators of one of the automotive operational materials – diesel fuel, on the reliability of fuel equipment of automobile engines.

The direction of further scientific research is to improve the processes of quality control of diesel fuel, which will contribute to improving the operational reliability of fuel equipment for automotive engines.

Key words: diesel fuel, sulfur content, fuel samples, monitoring, quality indicators, surrogate fuel, defects, fuel equipment.

Cite as: Teterin, M. F., Kalimullin, R. F., Kulakov, A. T. (2024) [The effect of sulfur content in diesel fuel on the reliability of fuel equipment of an automobile engine during the warranty period of operation]. *Intellect. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 6, pp. 109–121. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-6-109>.

Введение

Очевидно, что для обеспечения требуемого уровня эксплуатационной надежности автомобильной техники необходимо следовать рекомендациям завода-изготовителя в части применяемых моторных топлив. Основные показатели качества автомобильного дизельного топлива (ДТ) в Российской Федерации регламентируются техническим регламентом Таможенного Союза ТР ТС 013/2011 «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту» и государственным стандартом ГОСТ 32511–2013 «Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия». Эксплуатационные свойства ДТ характеризуют следующие показатели: цетановое число (цетановый индекс); фракционный состав; вязкость и плотность; степень чистоты; температура вспышки; содержание сернистых соединений, непредельных углеводородов и металлов; содержание ароматических углеводородов; низкотемпературные свойства; смазывающие свойства¹. Отклонение фактических показателей ДТ от нормативных требований может привести к существенному ухудшению технико-эксплуатационных и экологических показателей двигателя, а также снижению его надежности и выходу из строя [6].

Статья посвящена решению актуальной научно-практической задачи количественной оценки фактического состояния качества ДТ в Российской Федерации и его влияния на эксплуатационную надежность топливной аппаратуры дизельных двигателей.

Основной целью научного исследования является повышение эффективности эксплуатации грузовых автомобилей с высокотехнологичными дизелями за счет полноценного обеспечения их качественным топливом.

Решением частной задачи в рамках настоящей статьи является получение модели влияния повышенного содержания серы в ДТ на безотказность топливной аппаратуры автомобильного двигателя в гарантийный период эксплуатации.

Эволюция применяемости дизельного топлива в автомобильных двигателях

Рассмотрим эволюцию применяемости ДТ в автомобильных дизелях на примере 8-цилиндровых V-образных двигателей марки КАМАЗ. В таблице 1 приведены этапы развития таких двигателей КАМАЗ с 1976 года по настоящее время [12]. Условными критериями разделения на этапы является факт появления в производстве двигателя более высокого экологического класса, либо имеющего лучшие удельно-эффективные показатели и показатели топливной экономичности по отношению к имеющемуся в производстве.

Из таблицы 1 следует, что:

– по мере развития двигателей происходил переход на ДТ с меньшим содержанием серы. Так в 1976 году применялось ДТ с содержанием серы до 5000 ppm или 0,5%. В дальнейшем применялось ДТ с содержанием серы до уровней 2000, 500, 350, 50 и 10 ppm. Исключение составляет переход в 1996 году на выпуск двигателей уровня Евро–1, когда было продолжено применение ДТ с содержанием серы до 2000 ppm. С 2012 года по настоящее время применяется ДТ с содержанием серы до 10 ppm;

– снижение допустимого уровня содержания серы в ДТ играет ключевую роль в обеспечении требуемых экологических стандартов Евро. Поэтапное ужесточение требований к содержанию серы в ДТ было продиктовано выпуском двигателей требуемого экологического класса, а также действием нормативных документов (ГОСТ 305-82, ТР ТС 013/2011 и ГОСТ 32511-2013). Уровень соответствия двигателей КАМАЗ экологическим стандартам вырос до Евро-5, начиная с 2012 года, за счет применения топлива Евро с содержанием серы до 10 ppm, а также следующих решений: системы питания типа Common Rail, охлаждения наддувочного воздуха (ОНВ), системы селективной каталитической нейтрализации SCR с применением реагента AdBlue;

– применение малосернистого топлива (умень-

¹ Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справочник / И. Г. Анисимов [и др.]; Под ред. В. М. Школьников. Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Техинформ», 1999. – 596 с.

шение содержания в 500 раз с 5000 ppm до 10 ppm), наряду с моторными маслами более высоких групп эксплуатации (переход с группы СС до группы СІ-4

по АРІ), обеспечил для двигателей КАМАЗ увеличение межсервисного интервала более чем в 6 раз – с 8000 км до 50000 км.

Таблица 1. Этапы развития двигателей КАМАЗ

Этапы / годы	1 1976–1983	2 1983–1996	3 1996–1998	4 1998–2004	5 2004–2008	6 2008–2012	7 2012–по н.в.
Модели	740.10, 740.10–200	7403.10–260	740.11–240, 740.13–260	740.31–240, 740.30–260, 740.50–360 740.51–320 и др.	740.60–360, 740.61–320, 740.62–280, 740.63–400 и др.	740.70–280, 740.71–320, 740.72–360, 740.73–400, 740.74–420, 740.75–440 и др.	740.705–300, 740.715–320, 740.725–360, 740.735–400, 740.755–440 и др.
Система питания	механ. ТНВД	механ. ТНВД, с наддувом	механ. ТНВД, с наддувом	механ. ТНВД, с наддувом, с ОНВ	электр. ТНВД, с наддувом, с ОНВ	типа Common Rail, с наддувом, с ОНВ	типа Common Rail, с наддувом, с ОНВ
Номинальная мощность (диапазон), л.с.	210–220	260	240–260	240–360	280–400	280–440	300–440
Номинальная частота, мин ⁻¹	2600	2600	2200	2200	1900	1900	1900
Минимальный удельный расход топлива, г/(л.с.·ч.)	155	155	152–155	152	152	143	140
Литровая мощность, л.с./л	19,35–20,28	23,96	22,12–23,96	20,41–30,61	23,81–34,01	23,81–37,41	25,51–37,41
Ресурс, тыс. км (в составе магистральных автомобилей)	до 200–400	до 400	до 800	до 800	до 800	до 1000	до 1000
Расход масла на угар, не более % от расхода топлива	0,8–0,6	0,5	0,3	0,2	0,1	0,06	0,06
Группы эксплуатации моторных масел	СС, CD по АРІ	CF–4 по АРІ	CF–4 по АРІ	CF–4, CG–4, CH–4, CI–4 по АРІ	CH–4, CI–4 по АРІ	CH–4, CI–4 по АРІ	СІ–4, СJ–4 по АРІ, не ниже E7 по ACEA
Интервал замены масла (для I категории условий эксплуатации), км	до 8000	до 12000	до 16000	до 16000– 30000	до 30000	до 30000– 50000	до 50000
Объём заправляемого масла, л.	26–28	28–32	28–32	28–32	28–32	33–36	33–36
Удельный объём масла, л/л.с.	0,118–0,133	0,108–0,123	0,108–0,133	0,078–0,133	0,070–0,114	0,075–0,129	0,075–0,110
Норматив применяемого топлива	ГОСТ 305–73	ГОСТ 305–82	ГОСТ 305–82	ГОСТ 305–82	ГОСТ P52376– 2005	ГОСТ P52376– 2005	ГОСТ 32511–2013
Экологический класс	–	Евро–0	Евро–1	Евро–2	Евро–3	Евро–4	Евро–5
Содержание серы в дизельном топливе, ppm	до 5000 до 2000	до 2000	до 2000	до 500	до 350	до 50	до 10

Источник: доработано авторами на основе работы [12]

Таким образом, эволюция требований к качеству ДТ тесно связана с совершенствованием дизельных двигателей, их систем питания, нейтрализации, смазки и т.д. Переход на применение малосернистых ДТ позволил не только удовлетворить экологические нормы, но значительно увеличить ресурс и периодичность смены моторного масла и, тем самым, расширить периодичность технического обслуживания двигателя. Это существенно улучшило эксплуатационные свойства и потребительские качества автомобиля в целом.

В настоящее время в Российской Федерации для современных грузовых автомобилей обязательно к применению ДТ исключительно экологического класса Евро-5 с содержанием серы менее 10 ppm (0,001 % или 10 мг/кг) по ГОСТ 32511-2013.

Несмотря на то, что завод-изготовитель ПАО «КАМАЗ» рекомендует применять в двигателях исключительно автомобильное ДТ (по ТР ТС 013/2011, ГОСТ 305-73, ГОСТ 305-82 или ГОСТ 32511-2013 в соответствующие периоды времени), в сфере эксплуатации автомобилей всегда присутствовало некачественное топливо. Под этим термином понимается топливо, не соответствующее нормативам и экологическому классу. К ним относятся:

- автомобильные ДТ, в целом соответствующие требованиям нормативных документов, но экологических классов К4 и ниже;

- суррогатные топлива – специальные нефтепродукты (светлое печное топливо, судовое маловязкое топливо, дистиллят газового конденсата, легкий вакуумный газойль, топливо селективной очистки, технологическая фракция дизельного топлива), изготовленные по собственным нормативным документам, которые могут быть использованы как заменители автомобильного ДТ;

- фальсифицированные топлива – нефтепродукты, не в полной мере соответствующие нормативным требованиям (как правило, по содержанию серы), полученные путем смешения автомобильного ДТ экологического класса К5 с аналогичным топливом, но ниже классом, либо с суррогатным топливом.

Проблема некачественных ДТ в России актуальна достаточно длительное время [2; 3; 7; 11]. Такие топлива, по разным оценкам, составляют до 25% от объема рынка, при этом на них спрос остается стабильным². Анализ зарубежной литературы показывает, что проблема несоответствия ДТ требованиям нормативной документации присутствует и в Евросоюзе [9;

19]. Так, по информации ежегодного отчета по мониторингу качества топлива в Европе в 2019 году было отмечено, что 1,2% проб ДТ имеют несоответствие по ряду показателей [19]. При этом, ряд крупных исследовательских компаний предлагают комплекс услуг по мониторингу качества любого вида топлив для компаний, производящих топлива, их реализующие либо использующие. В качестве примера можно привести компанию Intertec.

Известно, что эксплуатационные качества ДТ оказывают существенное влияние на надежность двигателя, его механизмов и систем, ресурс масла [6; 12], в свою очередь, снижение эксплуатационной надежности двигателя и автомобиля в целом ведет к увеличению себестоимости перевозок [17]. Применение некачественного ДТ ведет к повышенному образованию лаковых отложений, нагара и быстрому износу деталей, что может быть причиной целого ряда отказов: выход из строя элементов топливной аппаратуры (ТА), оплавление поршней, задир элементов цилиндропоршневой группы (ЦПГ) и др. [16].

По оценкам разных исследователей [1; 4; 6; 16] на двигатель приходится от 11% до 54% от суммарного числа дефектов всего автомобиля, из них на ТА – от 6,7% до 60% в зависимости от назначения транспортного средства³. Наиболее распространены дефекты топливного насоса высокого давления (ТНВД) – от 3,2% до 5,0%, и форсунок – от 8,4% до 22,2% всех дефектов двигателя [4; 13; 16; 17]. Основными дефектами ТНВД и форсунок являются износы плунжерных пар и распылителей – на них приходится до 80% всех дефектов. Некоторые исследователи указывают основными дефектами форсунок закоксовывание и износ распылителей [14; 15].

Необходимо отметить, что от качества ДТ так же зависит надежность и эффективность работы предпускового подогревателя – его доля дефектов составляет от 6% до 22% в зависимости от назначения автомобиля [13]. Применение высокосернистых топлив в дизеле приводит к ускорению образования нагара, увеличению его твердости, интенсификации процесса окисления и старения моторного масла, увеличению содержания в масле продуктов коксования и золы, и, в целом, повышает износ деталей ЦПГ, элементов ТА, сажевого фильтра и системы рециркуляции отработавших газов [5; 8; 10].

Зарубежные исследователи также отмечают, что снижение содержания серы в ДТ позволяет существенно продлить срок службы систем EGR (при их

² Исследовательская группа «Петромаркет». – URL: http://www.petromarket.ru/?r=public_11 (дата обращения: 16.01.2024).

³ Абдуллаев К. Ф., Свиридов Е. В. К вопросу влияния моторесурса двигателей автомобильной техники на ее надежность // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 3–2. – С. 190–192. – EDN: VYXHSV.

наличии), а также значительно уменьшить износ двигателя, и, в том числе, сократить затраты на его техническое обслуживание [18].

Таким образом, по результатам проведенного анализа состояния вопроса выдвинута гипотеза, заключающаяся в том, что эксплуатационная надежность ТА дизеля коррелирует с содержанием серы в ДТ. Проверку гипотезы проведем путем построения модели влияния повышенного содержания серы в ДТ на надежность ТА двигателя. Для этого использованы результаты многолетнего мониторинга показателей качества ДТ и дефектов ТА двигателей КАМАЗ.

Динамика по календарным годам в Российской Федерации доли дизельного топлива с повышенным содержанием серы при эксплуатации автомобильной техники

На протяжении с 2003 по 2023 годы проводился мониторинг показателей качества ДТ для оценки его соответствия требованиям нормативной документации (в зависимости от рассматриваемого временного периода) в эксплуатации. Отбор проб ДТ проводился во многих регионах Российской Федерации в ходе эксплуатационных и подконтрольных испытаний автомобилей КАМАЗ, в процессе выполнения регламентных

работ по техническому обслуживанию, из баков и при заправке на АЗС. Анализ проб топлива осуществлялся в Центральной лаборатории топлив и масел Научно-технического центра ПАО «КАМАЗ». Общее количество отобранных проб ДТ составило более 2000 шт. В ходе анализа проб топлива определялись следующие показатели: цетановое число и цетановый индекс, кинематическая вязкость, плотность, фракционный состав (выборочно), температура вспышки в закрытом тигле, температура помутнения, предельная температура фильтрования, массовая доля серы, содержание воды, смазывающая способность (выборочно).

Для целей настоящего исследования использовались данные по календарным годам о доле топлива, имеющего превышение содержания серы допустимой величины 350 ppm в соответствующий временной диапазон ограничений (рисунок 1). На наш взгляд, применение топлива с содержанием серы более 350 ppm наносит наибольший вред надежности ТА.

Результаты анализа мониторинга показателей качества ДТ сведены в таблицу 2. Из таблицы следует, что за последние 20 лет в эксплуатации всегда присутствовала существенная доля ДТ, не соответствующего по содержанию серы требованиям нормативных документов.

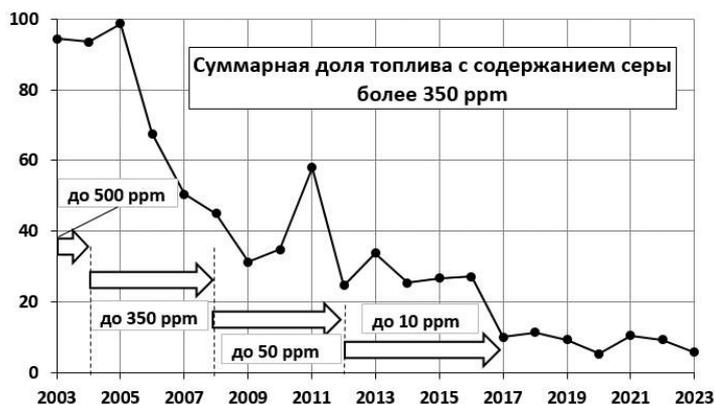


Рисунок 1. Изменение относительной доли проб ДТ с содержанием серы более 350 ppm в период с 2003 по 2023 годы и временные этапы введения требований по содержанию серы в ДТ

Источник: разработано авторами

Динамика по календарным годам надежности топливной аппаратуры двигателей КАМАЗ

В период с 2007 по 2019 годы собирались данные о дефектах элементов ТА двигателей КАМАЗ в гарантийный период эксплуатации. Было установлено, что общее число дефектов элементов ТА (включая привод ТНВД, трубопроводов и крепежных изделий) составляет до 12% от всех дефектов двигателя.

Из них доля дефектов ТНВД и форсунок достигает до 20% в общем числе дефектов ТА. В нашем случае будем рассматривать только дефекты ТНВД и форсунок. Определялась их доля в процентах дефектов этих элементов относительно суммарного количества дефектов двигателя. На рисунках 2 и 3 показаны графики изменения доли дефектов ТНВД и форсунок в исследуемый период.

Таблица 2. Результаты анализа мониторинга содержания серы в пробах ДТ

Временной период	Действующие экологические нормы	Ограничение по содержанию серы	Характеристика проб по содержанию серы
с 2003 по 2004 гг.	Евро-2 (ГОСТ 305–82)	до 500 ppm	ДТ с содержанием серы до 500 ppm – менее 10%. Максимальное содержание серы – 9200 ppm.
с 2004 по 2008 гг.	Евро-3 (ГОСТ 32511–2013)	до 350 ppm	ДТ с содержанием серы до 350 ppm – менее 10% в начале периода, с увеличением до 50% к 2008 году. Максимальное содержание серы – 5000 ppm.
с 2008 по 2012 гг.	Евро-4 (ГОСТ 32511–2013)	до 50 ppm	ДТ с содержанием серы до 50 ppm – не более 50% в течение всего периода. Максимальное содержание серы – 6600 ppm.
с 2012 по 2023 гг.	Евро-5 (ГОСТ 32511–2013)	до 10 ppm	Рост доли ДТ с содержанием серы до 10 ppm с 1,5% до 80%. Снижение доли ДТ с содержанием серы более 2000 ppm с 20% до 0. Снижение доли ДТ с содержанием серы от 10 ppm до 50 ppm с 40% до 10%.

Источник: разработано авторами

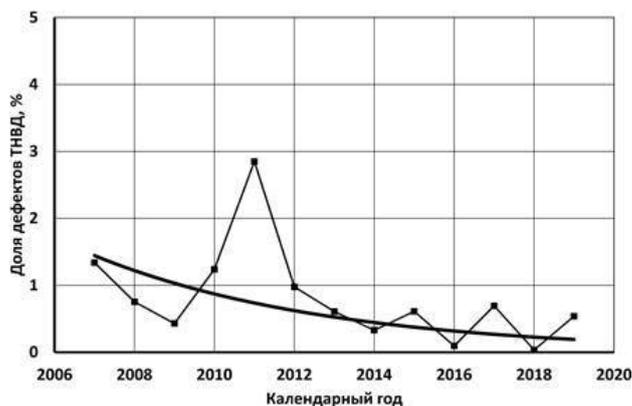


Рисунок 2. Изменение доли дефектов ТНВД в период с 2007 по 2019 годы

Источник: разработано авторами

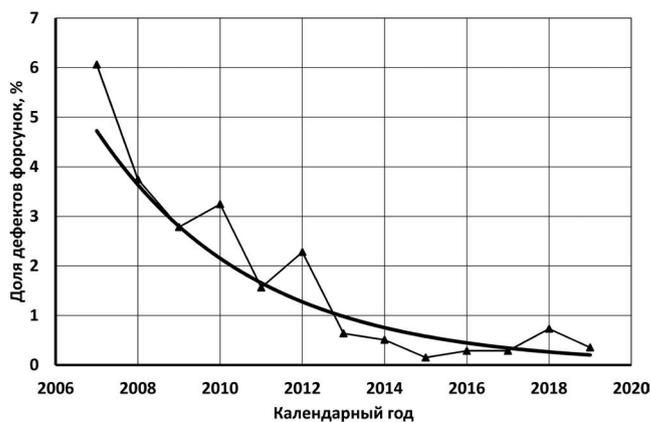


Рисунок 3. Изменение доли дефектов форсунок в период с 2007 по 2019 годы

Источник: разработано авторами

В данном случае не проводилось разделение дефектов топливной аппаратуры разных поколений и производителей. Установлено, что доля дефектов существенно уменьшилась – форсунок в 23,2 раза, ТНВД в 7,5 раз. Необходимо отметить, что основную часть дефектов ТА составляют, преимущественно, дефекты форсунок (в среднем 61%). Это можно объяснить тем, что на один ТНВД приходится 8 форсунок,

а также тем, что распылители форсунок в большей степени чувствительны к качеству топлива, и работают, в отличие от ТНВД, в более жестких условиях (высокие температуры, нагаро- и лакообразование, химическая коррозия).

Между долями дефектов ТНВД и форсунок имеется слабая корреляционная связь (рисунок 4).

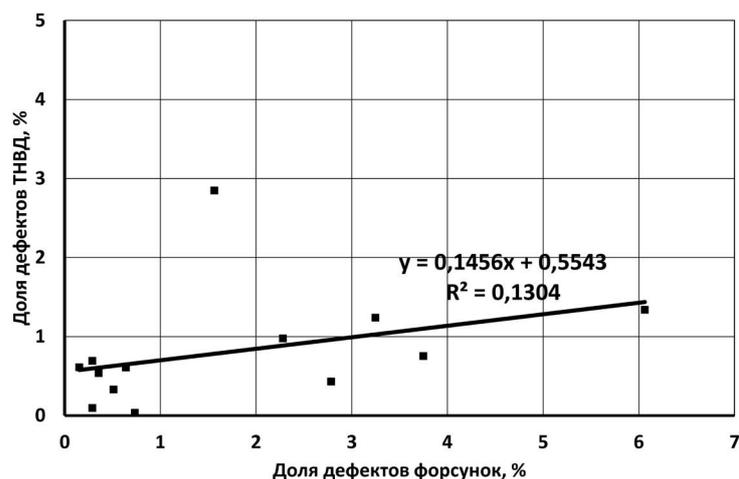


Рисунок 4. Взаимосвязь между долями дефектов ТНВД и форсунок

Источник: разработано авторами

Модель влияния повышенного содержания серы в дизельном топливе на надежность топливной аппаратуры двигателя

Анализ рисунков 5 и 6 свидетельствует, что ха-

рактер изменения доли дефектов ТА и доли ДТ с содержанием серы более 350 ppm от календарного года схожий.

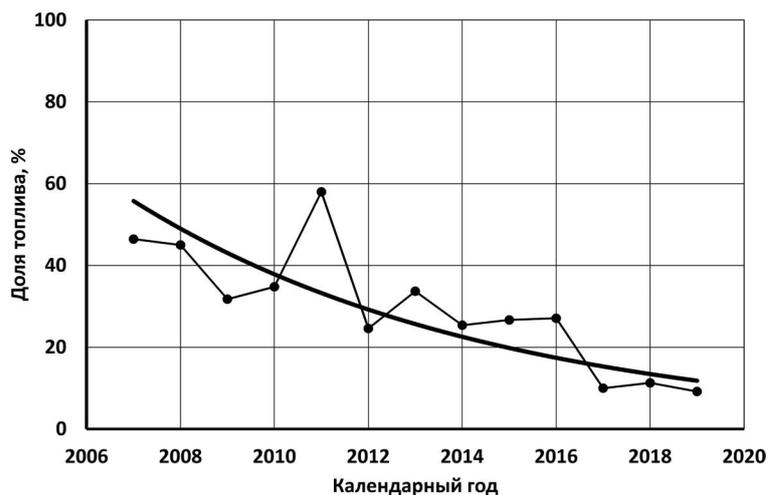


Рисунок 5. Изменение доли ДТ с содержанием серы более 350 ppm в период с 2007 по 2019 годы

Источник: разработано авторами

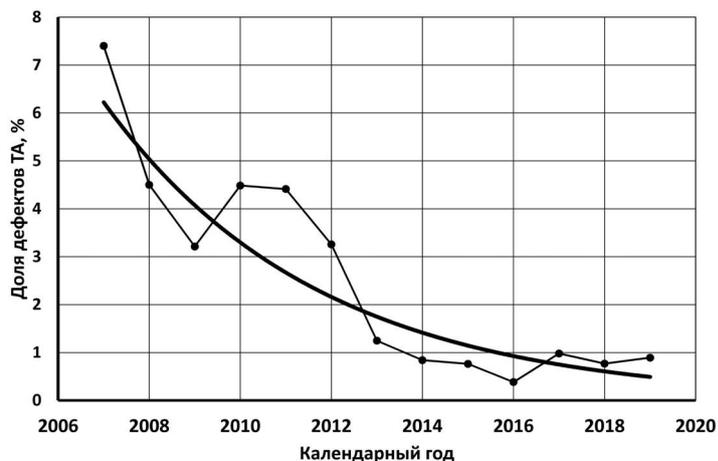


Рисунок 6. Изменение доли дефектов ТА в период с 2007 по 2019 годы

Источник: разработано авторами

Получена корреляционная зависимость доли дефектов ТА (y , %) от доли ДТ с содержанием серы бо-

лее 350 ppm (x , %) линейного вида $y = 0,1099x - 0,6953$ (рисунок 7).

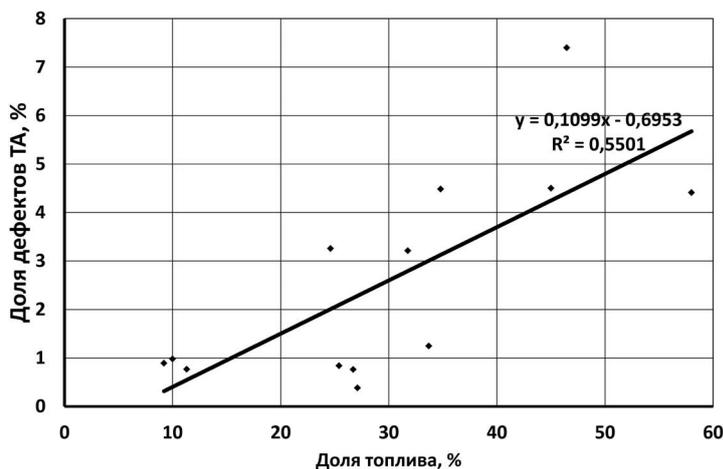


Рисунок 7. Корреляционная зависимость доли дефектов ТА от доли ДТ с содержанием серы более 350 ppm

Источник: разработано авторами

Из рисунка видно, что рост доли топлива с содержанием серы более 350 ppm ведет к росту доли дефектов ТА. Таким образом, выдвинутая ранее гипотеза о корреляции между надежностью ТА и повышенным содержанием серы в ДТ подтверждена конкретной моделью.

Необходимо отметить, что снижение дефектности ТА при переходе на ДТ ЕВРО с содержанием серы менее 350 ppm достигается не только за счет снижения содержания серы, но и улучшения смазывающей способности топлива. В данных исследованиях смазывающая способность ДТ не рассматривается.

Конечно, на эксплуатационную надежность ТА влияют и многие другие факторы, такие как качество изготовления, регион и сезон эксплуатации, качество применяемых расходных материалов и соблюдение сроков их смены, соблюдение регламента технического обслуживания. Однако качество ДТ имеет одно из решающих значений.

Основные результаты

Анализ эволюции дизельных двигателей КАМАЗ показал взаимосвязь между технологическим совершенством двигателя, его ресурсом и экологическими

свойствами, группой эксплуатации применяемого моторного масла, сроком его смены и содержанием серы в ДТ.

Совместный анализ результатов многолетнего мониторинга содержания серы в ДТ и дефектов ТА дизелей КАМАЗ, показал:

- доля качественного ДТ (экологического класса К5) в Российской Федерации в период наблюдений с 2003 по 2023 годы существенно выросла, начиная с 0 % и до стабильного уровня около 80 %, наблюдаемого с 2019 г по настоящее время; в то же время некачественное ДТ, не соответствующее требованиям ГОСТ 32511–2013 и ТР ТС 013/2011, особенно по содержанию серы, продолжает присутствовать в эксплуатации автомобильной техники в значительном количестве;
- выявлено существенное снижение доли дефектов ТА двигателей КАМАЗ в период наблюдений с 2007 по 2019 годы, причем как форсунок, так и ТНВД;
- доля дефектов ТА имеет прямую корреляцию с долей ДТ с повышенным содержанием серы.

Литература

1. Андреева Л. И., Ушаков Ю. Ю. Исследование эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов // Известия уральского государственного горного университета. – 2016. – № 3(43). – С. 74–77. – <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-3-74-77>. – EDN: WWNYML.
2. Бойко О. А., Панов С. Л., Ревягин А. В. Оборот контрафактного и поддельного моторного топлива: детерминанты и меры противодействия // Научный вестник Омской академии МВД России. – 2019. – № 1(72). – С. 22–27. – EDN: VGUIGE.
3. Булатников В. В., Хавкин В. А. О контрафактных моторных топливах // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2016. – № 8. – С. 13–14. – EDN: WMHEUT.
4. Бурмистров В. А., Тимохов Р. С., Бурмистров Д. В. Исследование эксплуатационной надежности лесовозных автопоездов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2016. – Т. 4, № 5–4(25–4). – С. 203–207. – EDN: ХАУВGP.
5. Влияние качества дизельного топлива на работу двигателя / С. В. Корнеев [и др.] // Омский научный вестник. – 2017. – № 2 (152). – С. 13–16. – EDN: YPCWJR.
6. Влияние показателей качества дизельного топлива на работу автомобильного двигателя / С. В. Касьянов [и др.] // Автотранспортный комплекс 3.0. Актуальные проблемы и перспективы развития: Материалы международной научно-практической конференции, Грозный, 28–30 апреля 2023 года. – Грозный: Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова, 2023. – С. 53–59. – <https://doi.org/10.26200/GSTOU.2023.68.55.007>. – EDN: YIPVQX.
7. Иовлева Е. Л. Исследование качества арктического дизельного топлива привозимого в Республику Саха (Якутия) // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2018. – Т. 80, № 3(77). – С. 358–361. – <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-3-358-361>. – EDN: VNXEFS.
8. К чему приводит некачественное топливо в современном автомобиле. Цикл статей. Часть 1. Отказы топливной аппаратуры / А. Ю. Малахов [и др.] // Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли. – 2022. – № 1(2). – С. 23–37. – EDN: UVCPNG.
9. Клот Л. На каждой десятой автозаправке Европы – некачественное дизельное топливо // Наша газета. – URL: <https://nashagazeta.ch/news/11657> (дата обращения: 25.01.2024).
10. Корректирование сроков замены моторных масел при эксплуатации техники в условиях холодного климата на ОАО «Сургутнефтегаз» / С. В. Корнеев [и др.] // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2009. – № 1(11). – С. 17–21. – EDN: PBOIKL.
11. Митусова Т. Спрос на высокосернистое дизтопливо будет удерживаться еще долго // Нефтегазовая вертикаль. – 2008. – № 11. – С. 19–21. – EDN: JTMZRH.

Заключение

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что в эксплуатации выявлены закономерности изменения по календарным годам доли ДТ с повышенным содержанием серы (более 350 ppm) и доли дефектов ТА двигателей КАМАЗ, что позволило установить между данными показателями тесную корреляционную зависимость с конкретными параметрами.

Теоретическая ценность для развития научной специальности «Эксплуатация автомобильного транспорта» заключается в том, что выявленные закономерности вносят вклад в изучение влияния показателей качества одного из автомобильного эксплуатационного материала – дизельного топлива, на безотказность топливной аппаратуры автомобильных двигателей.

Направлением дальнейших научных изысканий является совершенствование процессов контроля показателей качества дизельного топлива, что будет способствовать повышению эксплуатационной надежности топливной аппаратуры автомобильных двигателей.

12. Назаров Ф. Л., Ханнанов М. Д., Калимуллин Р. Ф. Обоснование потенциала увеличения интервала замены моторного масла двигателя КАМАЗ Р-6 // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2022. – № 3. – С. 71–80. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-3-71> – EDN: RQILCQ.

13. Павлишин С. Г., Зинатуллин Р. Р. Особенности обеспечения эксплуатационной надежности автотехники КАМАЗ в Дальневосточном федеральном округе // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2011. – № 1(24). – С. 29–33. – EDN: NDBDJR.

14. Саенко М. М. Анализ основных эксплуатационных неисправностей приборов топливной системы и их влияния на показатели работы дизеля // Архитектура, строительство, транспорт: материалы Международной научно-практической конференции (к 85-летию ФГБОУ ВПО «СибАДИ»), Омск, 02–03 декабря 2015 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2015. – С. 1028–1036. – EDN: VMRYGT.

15. Смирнов А. М., Сенькин П. А., Прокопенко Н. И. Оценивание износа плунжерных пар без разборки топливного насоса высокого давления дизеля // Омский научный вестник. – 2015. – № 3(143). – С. 187–191. – EDN: VCNUKD.

16. Трикозюк В. А. Повышение надежности автомобиля. – М.: Транспорт, 1980. – 88 с.

17. Фасхиев Х. А., Тахавиев Р. Х., Зарипов А. Р. К вопросу исследования эксплуатационной надежности новых моделей городских автобусов // Сборник научных статей по материалам Международной научно-практической конференции «Совершенствование технологии и организации обеспечения работоспособности машин с использованием восстановительно-упрочняющих процессов». – Саратов: Изд-во СГТУ, 2003. – С. 103–111.

18. Darlington T., Kahlbaum D. (1999) Nationwide Emission Benefits of a Low Sulfur Diesel Fuel. Air Improvement Resource, 31 p. (In Eng.).

19. Mellios G., Gouliarou E. (2021) Fuel quality monitoring in the EU in 2019. Fuel quality monitoring under the Fuel Quality Directive. Eionet report. European Topic Centre on Climate change mitigation and energy. – 98 p. (In Eng.).

References

1. Andreeva, L. I., Ushakov, Yu. Yu. (2016) [Investigation of the operational reliability of dump trucks]. *Izvestiya uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [Proceedings of the Ural State Mining University]. Vol. 3(43), pp. 74–77. – <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-3-74-77>. – EDN: WWNYML. (In Russ.).

2. Bojko, O. A., Panov, A. V., Revyagin, A. V. (2019) [Counterfeit and counterfeit motor fuel turnover: determinants and counteraction measures]. *Nauchnyj vestnik Omskoj akademii MVD Rossii* [Scientific bulletin of the Omsk Academy of the Ministry of Internal Affairs of Russia]. Vol. (72), pp. 22–27. – EDN: VGUIGE. (In Russ.).

3. Bulatnikov, V. V., Khavkin, V. V. (2016) [About counterfeit motor fuels]. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno–tekhnicheskie dostizheniya i peredovoj opyt* [Oil refining and petrochemistry. Scientific and technical achievements and best practices]. Vol. 8, pp. 13–14. – EDN: WMHEUT. (In Russ.).

4. Burmistrov, V. A., Timokhov, R. S., Burmistrov, D. V. (2016) [Investigation of operational reliability of logging road trains]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika* [Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice]. Vol. 4. No. 5–4(25–4), pp. 203–207. – EDN: XAYBGP. (In Russ.).

5. Korneev, S. V., et al. (2017) [The influence of diesel fuel quality on engine operation]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. Vol. 2 (152), pp. 13–16. – EDN: YPCWJR. (In Russ.).

6. Kas'yanov, S. V., et al. (2023) [The influence of diesel fuel quality indicators on the operation of an automobile engine] *Avtotransportnyj kompleks 3.0. Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya: Materialy mezhdunarodnoj nauchno–prakticheskoy konferencii, Groznyj, 28–30 aprelya 2023 goda. – Groznyj: Groznenskij gosudarstvennyj neftyanoj tekhnicheskij universitet imeni akademika M.D. Millionshchikova*. pp. 53–59. – <https://doi.org/10.26200/GSTOU.2023.68.55.007>. – EDN: YIPVQX. (In Russ.).

7. Iovleva, E. L. (2018) [Investigation of the quality of Arctic diesel fuel imported to the Republic of Sakha (Yakutia)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologij* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies]. Vol. 80. No. 3(77), pp. 358–361. – <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-3-358-361>. – EDN: VNXEFS. (In Russ.).

8. Malakhov, A. Yu., et al. (2022) [What does low-quality fuel lead to in a modern car. A series of articles. Part 1. Fuel equipment failures]. *Problemy ekspertizy v avtomobil'no-dorozhnoy otrasli* [Problems of expertise in the automobile and road industry]. Vol. 1 (2), pp. 23–37. – EDN: UVCPNG. (In Russ.).

9. Klot, L. [Every tenth gas station in Europe has low-quality diesel fuel]. *Nasha gazeta* [Our Newspaper]. Available at: <https://nashagazeta.ch/news/11657> (accessed: 25.01.2024). (In Russ.).
10. Korneev, S. V., et al. (2009) [Adjusting the timing of engine oil replacement during the operation of equipment in a cold climate at Surgutneftegaz]. *Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii* [Bulletin of the Siberian State Automobile and Road Academy]. Vol. 1(11). pp. 17–21. – EDN: PBOIKL. (In Russ.).
11. Mitusova, T. (2008) [The demand for high-sulfur diesel fuel will be maintained for a long time]. *Neftegazovaya vertikal'* [Oil and gas vertical]. Vol. 11, pp. 19–21. – EDN: JTMZRH. (In Russ.).
12. Nazarov, F. L., Khannanov, M. D., Kalimullin, R. F. (2022) [Justification of the potential for increasing the engine oil change interval of the KAMAZ R-6 engine]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intelligence. Innovation. Investment]. Vol. 3, pp. 71–80. – EDN: RQILCQ. (In Russ.).
13. Pavlishin, S. G., Zinatullin, R. R. (2011) [Features of ensuring the operational reliability of KAMAZ vehicles in the Far Eastern Federal District]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. [Bulletin of the Moscow Automobile'no-Road State Technical University (MADI)]. Vol. 1 (24), pp. 29–33. – EDN: NDBDJP. (In Russ.).
14. Saenko, M. M. (2015) [Analysis of the main operational failures of fuel system devices and their impact on diesel performance]. *Arkhitektura, stroitel'stvo, transport: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (k 85-letiyu FGBOU VPO «SiBADI»)* [Architecture, Construction, Transport: materials of the International Scientific and Practical Conference (On the 85th anniversary of the SibADI Federal State Budgetary Educational Institution), Omsk, December 02–03, 2015]. pp. 1028–1036. – EDN: VMRYGT. (In Russ.).
15. Smirnov, A. M., Sen'kin, P. A., Prokopenko, N. I. (2015) [Evaluation of the wear of plunger pairs without disassembly of the diesel high-pressure fuel pump]. *Omskij nauchnyj vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. Vol. 3 (143), pp. 187–191. – EDN: VCNUKD. (In Russ.).
16. Trikozyuk, V. A. (1980) *Povyshenie nadezhnosti avtomobilya* [Improving the reliability of the car]. Moscow, Transport, 88 p. (In Russ.).
17. Faskhiev, Kh. A., Takhaviev, R. Kh., Zaripov A. R. (2003) [On the issue of researching the operational reliability of new models of city buses]. *Sbornik nauchny'x statej po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovershenstvovanie texnologii i organizacii obespecheniya rabotosposobnosti mashin s ispol'zovaniem vosstanovitel'no-uprochnyayushhix processov»*. [A collection of scientific articles based on the materials of the International Scientific and practical conference «Improving the technology and organization of ensuring the operability of machines using restorative and strengthening processes»]. pp. 103–111. (In Russ.).
18. Darlington, T., Kahlbaum, D. (1999) Nationwide Emission Benefits of a Low Sulfur Diesel Fuel. *Air Improvement Resource*, 31 p. (In Eng.).
19. Mellios, G., Gouliarou, E. (2021) Fuel quality monitoring in the EU in 2019. Fuel quality monitoring under the Fuel Quality Directive. *Eionet report. European Topic Centre on Climate change mitigation and energy*, 98 p. (In Eng.).

Информация об авторах:

Максим Федорович Тетерин, главный специалист по химмотологии, Научно-технический центр ПАО «КАМАЗ», Набережные Челны, Россия

ORCID ID: 0009-0000-2167-1944

e-mail: Maksim.Teterin@kamaz.ru

Руслан Флюрович Калимуллин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой эксплуатации автомобильного транспорта, Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия

ORCID ID: 0000-0003-4016-2381, **Researcher ID:** E-9031-2015, **Scopus Author ID:** 6602711766

e-mail: rkalimullin@mail.ru

Александр Тихонович Кулаков, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры эксплуатации автомобильного транспорта, Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия

ORCID ID: 0000-0002-6443-0136, **Researcher ID:** ADD-9570-2019, **Scopus Author ID:** 56454050300

e-mail: alttrak09@mail.ru

Вклад соавторов:

Конфликт интересов отсутствует.

Тетерин М. Ф. – формирование первичной структуры исследования, постановка цели и задач исследования, обзор литературных источников, экспериментальные исследования, интерпретация результатов исследования, формулировка заключения, оформление рукописи.

Калимуллин Р. Ф. – структурирование материалов и обобщение результатов, оформление рукописи.

Кулаков А. Т. – систематизация и анализ полученных результатов.

Статья поступила в редакцию: 24.07.2024; принята в печать: 05.11.2024.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the authors:

Maxim Fedorovich Teterin, Chief Specialist in Chemmotology, Scientific and Technical Center of PJSC KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russia

ORCID iD: 0009-0000-2167-1944

e-mail: Maksim.Teterin@kamaz.ru

Ruslan Flurovich Kalimullin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automobile Transport Operation, Naberezhnye Chelny Institute (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Kazan (Volga region) Federal University», Naberezhnye Chelny, Russia

ORCID iD: 0000-0003-4016-2381, **Researcher ID:** E-9031-2015, **Scopus Author ID:** 6602711766

e-mail: rkalimullin@mail.ru

Alexander Tikhonovich Kulakov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automobile Transport Operation, Naberezhnye Chelny Institute (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Kazan (Volga region) Federal University», Naberezhnye Chelny, Russia

ORCID iD: 0000-0002-6443-0136, **Researcher ID:** ADD-9570-2019, **Scopus Author ID:** 56454050300

e-mail: altrak09@mail.ru

Contribution of the authors:

There is no conflict of interest

Teterin M. F. – formation of the primary structure of the study, setting the goal and objectives of the study, review of literary sources, experimental studies, interpretation of the results of the study, wording of the conclusion, design of the manuscript.

Kalimullin R. F. – structuring of materials and generalization of results, design of the manuscript.

Kulakov A.T. – systematization and analysis of the obtained results.

The paper was submitted: 24.07.2024.

Accepted for publication: 05.11.2024.

The authors have read and approved the final manuscript.