



ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ

УДК 629.3.021

В.С. КАРАБЦЕВ, канд. техн. наук, доц.

руководитель службы конструкторских и научно-исследовательских расчетов¹

доцент кафедры информационных систем²

E-mail: Vladimir.Karabtsev@kamaz.ru

Д.Х. ВАЛЕЕВ, канд. техн. наук, доц.

советник генерального директора¹

доцент кафедры автомобилей, автомобильных двигателей и дизайна²

E-mail: valeev@kamaz.ru

¹ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Республика Татарстан, Российская Федерация

²Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Набережные Челны, Республика Татарстан, Российская Федерация

Поступила в редакцию 17.10.2024.

МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЯГОВО-СКОРОСТНЫХ СВОЙСТВ И ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ КАМАЗ. ЧАСТЬ 1

Эксплуатационные показатели колесных транспортных средств (КТС) — расход горюче-смазочных материалов, мочевины, скорость доставки груза — всегда были и остаются одними из ключевых факторов, обеспечивающих их высокую эффективность. Для повышения эффективности КТС специалистами ПАО «КАМАЗ» разработаны и применяются на практике как стандартизованные методы исследований этих показателей, так и оригинальные методики с соответствующим инструментальным обеспечением. В арсенале конструкторских и исследовательских подразделений имеются инструменты для выполнения аналитических расчетов, компьютерного моделирования, лабораторно-дорожных и эксплуатационных испытаний, а также стендовое оборудование для определения исходных данных для расчетных моделей и их валидации. В первой части работы представлен опыт выполнения аналитических исследований. Во второй части будут изложены методы расчетных и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: колесное транспортное средство, эксплуатационный расход топлива, средняя скорость движения, условия эксплуатации, двигатель, трансмиссия

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-4-69-39-49>

Введение. Основная цель автопроизводителей в современных условиях санкционного давления и других вызовов в сочетании с быстро развивающимися технологиями — обеспечить более высокий, чем у конкурентов, уровень безопасности, энергоэффективности и экологичности транспортных средств при низкой стоимости владения продуктом. Несмотря на то, что ключевыми трендами в отечественной и мировой автомобильной промышленности на современном этапе развития

науки, техники и технологий являются автономное движение, увеличение доли электротранспорта, переход на альтернативные виды топлива, проблема снижения расхода топлива транспортных средств, оборудованных дизельными двигателями, остается актуальной в обозримой перспективе на несколько десятилетий.

Процесс разработки автомобильной техники в ПАО «КАМАЗ» осуществляется в соответствии с концепцией жизненного цикла, изложенной

в ГОСТ Р 56862-2016 «Система управления жизненным циклом. Разработка концепции изделия и технологий. Термины и определения». Разработка требований к автомобильной технике выполняется на основе аналитических исследований рынка, изучения «голоса потребителя», применения накопленного опыта на предшествующих моделях, учета действующих и анализа тенденций изменения перспективных норм законодательства и действующего ГОСТ Р 59194-2020 «Управление требованиями. Основные положения». Выполнимость требований проверяется на концептуальной фазе с применением методов моделирования, по результатам которого определяются требования к основным компонентам.

Специалистами ПАО «КАМАЗ» на практике применяются как стандартизованные методы исследований этих показателей, так и вновь разработанные оригинальные методики. К настоящему времени в арсенале конструкторских и исследовательских подразделений предприятия накоплен определенный опыт выполнения аналитических исследований, компьютерного моделирования, лабораторно-дорожных и эксплуатационных испытаний транспортных средств, а также имеется стендовое оборудование для получения исходных данных, необходимых для создания расчетных (компьютерных) моделей и их валидации.

Аналитические исследования. Выполняются как специализированными подразделениями (маркетологи, продавцы, экономисты) предприятий, институтов и консалтинговых фирм в части анализа рынков грузовых и пассажирских КТС, так и конструкторско-технологическими подразделениями с целью анализа тенденций развития их конструкций и ключевых потребительских свойств.

Высокие показатели тягово-скоростных свойств и топливной экономичности формируют такие важные для потребителя эксплуатационные показатели, как среднетехническая скорость v_{cp} (км/ч или м/с) и средний расход топлива Q_{cp} (л/100 км), которые в основном и определяют себестоимость перевозок и структуру затрат.

В качестве примера на рисунке 1 показана тенденция изменения эксплуатационного расхода топлива (ЭРТ) европейских магистральных автопоездов, выявленная по результатам прово-

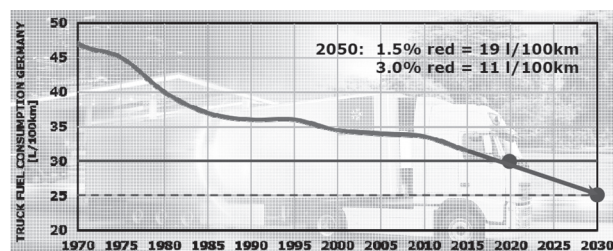


Рисунок 1 — ЭРТ европейских автопоездов
Figure 1 — Operational fuel consumption (OFC) of European road trains

димых исследований [1]. Из данных рисунка следует, что достигнутый к 2020 году расход топлива в 30 л/100 км при темпе снижения 1,5 % в год к 2030 году может составлять 25 л/100 км, а к 2050 году — 19 л/100 км.

В других источниках можно найти отличающиеся от указанных выше данные по расходу топлива не только европейских, но и американских грузовиков (рисунок 2 [2]). Представленные данные показывают, что только к 2027 году при оптимистичном прогнозе снижения ЭРТ на 1 % в год европейские автопоезда достигнут уровня в 30 л/100 км, а американские — 26,5 л/100 км.

Выполнив анализ основных технических характеристик (таблица 1) европейских автопоездов колесной формулой 4×2, устанавливаем, что мощность двигателей рабочим объемом 12,7...12,9 л составляет 355...378 кВт при частоте вращения коленчатого вала от 1600 до 1900 мин⁻¹, максимальный крутящий момент — от 2350 до 2600 Н·м, причем кривая крутящего момента по внешней скоростной характеристике (ВСХ) двигателя МХ-13 автомобиля DAF XG-480 имеет ярко выраженные «полки» постоянного момента (рисунок 3), начиная с 900 мин⁻¹ [3, 4].

В состав трансмиссии автомобилей входят 12-ступенчатые коробки передач, у которых передаточное число высшей ступени равно единице, а диапазон передаточных чисел изменяется от 16,69 до 1,0. Передаточное число главной переда-

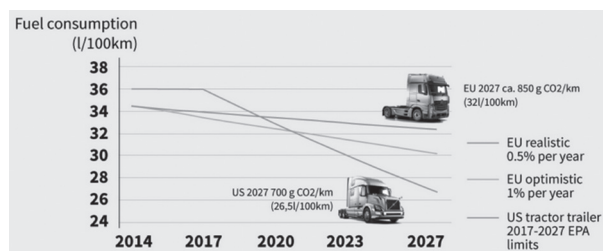


Рисунок 2 — Прогноз ЭРТ европейских и американских автопоездов [2]
Figure 2 — OFC forecast of European and American road trains [2]

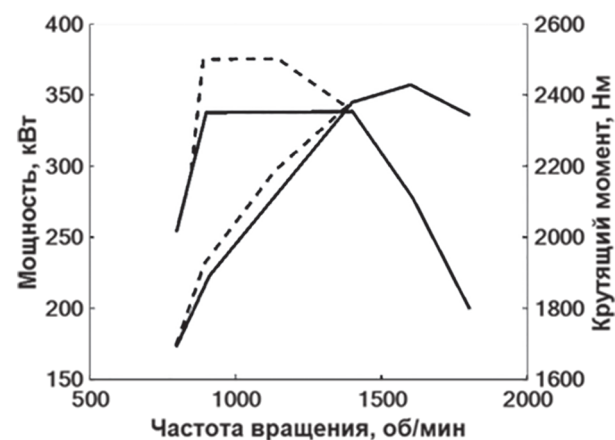


Рисунок 3 — ВСХ двигателя МХ-13 автомобиля DAF XG-480
Figure 3 — Full-load curve of MX-13 engine of DAF XG-480 vehicle

Таблица 1 — Технические характеристики некоторых зарубежных автопоездов
Table 1 — Technical characteristics of some foreign road trains

Характеристика	DAF XG 480	SCANIA 500S	Volvo FH-400 ISAVE	IVECO S-Way 490
Полная масса, кг	39 440	39 210	40 000	39 500
Модель двигателя	MX-13	DC13 146	DB K460	Cursor 13 F3H
Номинальная мощность N_e , кВт	355/1600	368/1900	338/1600	357/1900
Максимальный крутящий момент M_{max} , Н·м	2350 при 900–1400	2550 при 1300	2600 при 900–1300	2400 при 950
Частота вращения при N_e , мин ⁻¹	1800	1900	1600	1900
Модель КП	ZF TRAXON 12TX	GRS905	Volvo I-Shift AT2812F	ZF TRAXON
ЭРТ общий, л/100 км	30,6	30,6	Нет данных	33,7
ЭРТ на легком маршруте, л/100 км	21,5	26,7	Нет данных	29,2
ЭРТ на тяжелом маршруте, л/100 км	34,6	34,5	Нет данных	38,2
Средняя (общая), км/ч	82,6	84,4	Нет данных	83,0
Расход мочевины, л (%)	1,65 (5,4)	3,58 (11,7)	Нет данных	3,06 (9,07)
Источник информации	[3]	[3]	[3]	[4]

чи i_0 при этом варьируется в незначительном диапазоне — от 2,21 до 2,31.

Для повышения топливной экономичности за счет увеличения доли использования прямой передачи верхняя «полка» используется при движении на высшей, двенадцатой ступени коробки передач, а нижняя «полка» — при движении на всех остальных ступенях трансмиссии.

Из данных таблицы 1 следует, что ЭРТ автопоездов (общий, который рассчитан при движении по легкому и тяжелому маршрутам), за исключением автомобиля Volvo FH-400 I-SAVE, составляет 30,6...33,7 л/100 км. ЭРТ автопоезда Volvo FH-400 I-SAVE не измерялся. Различие величин ЭРТ связано, вероятнее всего, с различными маршрутами. Об этом свидетельствуют и величины ЭРТ одного и того же автопоезда, например DAF XG 480, которые на легком (21,5 л/100 км) и тяжелом (34,6 л/100 км) маршруте отличаются на 13,1 л/100 км, т. е. более чем в 1,5 раза. Для сравнения укажем, что ЭРТ европейских автопоездов «большой семерки» [5] колесной формулой 6×2 изменяется от 27,4 до 30,3 л/100 км.

Среднетехнические скорости $v_{\text{ср}}$ при этом соизмеримы и составляют от 80,3 до 84,4 км/ч. Размерность шин управляемых и ведущих колес — 315/70 R22.5, отличие только в размерности рулевых шин автомобиля Volvo (385/55).

Подъем, преодолеваемый на высшей передаче, достигает 2,64...2,92 %, а частота вращения коленчатого вала двигателя на высшей передаче при движении с крейсерской скоростью 85 км/ч не превышает 1015...1060 мин⁻¹. Максимальная ско-

рость при движении транспортного средства на высшей передаче при номинальной частоте вращения составляет от 134,0 до 152,4 км/ч. Отметим также, что расход мочевины автопоездов относительно высок и превышает величину 5...11 % от расхода топлива.

Для сравнения, на рисунке 4 приведены величины расхода топлива магистральных грузовиков 2001 года выпуска [6]. Анализ приведенных данных показывает, что расход топлива при движении по горизонтальной дороге со скоростью 85 км/ч автопоездов MAN TG 460 A, Mercedes Actros, Scania R 164 LA 480 составляет в среднем 25 л/100 км. А эксплуатационный расход топлива

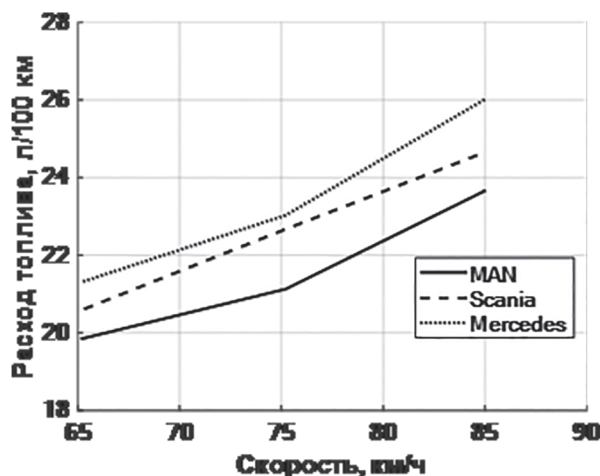


Рисунок 4 — Расход топлива в режиме установившегося движения

Figure 4 — Fuel consumption in steady-state moving mode

по тем же данным — в среднем 31,0 л/100 км. Если эту величину сравнить с данными таблицы 1, то увидим, что за два десятилетия ЭРТ европейских магистральных автопоездов сильно не изменился.

Таким образом, на основе обширных данных по зарубежным аналогам, мы установили, что средний расход топлива рассматриваемых автопоездов при скорости 85 км/ч составляет величину порядка $Q = 25,0$ л/100 км.

Возникает вопрос: каким образом можно использовать полученные данные. Например, на их основе определим суммарную мощность сопротивления движению автопоезда полной массой 40 тонн N_e по горизонтальной дороге по формулам (1) и (2):

$$Q = \frac{g_e N_e}{10 \rho_T v_a}, \quad (1)$$

отсюда

$$N_e = \frac{10 Q \rho_T v_a}{g_e}, \quad (2)$$

где $\rho_T = 0,83$ кг/л — плотность топлива; $v_a = 85$ км/ч — скорость движения; $g_e = 160$ г/(л.с.·ч) — средний удельный расход топлива в режиме эксплуатации.

Последняя величина выбрана на основании того, что минимальный удельный расход топлива двигателей по ВСХ составляет в среднем 140 г/л.с.ч.

Подставив численные значения, получаем:

$$N_e = 110,5 \text{ л. с.}$$

В предположении, что потери мощности в агрегатах трансмиссии и на привод вспомогательного оборудования составляют 13,5 л. с., на преодоление сопротивления качению и воздушной среды остается 97 л. с.

На основе многочисленных рекламных данных можно принять коэффициент аэродинамического сопротивления C_x , равный 0,5, фронтальную площадь S , равную 9,5 м². Сила аэродинамического сопротивления вычисляется по формуле:

$$P_w = 0,5 C_x \rho_b S v_a^2 = 1655 \text{ Н,}$$

где ρ_b — плотность воздуха 1,25 кг/м³.

Тогда мощность, затрачиваемая на преодоление воздушной среды, равна:

$$N_w = P_w v_a = 53,0 \text{ л. с. (39,1 кВт).}$$

Соответственно, мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления качению, определяемая как разность между суммарной и мощностью на сопротивление воздуха, составит:

$$N_f = 97 - 53 = 44 \text{ л. с. (32,5 кВт).}$$

Отсюда легко находится сила сопротивления качению:

$$P_f = 1377 \text{ Н}$$

и коэффициент сопротивления качению:

$$f = \frac{P_f}{G} = 0,0035,$$

где G — вес автопоезда, Н.

Таким образом, не проводя никаких дорогостоящих испытаний, только на основе анализа литературных данных мы смогли определить параметры транспортного средства и его компонентов, которые позволят обеспечить ЭРТ магистрального автопоезда на уровне 31 л/100 км.

Установим, как можно еще эффективно использовать имеющиеся данные. Обратимся к рисунку 5, на котором по приведенной на рисунке формуле рассчитаны линии равного расхода топлива 22, 25 и 28 л/100 км при движении магистрального автопоезда с установившейся скоростью 85 км/ч. Ранее мы определили, что расход топлива 25,0 л/100 км в режиме установившегося движения автопоезда с указанной скоростью соответствует ЭРТ, оцениваемому величиной 31,0 л/100 км. По этим двум величинам находим их отношение $31/25 = 1,24$.

Этот коэффициент будет нам полезен для оценки ЭРТ при других значениях расхода топлива в режиме установившегося движения. Например, если в указанной на рисунке 5 точке А расход топлива в режиме установившегося движения равен 26,3 л/100 км, то для оценки ЭРТ необходимо 26,3 умножить на 1,24, в результате получим 32,6 л/100 км. А если будет поставлена цель — получить ЭРТ в 27,5 л/100 км, то из рисунка 6 мы видим, что в этом случае расход топлива в режиме установившегося движения при скорости 85 км/ч должен равняться 22 л/100 км.

Приведенная на рисунке 5 модель для расчета ЭРТ полезна еще по двум причинам. Первая — она позволит конструктору и менеджеру находить «баланс» между мощностью сопротивления движению и удельным расходом топлива, обеспечивающий требуемый уровень ЭРТ. Действительно, он будет одинаков, к примеру, в двух точках средней

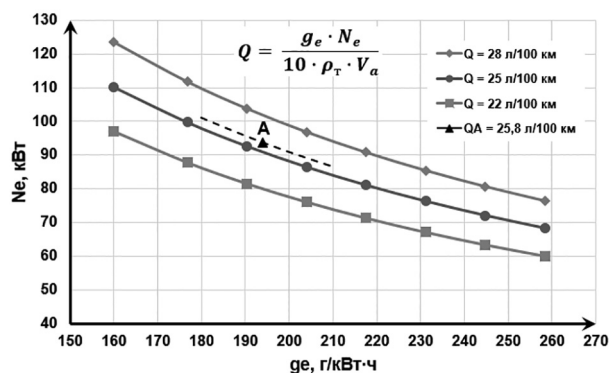


Рисунок 5 — Взаимосвязь мощности и удельного расхода топлива
Figure 5 — Relationship between power and specific fuel consumption

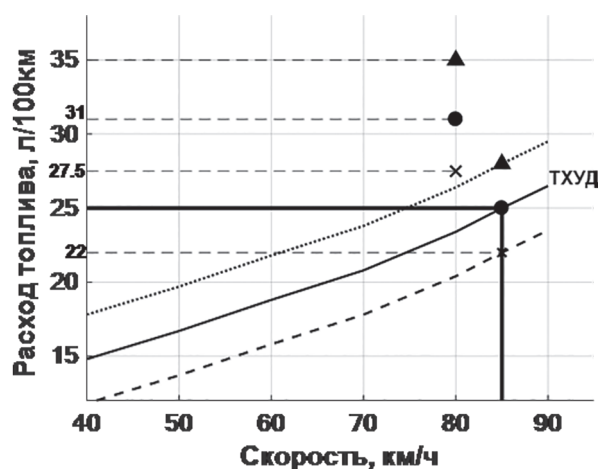


Рисунок 6 — Оценка ЭРТ по расходу топлива в режиме ТХУД при скорости 85 км/ч

Figure 6 — OFC estimation by fuel consumption in steady-state moving mode fuel characteristic regime at 85 km/h

линии: при $N_e = 110$ кВт и $g_e = 160$ г/(кВт·ч) и при $N_e = 93$ кВт и $g_e = 190$ г/(кВт·ч).

Эта модель поможет принять правильное решение: акцентировать усилия разработчиков на уменьшении мощности сопротивления движению за счет снижения сопротивления качению шин, аэродинамического сопротивления или других решений или выполнить комплекс научно-исследовательских работ с целью повышения эффективности двигателя.

Вторая причина — расход топлива по топливной характеристике установившегося движения (ТХУД) гораздо проще рассчитать, чем ЭРТ. Для расчета расхода топлива в таком режиме вполне применимы формулы теории автомобиля.

На этапе аналитических исследований перечисленные аспекты важны наряду с информацией о нормативных требованиях в странах дальнего зарубежья. Надо отдать должное правительствам ряда стран за то, что во этих государствах действовали и продолжают действовать меры регулирования и поддержки автопроизводителей, направленные на снижение расхода топлива и выбросов вредных веществ. В качестве примера рассмотрим материалы из работы [7], в которой представлен

краткий обзор некоторых ключевых аспектов предлагаемых мероприятий.

В частности, в ней сказано, что в июне 2015 года агентство защиты окружающей среды (EPA) и Национальная администрация безопасности дорожного движения (NHTSA) США совместно представили проект новых регламентов по снижению расхода топлива и выбросов парниковых газов новых транспортных средств тяжелого класса, автомобильных тягачей, прицепов и двигателей. В таблице 2 приведены фазы реализации принятых регламентов по топливной экономичности и выбросам CO₂ не только в США, но и в других странах.

Новые стандарты (фаза 2) могут быть применимы для моделей выпуска с 2018 по 2027 год, в качестве основы будут использованы исходные стандарты (фаза 1), охватывающие модели выпуска с 2014 по 2018 год. Разработки, рассмотренные выше относительно предлагаемой фазы 2 регламента США для транспортных средств тяжелого класса для моделей 2018–2027 гг., актуальны для ряда других стран, которые рассматривают подобную политику эффективности.

В 2015 году регламенты по топливной экономичности для транспортных средств тяжелого класса были реализованы на рынках Японии, США, Канады и Китая, охватывающих приблизительно треть мировых продаж транспортных средств. Европа, Индия, Мексика и Южная Корея находятся на различных этапах процессов разработки стандартов топливной экономичности для тяжелого класса.

В настоящее время разрабатываемые стандарты практически во всех перечисленных семи странах и Европе находятся в активной проработке или завершающей стадии внедрения. В указанной работе показано, что в фазе 1 расход дизельного топлива двигателями снизился на 5–9 %, фаза 2 обеспечит дальнейшее снижение еще на 4 % для дизельных двигателей и вместе обе фазы стандарта обеспечат приблизительно 9–12 % снижения расхода топлива моделей 2027 года, по сравнению с моделями 2010 года.

Таблица 2 — Сроки внедрения регламентов топливной экономичности тяжелых грузовиков в разных странах
Table 2 — Timing of implementation of fuel efficiency regulations for heavy trucks in different countries

Страна	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Япония				Фаза 1					Фаза 2					
США				Фаза 1					Фаза 2					
Канада				Фаза 1					Фаза 2					
Китай	Фаза 1			Фаза 2						Фаза 3				
Европа							Наблюдение, сбор информации			Фаза 1				
Индия										Фаза 1				
Мексика										Фаза 1				
Южная Корея										Фаза 1				

Исследования агентств показывают, что для выполнения требований этих стандартов потребуются следующие технологии: снижение трения, уменьшение паразитных потерь, регулируемые фазы газораспределения и улучшение систем рециркуляции отработавших газов, сгорания и впрыска топлива.

Кроме того, агентства предполагают, что до 10 % двигателей грузовиков тяжелого класса могут иметь турбокомпаунд и 15 % двигателей — систему утилизации отработанного тепла к 2027 году. Указанные технологии приведут к удорожанию моделей 2027 года, в сравнении с моделями 2017-го, приблизительно на 1700 долл. США для двигателей тягачей и на 400–500 долл. США для специализированных двигателей.

Там же показано, что предлагаемые стандарты фазы 2 уменьшат выбросы CO₂ с 11 до 24 % у моделей с 2017 до 2027 года. Соответственно, топливная экономичность к 2027 году по этим стандартам при предполагаемых нагрузках будет составлять приблизительно 25 л/100 км по сравнению с 33,6 л/100 км в 2017 году, т. е. расход топлива уменьшится почти на 25%.

Обратившись к опыту Китая [8], обнаруживаем, что в январе 2012 года Министерство промышленности и информационных технологий (МИТ) внедрило 1-й этап стандарта Industry Standard по расходу топлива тяжелых транспортных средств. Этот стандарт регламентирует расход топлива трех категорий КТС: коммерческих грузовиков, седельных тягачей и междугородних автобусов.

Все новые КТС, которые попадают в одну из этих трех категорий, должны отвечать установленным нормам, начиная с июля 2014 г. Эти нормы основаны на расходе топлива транспортных средств 2010–2011 гг. автопарка Китая. Уменьшение расхода топлива, которое МИТ стремится достичь с этим стандартом, относительно небольшое, что является результатом ограниченного опыта, доступного по расходу топлива существующих автопарков.

В тот же год МИТ представило план внедрения National Standard по расходу топлива (этап 2 стандарта), которому необходимо соответствовать с июля 2014 г. для новых моделей и начиная с июля 2015 г. и далее для существующих моделей. Этот стандарт устанавливает нормы расхода топлива пяти категорий транспортных средств массой более 3500 кг: коммерческие грузовики, седельные тягачи, междугородние автобусы, самосвалы и городские автобусы.

Последние две категории не рассматриваются в рамках первого этапа стандарта. В оба этапа не включены специализированные транспортные средства. Для обоих стандартов определены отдельные нормы для вышперечисленных категорий КТС. Кроме того, в рамках каждой категории

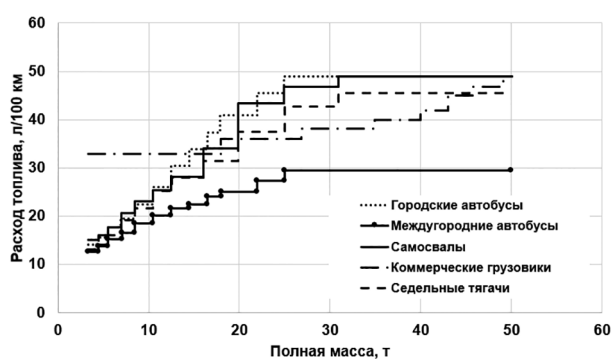


Рисунок 7 — Предельные значения ЭРТ по стандарту Китая, этап 2
Figure 7 — China Standard OFC limit values, step 2

нормы дифференцированы в зависимости от полной массы, как показано для этапа 2 стандарта на рисунке 7.

Для трех категорий, которые включены в этап 1 стандарта (грузовики, седельные тягачи и междугородние автобусы), нормы этапа 2, показанные на этом рисунке, на 10,5–14 % ниже, чем нормы этапа 1. Расход топлива измеряется при проведении динамометрического испытания шасси базового транспортного средства (наиболее тяжелое транспортное средство в каждом классе) и методом имитационного моделирования. Исходные данные могут быть измерены и сообщены производителем, но могут применяться и стандартные значения.

Рассмотрим ситуацию в Российской Федерации в целом и в ПАО «КАМАЗ» в частности с аналогичной нормативной базой. Если выбросы вредных веществ регламентируются соответствующими отечественными и международными стандартами, то в отношении ЭРТ новых нормативных документов со времен СССР не разработано. К слову, в те времена работы выполнялись фрагментарно, не системно. Автопроизводители же в технических условиях указывают только величины контрольного расхода топлива, которые не являются эксплуатационной нормой.

Практикой доказано, что улучшение тягово-скоростных свойств, обеспечиваемое увеличением номинальной мощности, максимального крутящего момента двигателя и передаточного числа главной передачи, приводит к увеличению среднетехнической скорости движения и расхода топлива. И, наоборот, стремление уменьшить расход топлива, например, путем уменьшения передаточного числа главной передачи, приводит к ухудшению тяговых и скоростных свойств. Таким образом, попытка улучшения одного показателя приводит к ухудшению других.

Отмеченная сложность одновременного обеспечения высоких показателей тягово-скоростных свойств и топливной экономичности или поиска компромиссного варианта обусловлена еще и тем, что в отечественном автомобилестроении

они определяются и регламентируются в соответствии с требованиями разных нормативно-технических документов и различным образом зависят от конструктивных параметров КТС. Так, топливная экономичность определяется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54810-2011 «Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний», скоростные свойства — по ГОСТ 22576-90 «Автомобильные транспортные средства. Скоростные свойства. Методы испытаний», установившаяся скорость на подъеме протяженностью 3 км и крутизной 3 %, а также максимальный подъем, преодолеваемый КТС, регламентируются ГОСТ Р 52280-2004 «Автомобили грузовые. Общие технические требования». Ряд показателей (максимальная скорость, время разгона до заданной скорости) указываются в технических условиях завода-изготовителя.

Отметим, что указанные ГОСТы разработаны много лет назад и существенным образом они не перерабатывались. Для обоснования формул приведения результатов испытаний, проводимых при различной температуре окружающей среды, например при +5 °С, по оценке пути выбега и контрольного расхода топлива к нормальным условиям (+20 °С), использовались экспериментальные данные по автомобилям того периода.

Попытка применения этих формул к современным автопоездам не увенчалась успехом. Поясним это примерами. Так, для приведения фактического пути выбега $S_{и'}$, полученного при испытаниях к пути выбега $S_{и}$ при температуре +20 °С, в ГОСТ 22576-90 предлагаются следующие формулы:

$$S_{и} = S_{и'} \frac{1 + K'(t_0 + 30)}{1 + K'(t + 30)}; \quad (3)$$

$$K' = 0,0046 + 0,185 \cdot 10^{-3} m_a, \quad (4)$$

где m_a — полная масса автопоезда, равная 37 т, $K' \approx 0,0115$ — рассчитанный по указанной формуле коэффициент.

Воспользуемся результатами испытаний автопоезда по определению пути выбега $S_{и}$ со скорости 50 и 80 км/ч, выполненными при температуре +5 °С. Испытания проводились при установке двух вариантов шин. Две верхние строки таблицы соответствуют первому варианту. Результаты расчетов приведенного к нормальным атмосферным условиям пути выбега $S_{и}$ сведены в таблице 3.

Анализ полученных результатов показывает, что различие между экспериментальным и приведенным значением пути выбега для одного варианта шин составляет от 1,5 до 14,7 %, а для второго варианта шин — от 12,3 до 21,3 %.

Рассмотрим теперь возможность предложенных в ГОСТ Р 54810-2011 формул приведения расхода топлива, полученных при проведении испытаний $Q_{и'}$ к нормальным условиям $Q_{и}$. Используем формулы (5) и (6) из указанного документа:

Таблица 3 — Сравнение экспериментального и приведенного пути выбега
Table 3 — Comparison of experimental and reduced coasting distance

Начальная скорость выбега, км/ч	Путь выбега $S_{и}$, м при температуре		Приведенный к 20 °С путь выбега $S_{и}$, м	Разница между $S_{и'}$ и $S_{и}$ при 20 °С, %
	5 °С	20 °С		
80	3306	4271	3725	14,7
50	1625	2125	2094	1,5
80	3879	3968	4815	21,3
50	1842	1847	2075	12,3

$$K'' = 2,47 \cdot \left(\frac{N_{e\max}}{m_a} \cdot \frac{U_{тр}}{r_k} \cdot K_p \right)^{1,57} + 0,0023; \quad (5)$$

$$Q_{и} = Q_{и'} \cdot \frac{1 - K''(t_0 - 30)}{1 - K''(t - 30)}. \quad (6)$$

Данные для вычисления коэффициента K'' представлены в таблице 4.

При указанных исходных данных величина $K'' = 910,27$. С помощью нее вычисляются величины $Q_{и}$ приведенного расхода топлива (л/100 км) при движении автопоезда с заданными постоянными скоростями движения v .

Анализ полученных результатов (таблица 5) показывает, что различие между экспериментальными и приведенными величинами расхода топлива для одного варианта шин составляет 250 %. Формулы (3)–(6) приведения пути выбега и расхода топлива по ТХУД к нормальным условиям не обеспечивают приемлемой точности при их практическом применении и требуют уточнения. Для этого потребуется проведение систематических исследований и статистический анализ результатов испытаний КТС различной полной массы, в том числе и с газовыми двигателями, выполненных в последние годы на автополигоне НАМИ. Работы эти должны выполняться при финансовой поддержке государства.

Отметим, что для приведения к нормальным условиям результатов испытаний по магистраль-

Таблица 4 — Исходные данные для вычисления K''
Table 4 — Input data for calculating K''

Параметр	Значение
Полная масса автопоезда m_a , т	37
Температура воздуха во время испытаний t , °С	5
Нормальная температура воздуха t_0 , °С	20
Максимальная мощность двигателя $N_{e\max}$, кВт	338
Радиус качения колеса r_k , м	0,49
Общее передаточное число (для 12-й передачи) $U_{тр}$	2,313

Таблица 5 — Величины экспериментального и приведенного расхода топлива
Table 5 — Experimental and reduced fuel consumption values

v , км/ч	Расход топлива, л/100 км		Разница, %
	при испытаниях $Q_{и}$	приведенный $Q_{п}$	
60	22,2	8,88	250
70	24,3	9,72	
80	26,9	10,76	
90	30,3	12,12	

ному маршруту требуются дополнительные исходные данные (среднее передаточное число трансмиссии, например). По этой причине сравнение в ездовых циклах величин $Q_{и}$ и $Q_{п}$ не проводилось.

Специалистами ПАО «КАМАЗ», других автозаводов и научно-исследовательских институтов предложено множество направлений снижения расхода топлива КТС. Оценка некоторых наиболее эффективных из них показана в работе [9]. Понимая, что кроме перечисленных в указанной статье направлений существует много других факторов и параметров, сформирован расширенный перечень в статье [10], который, однако, не претендует на полноту по причине быстрого развития технологий, особенно в области электроники, систем управления и алгоритмов для них. В этом перечне все факторы и параметры распределены на четыре группы — конструктивные, производственно-технологические, эксплуатационные и организационные.

Анализу и оценке влияния различных факторов на расход топлива и скорость движения посвящены работы [11–14]. Если же обратиться к зарубежным работам, посвященным анализу статистических данных технико-экономических показателей автомобилей, то можно оценить степень соответствия полной массы и номинальной мощности двигателя магистрального автопоезда

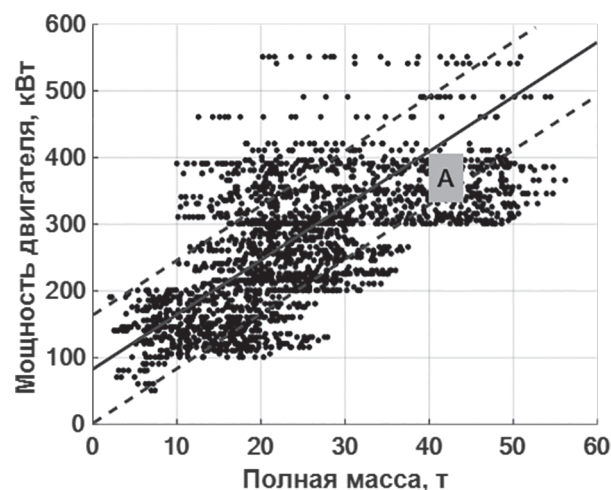


Рисунок 8 — Зависимость мощности двигателя от полной массы КТС

Figure 8 — Dependence of engine power on WV gross weight

КАМАЗ уровню этих показателей зарубежных аналогов.

Из анализа данных рисунка 8 [15] следует, что зависимость номинальной мощности двигателя от полной массы КТС является линейной и удельная мощность автопоезда КАМАЗ близка к среднестатистическим данным по европейским автопоездам. Показатели автопоезда КАМАЗ полной массой от 40 до 44 т на рисунке 8 выделены прямоугольником, обозначенным буквой А. Они находятся в пределах нижней границы 90-процентного доверительного интервала, обозначенного на рисунке пунктирной линией.

Зависимость номинальной мощности (в кВт) от полной массы КТС, рассчитанная по сплошной линии, описывается линейной моделью

$$N_e = 84 + 8,25m_a, \quad (7)$$

где m_a — полная масса, т.

ЭРТ различных КТС сильно зависит от используемого ездового цикла. Эти циклы можно разделить на две категории: стандартные (нормативные) и реальные экспериментальные ездовые циклы, сформированные на основе анализа статистических данных по режимам движения. В первой группе уклон дороги не учитывается, а во второй — учитывается.

Первый метод оценки характеристик КТС заключается в использовании стандартных/нормативных циклов, которые охватывают все режимы работы, включая ускорение, замедление, движение на нейтральной передаче и равномерное движение [16]. Классификация стандартных циклов движения из работы [17], дополненная данными по трем маршрутам автополигона ФГУП НАМИ (три последние строки), как в городском, так и в магистральном режиме, представлена в таблице 6.

Магистральные циклы включают более длительное время в режиме круиз-контроля, в то время как доля времени на нейтральной передаче и замедления выше в городских циклах движения.

За исключением цикла VECTO, который учитывает профиль уклона дороги, другие перечисленные зарубежные стандартные циклы движения не включают уклон дороги. Отметим, что магистральный маршрут в соответствии с РД 37.052.287-92 автополигона включает в себя участки дорог с различным уклоном, в том числе и подъемы малой крутизны. Уклон дороги постоянно меняется в зависимости от расстояния в реальных условиях вождения, что приводит к увеличению доли переходных процессов скорости и крутящего момента в силовой установке. Поэтому очень важно обеспечить и использовать реальные ездовые циклы с учетом уклона дороги, чтобы имитировать переходные процессы в двигателе и точно оценить ЭРТ разработанных КТС.

Таблица 6 — Ездовые циклы для оценки ЭПТ и выбросов
Table 6 — Driving cycles for estimating OFC and emissions

Ездовые циклы	Тип	Средняя скорость, км/ч	Проходимый путь, км	Максимальная скорость, км/ч	Время движения в режиме, %		
					на нейтрالي	круиз	замедления
ННДДТ (ARB) – Transient	Стандартный городской	29,5	4,5	76,7	15,9	30,5	22,5
ННДДТ – Creep	Стандартный городской	6,5	0,2	29,5	39,8	39,4	11,0
CSHVR	Стандартный городской	28,0	10,9	70,6	20,6	27,4	23,3
UDDS – Truck	Стандартный городской	29,9	8,8	92,3	33,3	—	—
ННДДТ-65	Стандартный магистральный	84,6	42,6	107,3	4,5	79,7	7,2
ННДДТ – Cruise	Стандартный магистральный	68,4	37,2	95,0	5,8	77,6	8,6
ННДДТ – High speed	Стандартный магистральный	85,7	16,7	106,6	5,7	66,0	13,3
Long-haul VECTO II	Стандартный магистральный	83,4	100,2	85,0	0,7	90,2	4,2
EPA-55	Стандартный магистральный	79,9	23,3	88,6	0,2	80,8	9,5
EPA-65	Стандартный магистральный	93,6	23,7	104,4	0,2	78,2	10,8
Магистральный ГОСТ	Стандартный магистральный	63,1	4,0	76,3	—	—	49,0
Горный	Типизированный	40,1	19,3	68,1	—	—	47,5
Набережные Челны – Казань – Набережные Челны	Типизированный	83,1	382,8	119,4	—	29,6	32,8
Магистральный по РД 37.052.287-92	Типизированный	67,9	59,3	103,6	—	—	45,2

Расход топлива и выбросы CO₂ взаимосвязаны. Требования для США, ЕС и Китая, заимствованные из работ [17, 18], обобщены на рисунке 9. Этапы 2 и 3 регламента США в сумме обеспечат

сокращение выбросов CO₂ почти на 40 % в 2032 по сравнению с уровнями 2021 года.

В феврале 2023 года Евросоюз объявил о более амбициозных целях по сокращению выбросов CO₂ для тяжелых КТС: 45 % — в 2030 году, 65 % — в 2035 году и 90 % — в 2040 году по сравнению с уровнями 2019 года. Наконец, Китай находится на этапе 3 стандарта по снижению расхода топлива, который применяется ко всем новым тяжелым коммерческим автомобилям с 2021 года с предельным уровнем расхода топлива на 15 % ниже, чем на предыдущем этапе.

Выводы. Детальный анализ зарубежных работ и опыта позволяют определить на концептуальной фазе жизненного цикла «габаритные» параметры магистрального автопоезда — номинальную мощность и крутящий момент двигателя, его рабочий объем, количество ступеней, диапазон и плотность ряда передаточных чисел трансмиссии, получить аналитические выраже-

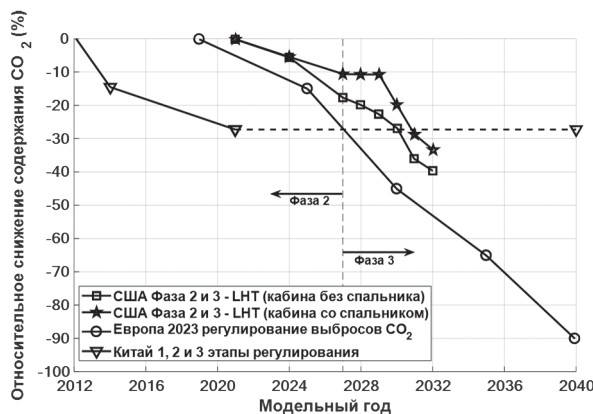


Рисунок 9 — Целевые значения выбросов
Figure 9 — Emission targets

ния между расходом топлива в установившемся режиме и в условиях эксплуатации, выявить линейный характер зависимости номинальной мощности от полной массы КТС.

Некоторые производители для снижения ЭРТ используют двигатели, внешняя скоростная характеристика которых имеет «полки» крутящего момента, причем одна из них — для высшей передачи, а другая — для остальных.

В работе показано, что для достижения ЭРТ магистрального автопоезда 30 л/100 км необходимо обеспечить расход топлива 25 л/100 км в режиме установившегося движения со скоростью 85 км/ч.

Разработанная модель для оценки ЭРТ кроме этого позволяет сфокусировать направления НИОКР предприятия — добиваться повышения топливной экономичности двигателя или снижать силы сопротивления движению с учетом временных и финансовых затрат на мероприятия.

Действующие ГОСТ по оценке показателей скоростных свойств и топливной экономичности КТС требуют актуализации, в том числе применительно к КТС на газовом топливе. Предложенные в них формулы приведения результатов испытаний к нормальным условиям некорректны и требуют уточнения. Предлагаемые показатели и маршруты не в полной мере отражают специфику режимов движения современных КТС в эксплуатационных ездовых циклах и также требуют уточнения. Это государственные задачи и решаться они должны при участии государства.

Важнейшими задачами остаются краткосрочное и долгосрочное планирование мероприятий по уменьшению ЭРТ и выбросов парниковых газов. Нормативные акты и программы в разных странах подталкивают производителей одновременно разрабатывать мероприятия по снижению этих показателей и новые технологии с нулевым уровнем выбросов при финансовой поддержке государства. Назрела необходимость в разработке и реализации аналогичных государственных программ и в странах СНГ.

Для выполнения столь сложных оптимизационных задач все большая роль будет отводиться методам компьютерного моделирования КТС и их компонентов. Количество натуральных испытаний будет уменьшаться, т. к. они нужны в основном для получения исходных данных для моделирования и валидации расчетных моделей. Описанию этих методов будет посвящена вторая часть работы.

Список литературы

- Güntert, S.T. Euro VI challenges for south America / S.T. Güntert // Argentina.gob.ar. — URL: <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2.-south-america-euvi.pdf> (date of access: 03.10.2024).
- Europe's lost decade of truck fuel economy // T&E. — URL: <https://www.transportenvironment.org/articles/europes-lost-decade-truck-fuel-economy> (date of access: 25.07.2024).
- Becker, R. Grosses und neues Caliber / R. Becker // Lastauto Omnibus. — 2022. — Nr. 10. — S. 8–20.
- Becker, R. Grosses und neues Caliber / R. Becker // Lastauto Omnibus. — 2022. — Nr. 11. — S. 28–35.
- Becker, R. Tag der Abrechnung // R. Becker // FERNFAHRER Lastauto Omnibus. — 2024. — Nr. 11. — S. 18–26.
- MAN TG 460 A, Mercedes Actros 1848 LS, Scania R 164 LA 480. Gehobene Ausstattung und 460 PS hieBen diesmal die Bedingungen für den 1000-Punkte-Test // Lastauto Omnibus. — 2001. — Nr. 1. — S. 9–20.
- United States efficiency and greenhouse gas emission regulations for model year 2018–2027 heavy-duty vehicles, engines, and trailers // TransportPolicy.net. — URL: https://www.transportpolicy.net/wp-content/uploads/2017/06/ICCT-update_US-HDV-Ph2-NPRM_jun2015_v2.pdf (date of access: 25.07.2024).
- CO₂ standards and labels for heavy duty vehicles. A comparative analysis of design options // CE Delft. — URL: https://ce.nl/wp-content/uploads/2021/03/CE_Delft_4A94_A_comparative_analysis_of_design_options_DEF_1393586546.pdf (date of access: 25.07.2024).
- Валеев, Д.Х. Пути снижения расхода топлива грузовых автомобилей / Д.Х. Валеев, В.С. Карабцев // Механика машин, механизмов и материалов. — 2014. — № 4(29). — С. 33–39.
- Карабцев, В.С. Оценка увеличения эксплуатационного расхода топлива магистрального автопоезда КАМАЗ в зимних условиях / В.С. Карабцев, Д.Х. Валеев // Грузовик. — 2024. — № 8. — С. 23–30. — DOI: <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2024-8-23-30>.
- Высоцкий, М.С. Топливная экономичность автомобилей и автопоездов / М.С. Высоцкий, Ю.Ю. Бельский, В.В. Московкин. — Минск: Наука и техника, 1984. — 208 с.
- Токарев, А.А. Топливная экономичность и тягово-скоростные качества автомобиля / А.А. Токарев. — М.: Машиностроение, 1982. — 223 с.
- Химченко, А.В. Определение расхода топлива автомобиля в ездовых циклах аналитическими методами / А.В. Химченко, Н.И. Мищенко, В.В. Быков // Двигателестроение. — 2022. — № 4. — С. 40–49.
- Хабибуллозода, Х.Х. Исследование зависимости расхода топлива от массы перевозимого груза при междугородных перевозках / Х.Х. Хабибуллозода, Н.К. Горяев // Вестник СибАДИ. — 2021. — Т. 18, № 3(79). — С. 264–273. — DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-264-273>.
- A roadmap for heavy-duty engine CO₂ standards within the European Union framework // ICCT. — URL: <https://theicct.org/publication/a-roadmap-for-heavy-duty-engine-co2-standards-within-the-european-union-framework/> (date of access: 28.07.2024).
- Prada, D.N. Opportunities for medium and heavy duty vehicle fuel economy improvements through hybridization / D.N. Prada, R. Vijayagopal, V. Costanzo // SAE Technical Paper. — 2021. — DOI: <https://doi.org/10.4271/2021-01-0717>.
- Advances in vehicle and powertrain efficiency of long-haul commercial vehicles: A review / N. Balazadeh Meresht, S. Moghadasi, S. Munshi [et al.] // Energies. — 2023. — Vol. 16, iss. 19. — DOI: <https://doi.org/10.3390/en16196809>.
- Proposed rule: greenhouse gas emissions standards for heavy-duty vehicles — Phase 3 // US EPA. — URL: <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/proposed-rule-greenhouse-gas-emissions-standards-heavy> (date of access: 14.07.2023).

KARABTSEV Vladimir S., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of Design and Research Calculations Department¹

Associate Professor of the Information Systems Department²

E-mail: Vladimir.Karabtsev@kamaz.ru

VALEEV Danis Kh., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Adviser Director General¹

Associate Professor of the Automobiles, Automotive Engines and Design Department²

E-mail: valeev@kamaz.ru

¹KAMAZ PTC, Naberezhnye Chelny, Republic of Tatarstan, Russian Federation

²Naberezhnye Chelny Institute of Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny, Republic of Tatarstan, Russian Federation

Received October 17, 2024.

METHODS AND TOOLS FOR RESEARCH OF TRACTION AND SPEED PROPERTIES AND FUEL EFFICIENCY OF KAMAZ VEHICLES. PART 1

Operational indicators of wheeled vehicles (WV), consumption of fuel and lubricants, urea, speed of cargo delivery, have always been and remain one of the key factors ensuring their high efficiency. To improve the efficiency of WV, specialists of KAMAZ PTC have developed and apply in practice both standardized methods of research of these indicators and original methods with appropriate instrumental support. Design and research departments are equipped with tools for analytical calculations, computer modeling, laboratory-road and operational tests, as well as bench equipment for determining input data for calculation models and their validation. The first part of the paper presents the experience of analytical studies. In the second part, the methods of computational and experimental studies will be outlined.

Keywords: wheeled vehicle, operational fuel consumption, average speed, operating conditions, engine, transmission

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-4-69-39-49>

References

- Güntert S.T. *Euro VI challenges for south America*. Available at: <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2.-south-america-euvi.pdf> (accessed October 3, 2024).
- Europe's lost decade of truck fuel economy*. 2015. Available at: <https://www.transportenvironment.org/articles/europes-lost-decade-truck-fuel-economy> (accessed July 25, 2024).
- Ralf Becker. Grosses und neues Caliber. *Lastauto Omnibus*, 2022, Nr. 10, S. 8–20.
- Ralf Becker. Grosses und neues Caliber. *Lastauto Omnibus*, 2022, Nr. 11, S. 28–35.
- Ralf Becker. Tag der Abrechnung. *FERNFAHRER Lastauto Omnibus*, 2024, Nr. 11, S. 18–26.
- MAN TG 460 A, Mercedes Actros 1848 LS, Scania R 164 LA 480. Gehobene Ausstattung und 460 PS hieBen diesmal die Bedingungen für den 1000-Punkte-Test. *Lastauto Omnibus*, 2001, Nr. 1, S. 9–20.
- United States efficiency and greenhouse gas emission regulations for model year 2018–2027 heavy-duty vehicles, engines, and trailers*. Available at: https://www.transportpolicy.net/wp-content/uploads/2017/06/ICCT-update_US-HDV-Ph2-NPRM_jun2015_v2.pdf (accessed July 25, 2024).
- Aarnink S., Schróten A., van Essen H. *CO₂ standards and labels for heavy duty vehicles. A comparative analysis of design options*. 2013. Available at: https://ce.nl/wp-content/uploads/2021/03/CE_Delft_4A94_A_comparative_analysis_of_design_options_DEF_1393586546.pdf (accessed July 25, 2024).
- Valeev D.Kh., Karabtsev V.S. Puti snizheniya raskhoda topliva gruzovykh avtomobiley [Methods for fuel consumption reduction in commercial vehicles]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2014, no. 4(29), pp. 33–39 (in Russ.).
- Karabtsev V.S., Valeev D.Kh. Otsenka uvelicheniya eksploataatsionnogo raskhoda topliva magistralnogo avtopoezda KAMAZ v zimnikh usloviyakh [Assessment of the increase in operating fuel consumption of a KAMAZ long-haul road train in winter conditions]. *Truck*, 2024, no. 8, pp. 23–30. DOI: <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2024-8-23-30> (in Russ.).
- Vysotskiy M.S., Belenkiy Yu.Yu., Moskovkin V.V. *Toplivnaya ekonomichnost avtomobiley i avtopoezdov* [Fuel efficiency of cars and road trains]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1984. 208 p. (in Russ.).
- Tokarev A.A. *Toplivnaya ekonomichnost i tyagovo-skorostnyye kachestva avtomobilya* [Fuel efficiency and traction and speed qualities of the car]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 223 p. (in Russ.).
- Khimchenko A.V., Mishchenko N.I., Bykov V.V. Opredelenie raskhoda topliva avtomobilya v ezdovykh tsiklakh analiticheskimi metodami [Determination of vehicle fuel consumption in driving cycles by analytical methods]. *Dvigatelistroenie*, 2022, no. 4, pp. 40–49 (in Russ.).
- Khabibullozoda Kh.Kh., Gorjaev N.K. Issledovanie zavisimosti raskhoda topliva ot massy perevoznogo gruzha pri mezhdugorodnykh perevozkakh [Research on dependence of fuel consumption on cargo weight in long-distance transport]. *The Russian automobile and highway industry journal*, 2021, vol. 18, no. 3(79), pp. 264–273. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-264-273> (in Russ.).
- Muncrief R., Rodríguez F. *A roadmap for heavy-duty engine CO₂ standards within the European Union framework*. 2017. Available at: <https://theicct.org/publication/a-roadmap-for-heavy-duty-engine-co2-standards-within-the-european-union-framework/> (accessed July 28, 2024).
- Prada D.N., Vijayagopal R., Costanzo V. *Opportunities for medium and heavy duty vehicle fuel economy improvements through hybridization*. SAE Technical Paper, no. 2021-01-0717, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4271/2021-01-0717>.
- Balazadeh Meresht N., Moghadasi S., Munshi S., Shahbakhhti M., McTaggart-Cowan G. Advances in vehicle and powertrain efficiency of long-haul commercial vehicles: a review. *Energies*, 2023, vol. 16, iss. 19. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16196809>.
- Proposed rule: greenhouse gas emissions standards for heavy-duty vehicles – phase 3*. Available at: <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/proposed-rule-greenhouse-gas-emissions-standards-heavy> (accessed July 14, 2023).