



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 директора ПАО «КАМАЗ»¹

доцент кафедры автомобилей, автомобильных двигателей и дизайна²

E-mail: valeev@kamaz.ru

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

²Набережночелнинский институт 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 2

В первой части работы было показано, что для проведения комплексных исследований показателей тягово-скоростных свойств и топливной экономичности колесных транспортных средств (КТС) специалистами конструкторских и исследовательских подразделений предприятия применяются аналитические расчеты. Во второй части представлен обзор программного обеспечения для компьютерного моделирования указанных свойств, методы оценки коэффициента сложности маршрута, его влияния на эксплуатационные показатели, а также методы оценки нагруженности двигателя и трансмиссии в различных дорожных условиях.

Ключевые слова: колесное транспортное средство, методика, контрольный и эксплуатационный расходы топлива, виртуальные (цифровые) испытания, режимы движения, нагруженность двигателя и трансмиссии

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-1-70-30-42>

Введение. Стоимость и трудоемкость проведения лабораторно-дорожных испытаний серийных и опытных образцов КТС с целью оценки их показателей тягово-скоростных свойств и топливной экономичности всегда были и остаются достаточно высокими. Их высокая стоимость обусловлена необходимостью изготовления объектов испытаний, закупкой испытательного оборудования, строительством или арендой испытательных дорог и сооружений, постоянным ростом цен на топливо. При проведении предварительных или приемочных испытаний опытных образцов КТС

эти затраты будут намного выше, чем при проведении испытаний серийной продукции из-за высокой себестоимости изготовления опытных образцов.

В процессе испытаний на КТС воздействуют не контролируемые исследователем факторы. Изменяются дорожно-климатические условия, шины и механизмы автомобилей имеют различный износ, возможны отклонения в технологии их изготовления, отличия в регулировках систем и механизмов. В связи с этим результаты испытаний одной конкретной модели, выполненные в разное

время, зачастую могут существенно отличаться. Практика показывает, что различие контрольных расходов топлива одной и той же модели КТС может достигать 12...13 %.

Высокие трудоемкость и стоимость проведения испытаний физических объектов стали побудительным мотивом для специалистов к поиску других путей исследования тягово-скоростных свойств и топливной экономичности. Методы математического моделирования процесса движения КТС при различных нагрузках и климатических условиях в сочетании с постоянно возрастающими возможностями компьютерной техники оказались наиболее привлекательными и перспективными направлениями решения практических задач проектирования.

Благодаря меньшей трудоемкости, оперативности и возможности выполнения расчетов автомобилей с различными характеристиками агрегатов, методы математического моделирования становятся альтернативой физическому эксперименту. Применяемые методы виртуальных (цифровых) испытаний позволяют описать различные условия эксплуатации КТС: режим установившегося движения с заданными постоянными скоростями, разгон с места с переключением передач или в заданном интервале скоростей на определенной ступени трансмиссии, моделирование процесса движения по заданному произвольному маршруту или циклу.

При этом точность и адекватность математических моделей, описывающих процессы движения КТС, в значительной степени зависят от полноты и точности исходных данных, с помощью которых можно выполнить валидацию компьютерных моделей.

Виртуальные испытания. Обзор программного обеспечения. Методы виртуальных испытаний с целью согласования конструктивных параметров двигателя и трансмиссии на этапе разработки применяются всеми ведущими производителями КТС. Поставщики комплектующих изделий так же разрабатывают и используют для решения подобных задач специализированное программное обеспечение (ПО). Так, например, изготовители трансмиссий ZF и Allison при проектировании своих агрегатов используют методы компьютерного моделирования КТС в целом для обеспечения взаимного согласования их характеристик.

Математическое моделирование как средство изучения физических объектов и систем путем их замены упрощенными моделями допускает ряд упрощений с сохранением наиболее существенных признаков реальных объектов. При этом в обязательном порядке надо учитывать самые существенные свойства объекта.

Математическая модель, описывающая процесс движения КТС в заданных условиях, состоит из системы обыкновенных дифференциальных

уравнений, логических операций для воспроизведения действий водителя (или автоматизированной системы управления) и исходных экспериментальных данных. Для выполнения расчетов необходимы следующие основные характеристики и параметры:

- внешняя скоростная характеристика двигателя;
- многопараметровая характеристика двигателя (МПХ);
- передаточные числа трансмиссии;
- радиус качения шин и их момент инерции;
- моменты инерции элементов трансмиссии и двигателя;
- потери (механические, гидравлические) в агрегатах трансмиссии;
- коэффициент сопротивления качению шин и его зависимость от скорости;
- коэффициент аэродинамического сопротивления КТС;
- лобовая площадь;
- скорость ветра и температура окружающей среды;
- сила сопротивления движению КТС при движении на повороте, на дорогах с профильными неровностями, на деформируемых поверхностях, при боковом ветре;
- механические потери в двигателе (ДВС) и потери на привод вспомогательного оборудования.

Кроме того, необходима информация о продольном профиле маршрута, типе и состоянии дорожного покрытия, характеристиках топлива и ряд других параметров.

Система уравнений для описания процесса движения КТС выглядит так:

$$\begin{cases} m \cdot \delta \cdot \frac{dV}{dt} = a_k \cdot V^2 + b_k \cdot V + c_k, \\ \frac{dS}{dt} = V \cdot \cos \alpha, \end{cases} \quad (1)$$

где α — угол наклона продольного профиля дороги; S — пройденный транспортным средством путь, м; V — скорость движения, м/с; δ — коэффициент учета вращающихся масс; t — текущее время, с; a_k, b_k, c_k — постоянные коэффициенты при фиксированном передаточном отношении трансмиссии.

Система уравнений решается известными методами интегрирования. Коэффициенты a_k, b_k, c_k определяются суммированием (с учетом знаков) коэффициентов полинома, аппроксимирующего внешнюю скоростную характеристику двигателя и коэффициентов полиномов, описывающих внешние силы сопротивления движению транспортного средства.

Так, например, время движения T и пройденный путь S на заданной передаче в режиме разгона определяются по выражениям:

$$T = \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{a_k \cdot V^2 + b_k \cdot V + c_k}; \quad (2)$$

$$S = \int_{V_1}^{V_2} \frac{V \cdot dV}{a_k \cdot V^2 + b_k \cdot V + c_k}, \quad (3)$$

где V_1 и V_2 — начальная и конечная скорости участка.

Количество израсходованного при этом топлива рассчитывается по формуле:

$$Q = \int_{V_1}^{V_2} \frac{Q(V) \cdot dV}{a_k \cdot V^2 + b_k \cdot V + c_k}, \quad (4)$$

где $Q(V)$ — часовой расход топлива по внешней скоростной характеристике ДВС. Для других режимов движения формулы аналогичны, однако будут изменяться начальные условия и степень нажатия на педаль управления подачей топлива.

На рынке ПО существуют различные инструменты моделирования контрольного (КРТ) и эксплуатационного расхода топлива (ЭРТ). Одним из них является программный комплекс ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator) [1]. Основное меню программы приведено на рисунке 1, а окно ввода исходных данных в соответствии с работой [2] — на рисунке 2. Опыт применения данной программы в отечественной практике описан в статье [3].

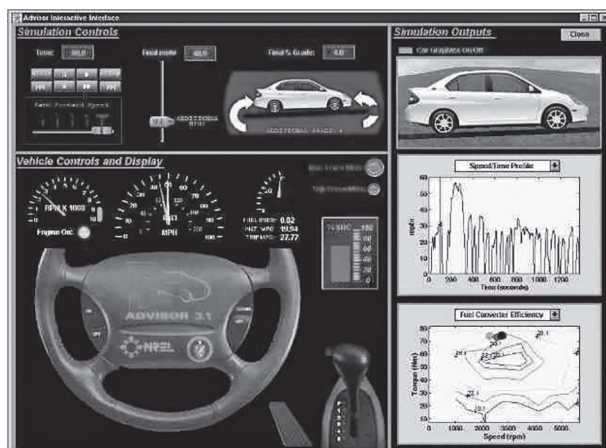


Рисунок 1 — Интерфейс программы
Figure 1 — Program interface

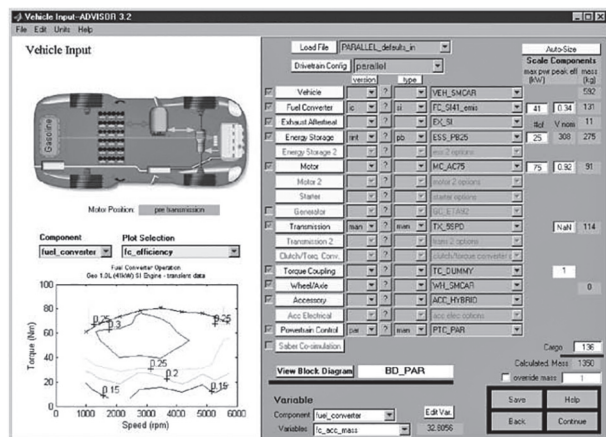


Рисунок 2 — Окно ввода данных
Figure 2 — Data input window

В разработанном ПО используются стандартные инструменты и библиотеки из широко известного и применяемого для оценки различных показателей КТС пакета программ MATLAB&Simulink. Совместное использование ADVISOR и MATLAB&Simulink позволяет выполнять оценку основных показателей проектируемых КТС: тягово-скоростных характеристик; расхода топлива в режиме установившегося движения; ЭРТ при движении по различным стандартизованным маршрутам, выбросов вредных веществ с отработавшими газами. Кроме того, с помощью данного инструмента можно выполнять оптимизацию алгоритмов систем управления энергопотреблением (на отопление, освещение), согласование передаточных чисел трансмиссии и характеристик двигателей, причем работающих не только на традиционных видах топлива, но и гибридных и электрических энергоустановок.

Для определения расхода топлива и выбросов CO_2 в Евросоюзе (ЕС) применяется методика моделирования транспортного средства с использованием результатов тестирования компонентов. В качестве инструмента моделирования выступает программное обеспечение VECTO — общедоступная компьютерная программа, которая включает два рабочих режима: декларативный и инженерный [4]. В декларативном режиме все универсальные данные, нагрузки, параметры модели водителя и ездовые циклы используются автоматически, по умолчанию для конкретной категории транспортного средства. В инженерном режиме пользователь обладает большей гибкостью для выбора и изменения всех граничных условий моделирования, а также и основополагающих допущений для моделирования конкретных компонентов.

Для заданных ездового цикла и нагрузки транспортного средства в VECTO используются характеристики компонентов, полученные во время сертификационных испытаний. Эти данные являются входными параметрами для моделирования продольной динамики КТС. Среди них следует выделить характеристики: двигателя, трансмиссии, ведущего моста, аэродинамическое сопротивление, шин, вспомогательного оборудования и транспортного средства в целом. Для каждой группы компонентов требуется несколько вводимых параметров для построения соответствующих математических моделей компонентов. Графический интерфейс пользователя представлен на рисунке 3.

Данный инструмент находит все большее применение среди исследователей различных стран, о чем свидетельствуют работы китайских специалистов [5], отечественных ученых [6] и исследователей ЕС [7].

В США широко используется инструмент моделирования транспортного средства GEM (Greenhouse Emission Model), который разработан

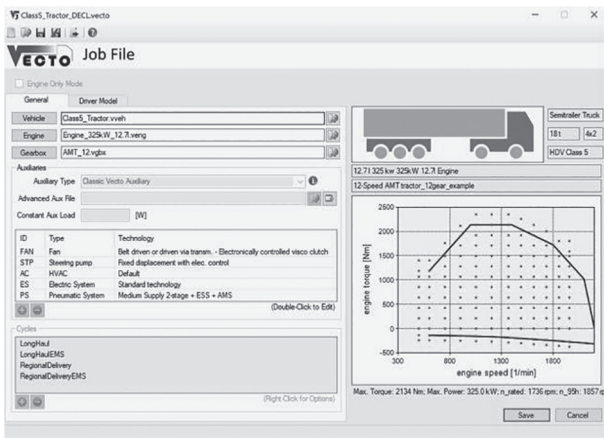


Рисунок 3 — Интерфейс программы VECTO
Figure 3 — Interface of the VECTO program

Агентством по защите окружающей среды (EPA) и Национальной администрацией по безопасности дорожного движения (NHTSA) в процессе реализации этапов 1 и 2 стандарта на выбросы парниковых газов для тяжелых КТС. Методологии декларирования выбросов (которые зависят от ЭРТ) CO₂ для тяжелых КТС в ЕС и США похожи, поскольку они основаны на совместном применении результатов тестирования компонентов и моделирования транспортного средства. В работе [8] приведено описание инструмента GEM, а также дан анализ сходства и различий между GEM и VECTO. Архитектура программы GEM приведена на рисунке 4.

Также как и в программном обеспечении VECTO, модель КТС в ПО GEM позволяет рассчитать параметры продольной динамики КТС. Моделирование расхода топлива и выбросов CO₂ осуществляется с помощью параметров, определяемых пользователем, или встроенных параметров. Входные данные, определяемые пользователем с целью описания транспортного средства, практически те же, что и в VECTO. Однако в GEM отсутствует графический интерфейс пользователя, т. к. программа GEM разработана с использованием инструментов MATLAB&Simulink.

В программе VECTO для оценки выбросов и ЭРТ используются пять различных ездовых циклов с соответствующими профилями скорости: Urban Delivery, Regional Delivery, Long Haul, Municipal Utility and Construction.

В программе GEM для этих целей используются три ездовых цикла: ARB Transient (неустановившийся), 55 миль/ч (88,5 км/ч) и 65 миль/ч (104,6 км/ч), с уклоном. Первый из них — на горизонтальной дороге, задан функцией скорости от времени. Два других цикла описывают изменение уклонов в зависимости от пройденного расстояния при движении КТС с заданной постоянной скоростью 55 или 65 миль/ч.

Кроме указанного ПО, широкое распространение для расчетных исследований показателей тягово-скоростных свойств и топливной экономич-

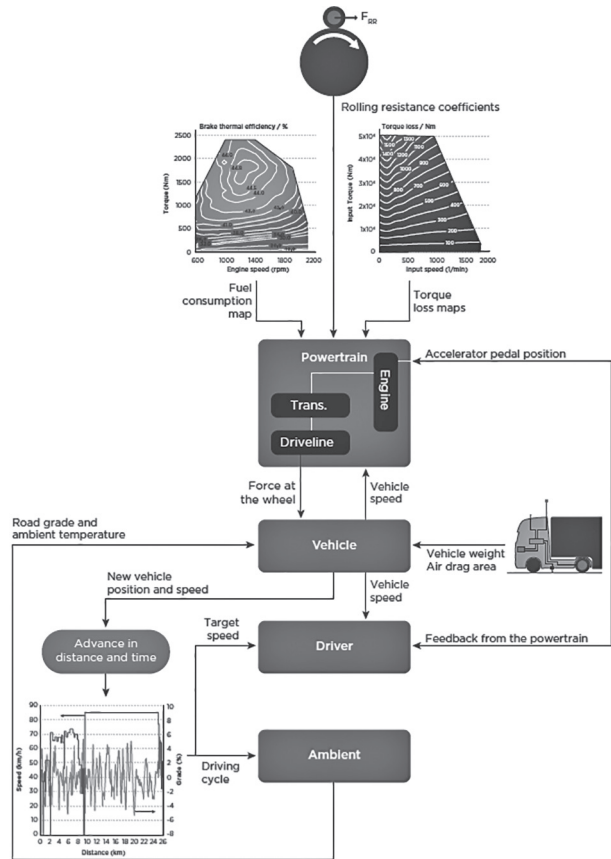


Рисунок 4 — Архитектура программы GEM
Figure 4 — Architecture of the GEM program

ности получили такие известные программные продукты, как GT-SUITE (Gamma Technologies), AmeSim (SimCenter, Siemens), CRUISE M (AVL). В качестве входных и выходных параметров в этих продуктах используются практически те же параметры, что и в перечисленных выше, поэтому на них в данной работе останавливаться не будем.

Отечественным ПО для решения задач по улучшению топливной экономичности методами математического моделирования является программа MVC [9], разработанная группой специалистов ФГУП «НАМИ» под руководством В.В. Москвитина. Ее интерфейс представлен на рисунке 5.

Экспериментальным методом исследований показателей топливной экономичности и выбросов CO₂ посвящена работа [10], анализ междуна-



Рисунок 5 — Интерфейс программы MVC
Figure 5 — Interface of the MVC program

родных требований в отношении этих показателей представлен в статье [11].

На основе выполненного обзора устанавливаем, что в мировой практике разработаны и применяются различные программные продукты для оценки ЭРТ и выбросов CO₂. В отечественной практике (и в других странах СНГ) выбор инструментов для выполнения подобных расчетов пока небольшой. Хочется надеяться, что предпринимаемые в последние годы усилия по разработке отечественного ПО для различных направлений исследований увенчаются успехом.

Далее рассмотрим, какие дополнительные характеристики можно определить с помощью цифровых испытаний. Начнем с анализа режимов работы ДВС.

Определение диапазонов работы ДВС. Результаты расчетных исследований, выполненные в ПАО «КАМАЗ» с помощью программы Amesim (Simcenter, Siemens), в очередной раз подтвердили установленные зарубежными специалистами закономерности и показали, что ЭРТ в условиях эксплуатации автомобилей очень сильно зависит от дорожных условий, которые характеризуются продольным профилем, типом и состоянием дорожного покрытия, планом трассы, шириной проезжей части, а также скоростью, интенсивностью и плотностью движения, составом транспортного потока, количеством и продолжительностью остановок, количеством циклов разгона и замедления, видимостью и другими факторами. Экспериментальными исследованиями также подтверждено, что расход топлива грузовых автомобилей возрастает до 1,5 раз на горном марш-

руте по сравнению с магистральным на автополигоне ФГУП «НАМИ».

Среди перечисленных факторов, оказывающих наибольшее влияние на ЭРТ, следует выделить тип и состояние дорожного покрытия и рельеф местности, т. к. именно от этих факторов зависит сила сопротивления со стороны дороги. Эта сила вместе с другими внешними силами сопротивления, в свою очередь, определяет требуемую величину крутящего момента двигателя и его частоту вращения, что позволяет определить диапазоны работы двигателя на МПХ. Эти диапазоны наглядно показывают, насколько близко они расположены к области минимального удельного расхода топлива. Чем ближе, тем лучше, в идеале — чтобы они совпадали.

Для анализа согласованности режимов работы ДВС с кинематическими параметрами трансмиссии и обработки результатов расчетов и испытаний разработана специальная программа в среде MATLAB. Данная программа позволяет определить диапазоны работы двигателя автомобиля в условиях эксплуатации. Алгоритм работы программы следующий.

1. Для каждого момента времени фиксируются величины крутящего момента и частоты вращения коленчатого вала двигателя (рисунок 6, этап 1). Этапы от 1 до 7 обозначены арабскими цифрами в нижней части соответствующего элемента рисунка.

2. Полученный массив значений разделяется на ячейки с учетом диапазона работы двигателя. Границы ячеек определяются исследователем, в зависимости от диапазонов частот вращения и крутящего момента (этап 2).

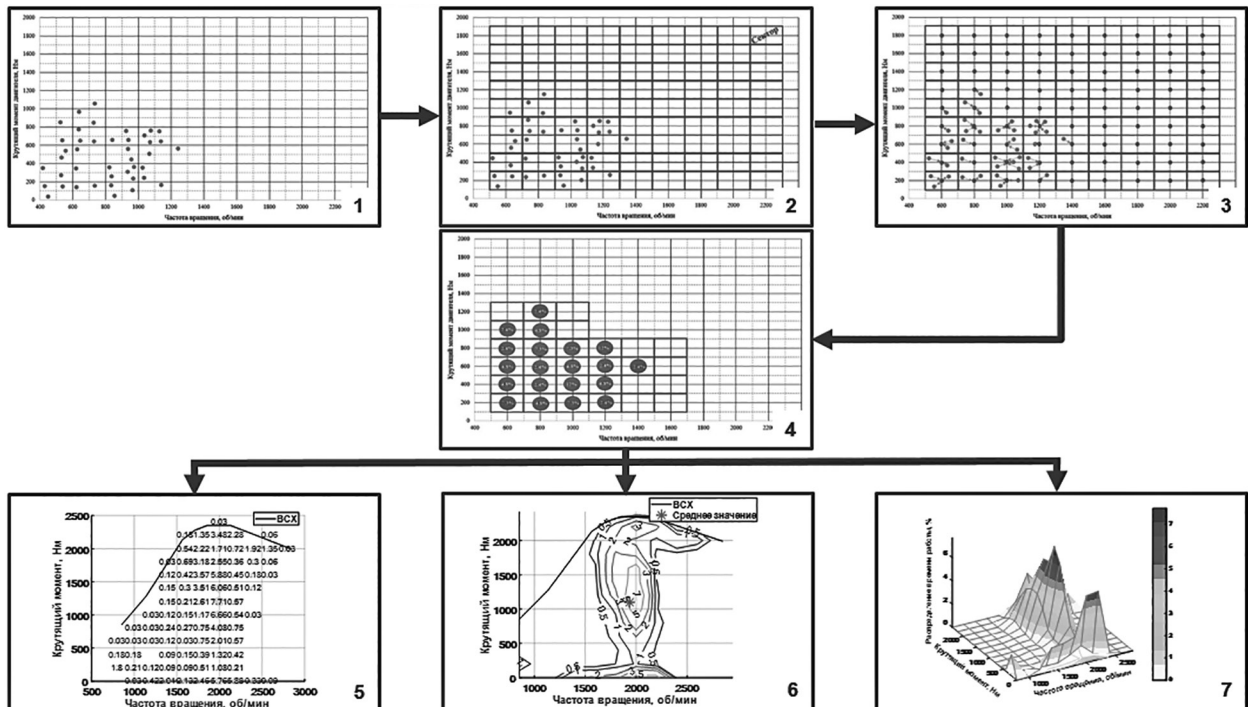


Рисунок 6 — Этапы определения диапазонов работы двигателя
Figure 6 — Steps for determining engine operating ranges

3. Определяется количество точек в каждой ячейке (этап 3) и вычисляется их отношение в процентах к общему количеству точек (этап 4).

4. По полученным отношениям формируется распределение времени работы двигателя (диапазоны) трех видов: в виде пузырьковой диаграммы (этап 5); в виде 3D-графика (этап 6); в форме 2D-графика (этап 7).

Полученные диапазоны позволяют визуализировать режимы работы ДВС и оценить совершенство конструкции КТС, с учетом сложности маршрута.

Для оценки сложности маршрута предлагается использовать достаточно простой коэффициент сложности, к определению которого и приступим.

Определение коэффициента сложности маршрута. Формализованное описание всего многообразия условий эксплуатации различных КТС — задача сложная. Подробный обзор применяемых формул для оценки так называемого измерителя пересеченности продольного профиля можно найти в работе [12]. В этом измерителе учитываются средние длина и крутизна подъемов и спусков конкретного маршрута, но вместе с тем для описания различных маршрутов используются четыре константы a , b , c и d , применение которых нам кажется недостаточно обоснованным. В книге [13] для оценки сложности маршрута движения специализированных КТС предлагается использовать комплексный критерий, который кроме параметров профиля учитывает и коэффициент сопротивления качению шин. Этот критерий также включает в себя шесть констант: $a = 0,5$; $b = 0,5$; $c = 0,25$; $d = 0,5$; $e = 0,1$; $f = 0,5$. Их применение для различных условий также требует проверки.

Поэтому для определения коэффициента сложности маршрута нами предлагается использовать коэффициент h_{cp} , вычисление которого производится следующим образом. С помощью сервиса Openrouteservice Maps [14] непосредственно на карте формируется маршрут движения от начальной до конечной точки. Затем загружается массив точек, описывающих данный маршрут в координатах долготы, широты и высоты. С помощью этих координат точек можно рассчитать уклон для каждого участка дороги по формуле:

$$i = \frac{\Delta h}{l} \cdot 100, \% \quad (5)$$

где Δh — разница высот между двумя соседними точками; l — расстояние между этими точками. Длина l участка маршрута рассчитывается по формуле гаверсинусов:

$$l = 2 \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos \phi_1 \cdot \cos \phi_2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta \lambda}{2} \right)} \right) \cdot r_3, \quad (6)$$

где ϕ_1 и ϕ_2 — широта двух точек; $\Delta \lambda$ — разница координат по долготе; r_3 — радиус земли, км. Раз-

ница высот между соседними точками маршрута для подстановки в формулу (5) рассчитывается по выражению:

$$\Delta h = h_2 - h_1,$$

где h_1 и h_2 — высота над уровнем моря первой и второй точки, м.

Коэффициент сложности маршрута определяется по формуле:

$$h^+ = \frac{\sum \Delta h^+}{S} \text{ и } h^- = \frac{\sum |\Delta h^-|}{S}, \quad h_{cp} = \frac{h^+ + h^-}{2}, \quad (7)$$

где Δh^+ — положительные разницы высот, м; Δh^- — отрицательные разницы высот, м; S — протяженность маршрута, км; h_{cp} — коэффициент сложности маршрута. В дальнейшем планируется уточнить этот коэффициент для возможности учета извилистости маршрута и изменения скорости на поворотах.

Для оценки влияния коэффициента сложности маршрута на эксплуатационные показатели автопоезда выполнена серия виртуальных испытаний. При проведении расчетов использовалась модель автопоезда, разработанная в программном продукте Amesim. Расчеты были проведены при следующих условиях: полная масса автопоезда — 36 т; максимальная разрешенная скорость на всех маршрутах ограничена 88 км/ч; расчеты проводились для идеальных погодных и дорожных условий; не учитывалась извилистость дорог. Для проведения расчетов были выбраны 10 маршрутов. Названия маршрутов, их протяженность, эксплуатационные показатели автопоезда и средний коэффициент сложности h_{cp} приведены в таблице.

Из таблицы следует, что коэффициент сложности выбранных маршрутов изменяется в довольно широком диапазоне — от 1,26 (номер 10) до 7,49 (номер 4), т. е. практически в 6 раз. В результате расчетов были определены ЭРТ, средняя скорость автопоезда и диапазоны работы двигателя. Рассмотрим для сравнения результаты расчетов на самом легком, самом сложном и на среднем по сложности маршруте. В качестве третьего маршрута возьмем маршрут № 2 с коэффициентом 3,98.

На рисунке 7 приведены рассчитанные распределения уклонов на рассматриваемых маршрутах. По рисунку видно, что 93 % протяженности маршрута № 10 составляют участки с почти нулевым уклоном; 3,2 % / 3,9 % составляют подъемы / спуски с уклоном ≈ 2 %. Около 60 % протяженности маршрута № 2 составляют участки с уклоном ≈ 0 %; 16 % / 17 % — подъемы / спуски с уклоном ≈ 2 %; 4 % / 3 % — подъемы / спуски с уклоном ≈ 4 %.

Маршрут № 4 содержит 43 % участков с уклоном ≈ 0 %; 19 % / 22 % — составляют подъемы / спуски с уклоном ≈ 2 %; 7 % / 6 % — подъемы / спуски с уклоном ≈ 4 %; 2 % / 1 % — подъемы / спуски с уклоном ≈ 6 %. По приведенным распределениям видно, что предложенный коэффициент однозначно и корректно характеризует его сложность.

Таблица — Перечень маршрутов и эксплуатационные показатели КТС
Table — List of routes and WV operational indicators

| № | Маршрут движения | Средняя скорость, км/ч | Расход топлива, л/100 км | Средняя частота вращения, об/мин | Средний крутящий момент, Н·м | h_{cp} |
|----|--------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------|
| 1 | Екатеринбург – Сургут | 87,6 | 25,4 | 1086 | 842 | 2,41 |
| 2 | Н.Челны – Архангельск | 86,6 | 27,5 | 1086 | 901 | 3,98 |
| 3 | Н.Челны – Волгоград | 85,1 | 30,0 | 1084 | 966 | 5,98 |
| 4 | Н.Челны – Екатеринбург | 82,9 | 32,1 | 1085 | 1006 | 7,49 |
| 5 | Н.Челны – Казань | 83,8 | 32,0 | 1091 | 1013 | 6,35 |
| 6 | Н.Челны – Москва | 85,4 | 29,7 | 1087 | 964 | 5,28 |
| 7 | Н.Челны – Ростов-на-Дону | 85,0 | 29,4 | 1085 | 945 | 5,62 |
| 8 | Н.Челны – Ухта | 86,6 | 28,1 | 1083 | 924 | 4,40 |
| 9 | Н.Челны – Челябинск | 82,2 | 31,8 | 1098 | 983 | 7,47 |
| 10 | Челябинск – Омск | 87,9 | 24,9 | 1086 | 836 | 1,26 |

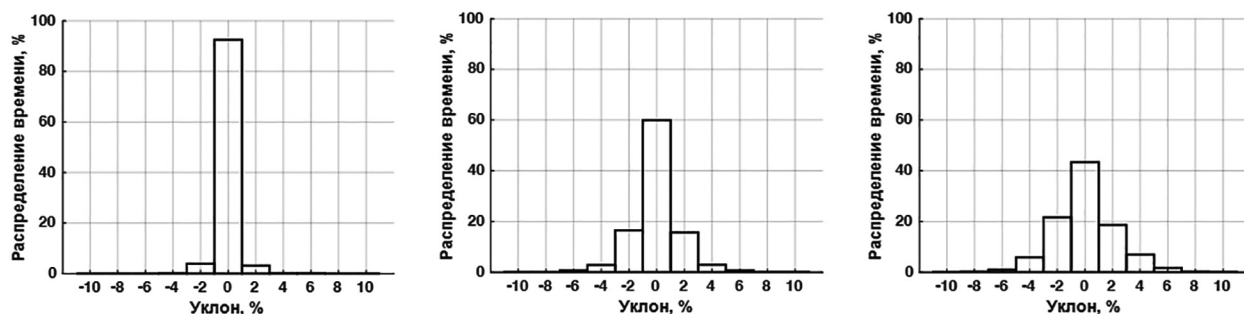


Рисунок 7 — Распределение уклонов на маршрутах: а — № 10; б — № 2; с — № 4
Figure 7 — Distribution of slopes on the routes: a — no. 10; b — no. 2; c — no. 4

Рассмотрим для сравнения диапазоны работы двигателя автопоезда на маршрутах № 2, 4 и 10 (рисунок 8). Двигатель автопоезда на всех маршрутах движения эксплуатируется в средних диапазонах частот вращения.

Поэтому будем рассматривать только диапазоны по крутящему моменту двигателя. На самом легком маршруте № 10 двигатель автопоезда практически все время (81,4 % от суммарного времени) работает в среднем диапазоне крутящего момента. На более сложном маршруте № 2 двигатель также работает достаточно длительный отрезок времени (46,8 %) в среднем диапазоне крутящего момента. В этом случае происходит перераспределение режимов работы и появляются диапазоны работы двигателя с минимальным (30,4 % времени) и максимальным (15,9 % при средних и 4,4 % при малых оборотах) крутящими моментами.

На самом сложном маршруте № 4 двигатель больше всего работает в диапазоне с максимальным (27 и 12,4 %) и минимальным (29,5 %) крутящим моментом. В результате расчетов установлено, что на легком маршруте ДВС автомобиля большую часть времени эксплуатируется со средней нагрузкой, а на сложных маршрутах — с высокой и низкой, т. е. на не экономичных режимах. Водителю автопоезда на холмистых участках при-

ходит чаще тормозить и разгоняться, что приводит к увеличению ЭРТ. Расход топлива автопоезда на самом сложном маршруте № 4 на 14 % больше, чем на маршруте № 2, и на 22 % больше, чем на самом легком маршруте № 10. Продольный профиль дороги влияет и на среднюю скорость автопоезда. Средняя скорость на маршруте № 4 на 5 % меньше, чем на маршруте № 2, и на 6 % меньше, чем на маршруте № 10.

Анализ результатов расчетов на всех маршрутах позволил выявить линейную зависимость среднего расхода топлива автомобиля и среднего крутящего момента двигателя от коэффициента сложности маршрута. Зависимость средней скорости КТС от этого коэффициента является квадратичной. Отмечаются значительные отклонения средней частоты вращения коленчатого вала от линейного тренда. Результаты расчетов отражены на рисунке 9.

В аналитической форме указанные зависимости таковы:

- для средней скорости автопоезда от коэффициента сложности маршрута

$$V = -0,122 \cdot h_{cp} \cdot h_{cp} + 0,204 \cdot h_{cp} + 87,838; \quad (8)$$

- для среднего расхода топлива автопоезда

$$Q = 1,244 \cdot h_{cp} + 22,84; \quad (9)$$

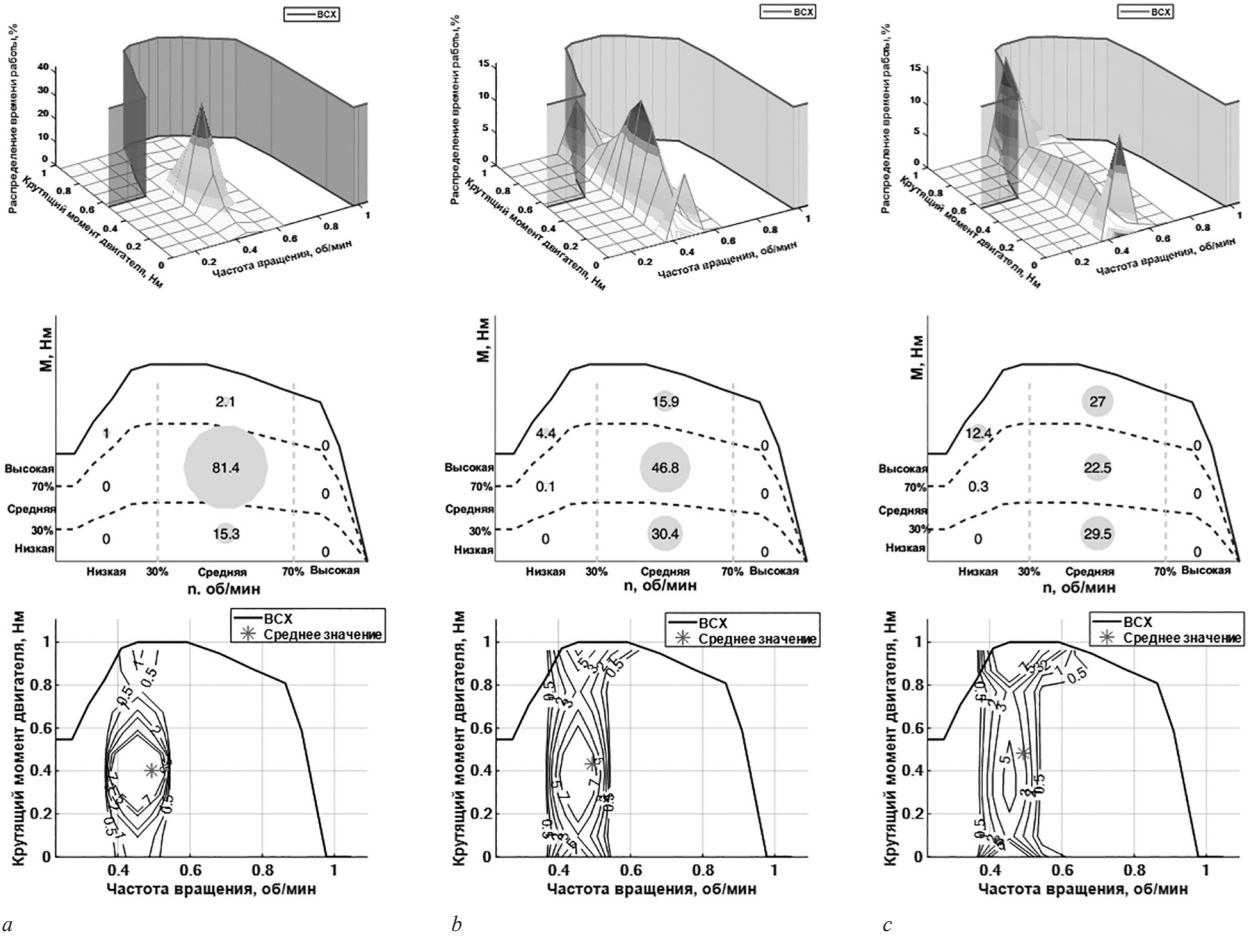


Рисунок 8 — Диапазоны работы двигателя на маршрутах: а — № 10; б — № 2; с — № 4
 Figure 8 — Engine operation ranges on routes: a — no. 10; b — no. 2; c — no. 4

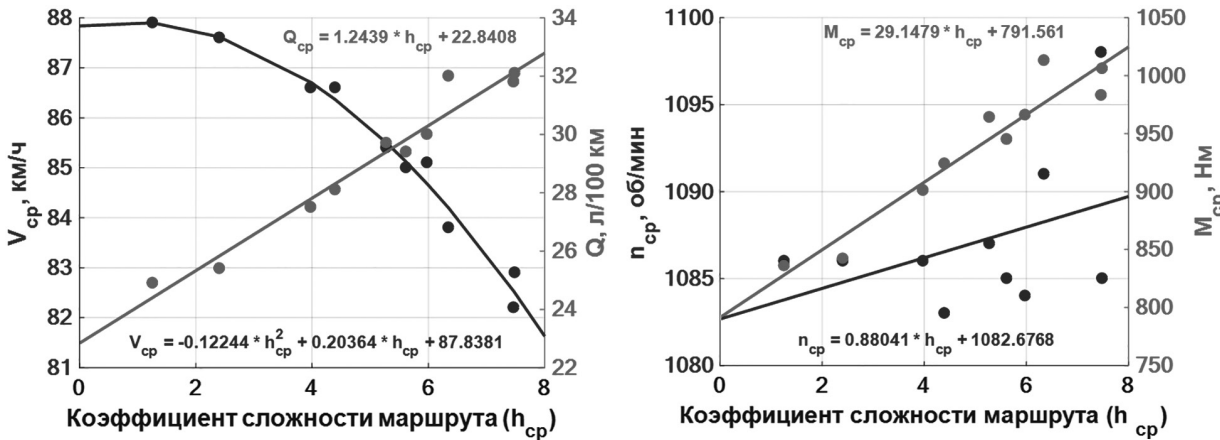


Рисунок 9 — Зависимости средних: скорости, расхода топлива, частоты вращения и крутящего момента от коэффициента сложности маршрута
 Figure 9 — Dependencies of average: speed, fuel consumption, rotational speed and torque on route difficulty factor

- для среднего крутящего момента двигателя

$$M_{cp} = 29,15 \cdot h_{cp} + 791,6. \quad (10)$$

Таким образом, предлагаемый коэффициент сложности h_{cp} позволяет количественно, одним числовым значением оценивать сложность маршрутов, сравнивать их друг с другом и устанавливать их влияние на эксплуатационные показатели КТС. Полученные результаты расчетов помогают

сделать вывод о том, что диапазоны работы двигателя и нагрузка на него существенным образом зависят от коэффициента сложности маршрута движения автопоезда. А от нагрузки на двигатель, в свою очередь, зависит расход топлива. Так, например, при увеличении коэффициента сложности h_{cp} на 25 % (в интервале от 4 до 5) средняя скорость автопоезда уменьшается на 0,8 %, а расход топлива увеличивается на 4,5 %.

Отметим, что результаты расчетов могут незначительно отличаться от результатов натурных испытаний в связи с тем, что в расчетных моделях не учитывались изменения погодных условий, состояние дороги, человеческий фактор, плотность транспортного потока.

Виртуальные испытания позволяют оценить не только ЭРТ, но и контрольные расходы топлива (КРТ) при скорости 60 и 80 км/ч. Совмещение результатов расчетов нескольких моделей КТС колесной формулы 6×4 различной полной массы (от 15 до 40 т) на одном графике показывает ее влияние на эти показатели.

Так, приведенные на рисунке 10 данные позволяют установить следующие линейные зависимости от полной массы:

$$Q_{60} = 0,53 \cdot m + 5,9; \tag{11}$$

$$Q_{80} = 0,59 \cdot m + 9,7, \tag{12}$$

где Q_{60} и Q_{80} — КРТ при скорости 60 и 80 км/ч соответственно, л/100 км; m — полная масса, т. Полученные графики показывают, что КРТ практически всех КТС расположены в непосредственной близости от линий трендов. И только КРТ одного транспортного средства полной массой 28 т на 1,0 л/100 км расположен ниже линий трендов.

Определение нагруженности трансмиссии.

До сих пор мы рассматривали возможности расчетных исследований по оценке КРТ и ЭРТ. Не менее важна информация о нагруженности агрегатов, получаемая в процессе натурных испытаний по оценке ЭРТ. Продемонстрируем на двух примерах, каким образом, используя одни и те же данные, можно оценить нагруженность трансмиссии. В первом случае оценка нагруженности трансмиссии производится с использованием экспериментальных данных, полученных при проведении испытаний на полигоне или в условиях реальной эксплуатации.

Для этого рассчитываются время движения на каждой из используемых передач, количество

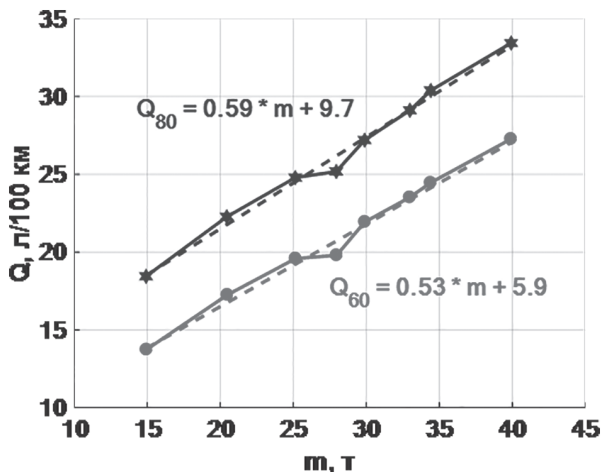


Рисунок 10 — Зависимость КРТ от полной массы КТС
Figure 10 — Dependence of reference fuel consumption on GW gross weight

переключений передач вверх и вниз, частота вращения и крутящий момент на каждой из передач, их распределения и другие статистические параметры (рисунок 11).

На рисунке 11 показано распределение времени движения на каждой из передач трансмиссии магистрального автопоезда при движении по магистральному маршруту. Эти данные о нагруженности трансмиссии необходимы для формирования нагрузочных режимов стендовых испытаний, а также могут использоваться для выполнения расчетов по оценке прочности деталей трансмиссии с использованием соответствующих инструментов и конечно-элементных моделей.

В качестве второго примера рассмотрим распределение крутящего момента применительно к отдельным ступеням трансмиссии (рисунок 12) автомобиля колесной формулой 6×6 полной массой 32 т при его эксплуатации на горном маршруте автополигона ФГУП «НАМИ». В левой части рисунка представлено распределение крутящего момента на входе в раздаточную коробку, в правой части рисунка — на полуоси заднего ведущего моста автомобиля. Выделив на каждой из передач черными кружочками максимальные значения крутящего момента и затем соединив их, получим кривые, которые аппроксимируются уравнениями вида:

$$M = 0,000769 \cdot n^2 - 3,797 \cdot n + 5809; \tag{13}$$

$$M = 0,1375 \cdot n^2 - 120,525 \cdot n + 32726, \tag{14}$$

где n — частота вращения входного вала раздаточной коробки в уравнении (13) и частота вращения полуоси в уравнении (14).

Кроме того, анализ полученных распределений свидетельствует о наличии обратно пропорциональной зависимости между величинами

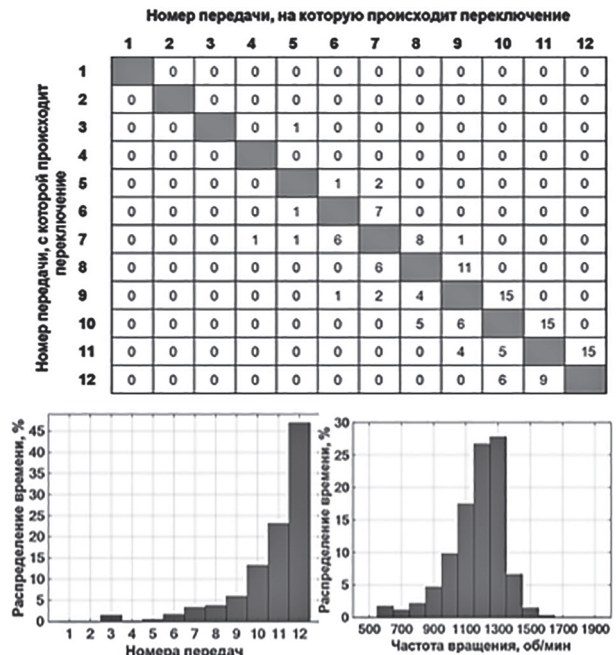


Рисунок 11 — Статистические параметры
Figure 11 — Statistical parameters

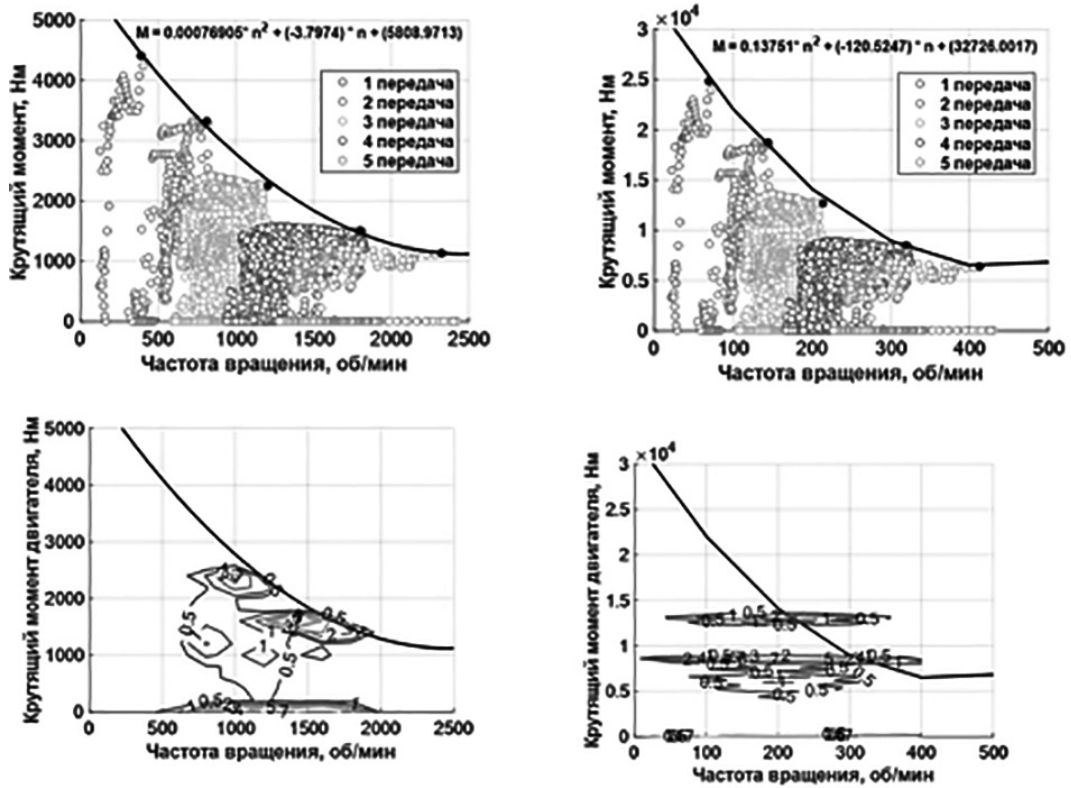


Рисунок 12 — Распределение крутящего момента применительно к отдельным ступеням трансмиссии
Figure 12 — Torque distribution in relation to individual transmission stages

максимального крутящего момента M и частоты вращения n .

Мощностной и топливный балансы. Методика определения составляющих мощностного и топливного балансов изложена в работах [15, 16] и многих других, поэтому здесь на ней не акцентируем внимание и приводим окончательные результаты расчетов.

Уравнение мощностного баланса используем в таком виде:

$$N_{\text{тхуд}} = N_{\text{но}} + N_{\text{т}} + N_{\text{ш}} + N_{\text{а}}, \quad (15)$$

где $N_{\text{тхуд}}$ — суммарная мощность, определяемая по топливной характеристике установившегося движения; $N_{\text{но}}$, $N_{\text{т}}$, $N_{\text{ш}}$, $N_{\text{а}}$ — затраты мощности на привод навесного оборудования, преодоления потерь в трансмиссии, в шинах и аэродинамического сопротивления, соответственно. Мощност-

ной баланс одного из магистральных автопоездов КАМАЗ представлен на рисунке 13.

Топливный баланс рассчитан с использованием эффективных показателей двигателя и следующих выражений:

$$Q = Q_{\text{но}} + Q_{\text{т}} + Q_{\text{а}} + Q_{\text{ш}}; \quad (16)$$

$$Q = \frac{N_{\text{но}}}{N_{\text{тхуд}}} \cdot Q + \frac{N_{\text{т}}}{N_{\text{тхуд}}} \cdot Q + \frac{N_{\text{а}}}{N_{\text{тхуд}}} \cdot Q + \frac{N_{\text{ш}}}{N_{\text{тхуд}}} \cdot Q, \quad (17)$$

где $N_{\text{тхуд}}$ — суммарная мощность сопротивления в режиме установившегося движения; Q — суммарный расход топлива при фиксированной скорости движения, л/100 км; $Q_{\text{но}}$, $Q_{\text{т}}$, $Q_{\text{а}}$, $Q_{\text{ш}}$ — расходы топлива на привод навесного оборудования, привод трансмиссии, преодоление аэродинамического сопротивления и потерь в шинах. В графической форме топливный баланс указанного

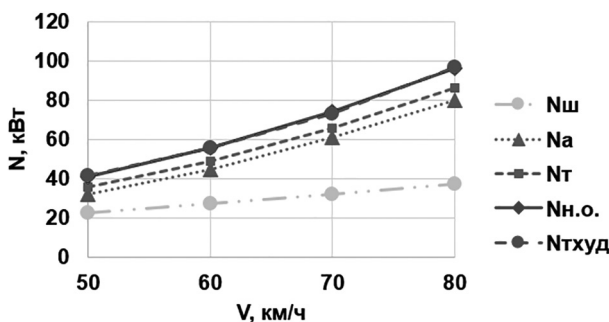


Рисунок 13 — Мощностной баланс
Figure 13 — Power balance

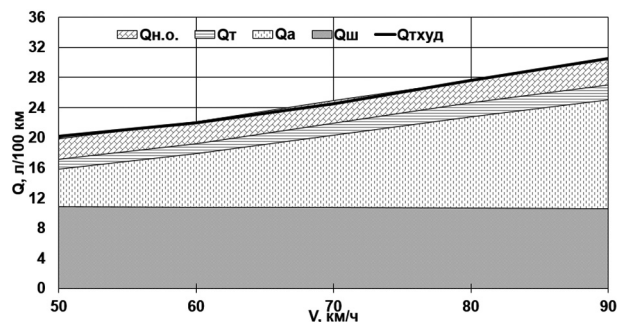


Рисунок 14 — Топливный баланс
Figure 14 — Fuel balance

выше транспортного средства приведен на рисунке 14.

Представленные графики показывают, что при больших скоростях движения наибольшее влияние на расход топлива оказывает аэродинамическое сопротивление, при малых — сопротивление качению шин. Топливный баланс позволяет выявить резервы снижения расхода топлива, является простым и доступным инструментом анализа эффективности конструкторских мероприятий и выбора приоритетных направлений научно-исследовательских работ предприятия.

Выводы. На основе выполненного обзора устанавливаем, что в мировой практике разработаны и применяются различные программные продукты для оценки ЭРТ и выбросов CO₂. Отечественные программные продукты, предназначенные для выполнения аналогичных расчетов, не обеспечивают полноту спектра выходных параметров. Необходима консолидация усилий ученых, инженеров и программистов для ускоренного развития отечественного ПО.

Для оценки диапазонов работы и согласованности режимов работы ДВС с кинематическими параметрами трансмиссии в условиях эксплуатации и обработки результатов расчетов и испытаний создана специальная программа в среде MATLAB. В отечественном программном обеспечении целесообразно предусмотреть расчет аналогичных параметров.

Разработана методика оценки коэффициента сложности маршрута и его влияния на эксплуатационные показатели КТС. Методика апробирована на 10 маршрутах, коэффициент сложности которых изменяется от 1,26 до 7,49. Показано, что при увеличении коэффициента сложности h_{cp} на 25 % (в интервале от 4 до 5) средняя скорость автопоезда уменьшается на 0,8 %, а расход топлива, наоборот, увеличивается на 4,5 %.

Расход топлива автопоезда на самом сложном маршруте на 14 % больше, чем на среднем по сложности маршруте и на 22 % больше, чем на самом легком маршруте. Анализ результатов расчетов эксплуатационных показателей на выбранных маршрутах позволил выявить линейную зависимость среднего расхода топлива КТС и среднего крутящего момента двигателя от коэффициента сложности маршрута. Зависимость средней скорости от этого коэффициента является квадратичной.

Виртуальные испытания позволяют оценить не только ЭРТ, но и КРТ при скорости движения 60 или 80 км/ч. Совмещение результатов расчетов нескольких моделей КТС колесной формулы 6×4 различной полной массы на одном графике позволяет установить линейную зависимость КРТ от полной массы в указанном диапазоне ее изменения.

Для оценки нагруженности трансмиссии разработано специальное приложение, использующее полученные при проведении испытаний (или

в условиях реальной эксплуатации) экспериментальные величины крутящего момента и частоты вращения коленчатого вала двигателя с целью расчета их распределений.

Кроме того, рассчитываются время движения на каждой из используемых передач, количество переключений передач вверх и вниз, частота вращения и крутящий момент на каждой из передач и другие статистические параметры и закономерности. Например, выявлена обратно пропорциональная зависимость между величинами максимального крутящего момента M и частоты вращения n на входе в раздаточную коробку и на полуоси автомобиля колесной формулы 6×6.

Топливный баланс позволяет определить резервы снижения расхода топлива, является простым и доступным инструментом анализа эффективности конструкторских мероприятий и обоснованного выбора приоритетных направлений научно-исследовательских работ предприятия.

Список литературы

1. ADVISOR Advanced Vehicle Simulator // ADVISOR. — URL: <https://adv-vehicle-sim.sourceforge.net> (date of access: 26.10.2024).
2. ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling / T. Markel, A. Brooker, T. Hendricks [et al.] // Journal of Power Sources. — 2002. — Vol. 110, iss. 2. — P. 255–266. — DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00189-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00189-1).
3. Смирнов, П.И. Применение среды виртуального моделирования ADVISOR для оценки топливной экономичности и характеристик движения автомобилей / П.И. Смирнов // Современные материалы, техника и технологии. — 2017. — № 7(15). — С. 92–97.
4. Rodrigues, F. Fuel consumption simulation of HDVs in the EU: comparison and limitation / F. Rodrigues // EU's HDV CO₂ declaration and VECTO / F. Rodrigues. — ICCT, 2018. — P. 3–9.
5. Fuel consumption comparison of heavy-duty commercial vehicles under CHTC and C-WTVC cycles based on VECTO / L. Wu, X. Wang, X. Jing [et al.] // E3S Web Conf.: 2022 8th International Symposium on Vehicle Emission Supervision and Environment Protection (VESEP2022). — 2022. — Vol. 360. — 14 p. — DOI: <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202236001009>.
6. Теренченко, А.С. Оценка выбросов CO₂ грузовым автомобилем КАМАЗ-54901 с использованием методологии директивы ЕС 2017/2400 / А.С. Теренченко, А.С. Стряпунин // Труды НАМИ. — 2023. — № 4(295). — С. 61–68. — DOI: <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2023-4-61-68>.
7. Weller, K. Emission performance of N3 HDVs based on chassis dyno tests / K. Weller, S. Hausberger. — Graz: FWT, 2021. — 24 p.
8. Franco, V. Heavy-duty vehicle fuel-efficiency simulation: a comparison of US and EU tools / V. Franco, O. Delgado, R. Muncrief // International Council on Clean Transportation. — 2015. — URL: <https://theicct.org/publication/heavy-duty-vehicle-fuel-efficiency-simulation-a-comparison-of-us-and-eu-tools/> (date of access: 26.10.2024).
9. ООО «Научно-технический центр расчетных исследований» [сайт]. — 2019. — URL: <https://mvc-auto.ru/> (дата обращения: 26.10.2024).
10. CHTC与C-WTVC工况油耗和排放的试验研究 / 宋子钰, 陶云飞, 张晖 [等.] // 汽车技术. — 2020. — 6期. — P. 51–57. = Experimental research on fuel consumption and emission of CHTC and C-WTVC / S. Ziyu, Y. Tao, H. Zhang [et al.] // Automobile Technology. — 2020. — Vol. 6. — P. 51–57.
11. Теренченко, А.С. Современные международные требования по ограничению выбросов диоксида углерода и расхода топлива транспортными средствами / А.С. Теренченко, С.А. Аникеев // Транспорт на альтернативном топливе. — 2022. — № 1(85). — С. 60–65.

12. Нефедов, А.С. Планирование эксперимента и моделирование при исследовании эксплуатационных свойств автомобилей / А.С. Нефедов, Л.Н. Высочин. — Львов: Вища шк.; Изд-во Львовского ун-та, 1976. — 160 с.
13. Грифф, М.И. Основы создания и развития автотранспорта для строительства: учеб. пособие / М.И. Грифф. — М.: АСВ, 2003. — 143 с.
14. ORS Maps. — URL: <https://maps.openrouteservice.org> (date of access: 25.11.2024).
15. Гуров, М.Н. Формула топливного баланса автомобиля / М.Н. Гуров, В.В. Московкин // Транспорт на альтернативном топливе. — 2012. — № 3(27). — С. 58–61.
16. Петрушов В.А. Автомобили и автопоезда: Новые технологии исследования сопротивлений качения и воздуха / В.А. Петрушов. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2008. — 351 с.

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 2

In the first part of the work it was shown that analytical calculations are used by the specialists of design and research departments of the enterprise to conduct comprehensive studies of traction and speed properties and fuel efficiency of wheeled vehicles (WV). The second part presents a review of software for computer modeling of these properties, methods for estimating the route complexity factor, its impact on performance, as well as methods for estimating engine and transmission loading in various road conditions.

Keywords: wheeled vehicle, methodology, reference and operational fuel consumption, virtual (digital) tests, driving modes, engine and transmission loading

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-1-70-30-42>

References

1. *ADVISOR advanced vehicle simulator*. Available at: <https://adv-vehicle-sim.sourceforge.net> (accessed October 26, 2024).
2. Markel T., et al. ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling. *Journal of power sources*, 2002, vol. 110, iss. 2, pp. 255–266. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00189-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00189-1).
3. Smirnov P.I. Primenenie sredy virtualnogo modelirovaniya ADVISOR dlya otsenki toplivnoy ekonomichnosti i kharakteristik dvizheniya avtomobiley [Using the ADVISOR virtual simulation environment to evaluate fuel efficiency and vehicle movement characteristics]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2017, no. 7(15), pp. 92–97 (in Russ.).
4. Rodrigues F. EU's HDV CO₂ declaration and VECTO. *Fuel consumption simulation of HDVs in the EU: comparison and limitation*, 2018, pp. 3–9.
5. Wu L., Wang X., Jing X., Wu C., Gao T., Li T. Fuel consumption comparison of heavy-duty commercial vehicles under CHTC and C-WTVC cycles based on VECTO. *E3S web of conferences: 2022 8th international symposium on vehicle emission supervision and environment protection (VESEP2022)*, 2022, vol. 360. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236001009>.
6. Terenchenko A.S., Stryapunin A.S. Otsenka vybrosov CO₂ gruzovym avtomobilem KAMAZ-54901 s ispolzovaniem metodologii direktivy ES 2017/2400 [Estimation of CO₂ emissions from KAMAZ-54901 truck with the use of Regulation (EU) 2017/2400 methodology]. *Trudy NAMI*, 2023, no. 4(295), pp. 61–68. DOI: <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2023-4-61-68> (in Russ.).
7. Weller K., Hausberger S. *Emission performance of N3 HDVs based on chassis dyno tests*. Graz, FWT, 2021. 24 p.
8. Franco V., Delgado O., Muncief R. *Heavy-duty vehicle fuel-efficiency simulation: a comparison of US and EU tools*. 2015. Available at: <https://theicct.org/publication/heavy-duty-vehicle-fuel-efficiency-simulation-a-comparison-of-us-and-eu-tools/> (accessed October 26, 2024).
9. OOO “Nauchno-tekhnicheskiy tsentr raschetnykh issledovaniy” [OOO “Scientific and Technical Center for Computa-

- tional Research”]. 2019. Available at: <https://mvc-auto.ru/> (accessed October 26, 2024) (in Russ.).
10. Song Z., Tao Y., Zhang H., Liu D., Jiang L. Experimental research on fuel consumption and emission of CHTC and C-WTVC. *Automobile technology*, 2020, vol. 6, pp. 51–57 (in Chinese).
 11. Terenchenko A.S., Anikeev S.A. Sovremennye mezhdunarodnye trebovaniya po ogranicheniyu vybrosov dioksida ugleroda i raskhoda topliva transportnymi sredstvami [Modern international requirements for limiting carbon dioxide emissions and fuel consumption by vehicles]. *Transport na alternativnom toplive*, 2022, no. 1(85), pp. 60–65 (in Russ.).
 12. Nefedov A.S., Vysochin L.N. *Planirovanie eksperimenta i modelirovanie pri issledovanii ekspluatatsionnykh svoystv avtomobiley* [Experimental planning and modeling in the study of the operational properties of cars]. Lviv, Vysshaya shkola Publ., Lvovskiy universitet Publ., 1976. 160 p. (in Russ.).
 13. Griff M.I. *Osnovy sozdaniya i razvitiya avtotransporta dlya stroitelstva* [Fundamentals of the creation and development of vehicles for construction]. Moscow, ASV Publ., 2003. 143 p. (in Russ.).
 14. *ORS maps*. Available at: <https://maps.openrouteservice.org> (accessed November 25, 2024).
 15. Gurov M.N., Moskovkin V.V. Formula toplivnogo balansa avtomobilya [Car fuel balance formula]. *Transport na alternativnom toplive*, 2012, no. 3(27), pp. 58–61 (in Russ.).
 16. Petrushov V.A. *Avtomobili i avtopoezda: Noveye tekhnologii issledovaniya soprotivleniy kacheniya i vozdukha* [Cars and road trains: New technologies for the study of rolling and air resistance]. Moscow, TORUS PRESS Publ., 2008. 351 p. (in Russ.).