

Машины и Установки проектирование, разработка и эксплуатация

Сетевое издание
МОО "Стратегия объединения"
<http://maplants-journal.ru>

Ссылка на статью:

//Машины и установки: проектирование,
разработка и эксплуатация.

Электрон. журн. 2025. № 3. С. 44 – 60

DOI:

Представлена в редакцию: 05.09.2025

Принята к публикации: 22.09.2025

© МОО «Стратегия объединения»

УДК 629.331

Исследование топливной экономичности легкового автомобиля в различных стилях вождения в условиях городского движения

Чечулин А.И.,
Шаболин М.Л.,*
Сафонов Б.А.

* shabolin@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, Россия)

В статье приводятся результаты сравнительного исследования расхода топлива при реальной эксплуатации автомобиля по городскому маршруту при движении в спокойном и агрессивном стиле вождения. Приведена разработанная математическая модель прямолинейного движения автомобиля и результаты моделирования на основе данных, собранных при реальной эксплуатации. Разработанная модель снабжена ограничителем ускорений и замедлений так, чтобы итоговые ускорения не превышали по модулю $1,5 \text{ м/с}^2$. Проведено сравнение расхода топлива при реальной эксплуатации автомобиля, при моделировании на основе собранных данных и при моделировании с ограничением ускорения.

Ключевые слова: топливная экономичность, легковой автомобиль, стиль вождения, городской режим движения, расход топлива, телематика.

Введение

В условиях растущего внимания к вопросам экологической безопасности и экономии ресурсов, исследование топливной экономичности автомобилей становится все более актуальным. Снижение расхода топлива позволяет не только сократить эксплуатационные расходы, но и уменьшить выбросы вредных веществ в атмосферу, что способствует улучшению экологической ситуации.

Для достижения поставленной цели были рассмотрены научные работы в области способов повышения топливной экономичности, что позволило выявить основные тенденции и подходы к исследованию данной проблематики. В рамках работы была разработана математическая модель движения, что обеспечило возможность сравнения затраченной в ходе каждой из поездок энергии. Кроме того, был проведен сбор и анализ данных при реальной эксплуатации легкового автомобиля.

Одним из основных факторов, влияющих на топливную экономичность, определен рациональный выбор стиля вождения. Для того, чтобы водитель мог рационально выбирать стиль вождения в той или иной ситуации на дороге, ему необходимо обладать достаточной квалификацией и опытом. В работе [1] авторы посвящают основную часть работы оценке мастерства водителя. Авторы предлагают математическую модель, которая по ряду вводимых критериев будет сравнивать качество навыков вождения водителя с так называемым «идеальным» водителем.

Авторы предлагают при тестировании водителей транспортных средств вводить оценку по данной модели и на ее основании подбирать персональный план обучения. К основным критериям оценки авторы относят следующие:

- 1) эффективный пуск двигателя, без продолжительной работы стартера;
 - 2) трогание и начало движения (без работы на холостом ходу, без задержек, интенсивно, но без пробуксовки);
 - 3) эффективный разгон автомобиля с поддержанием оптимальной частоты вращения коленчатого вала;
 - 4) движение с постоянной скоростью, без необоснованных разгонов и торможений;
 - 5) поддержка оптимальной частоты вращения коленчатого вала;
 - 6) максимум движения на высшей передаче;
 - 7) минимум движения на промежуточных передачах;
 - 8) умение при переключении передач не допускать выхода из оптимального диапазона частоты вращения коленчатого вала;
 - 9) при необходимости повышения скорости - выбор ускорения в пределах 0,9-1,5 м/с²;
 - 10) при необходимости снижения скорости выбор замедления в пределах 1,1-1,4 м/с²;
 - 11) отсутствие необоснованных перестроений и маневров во время движения;
 - 12) скорость движения, не превышающая верхнего оптимального предела 90-110 км/ч;
 - 13) максимальное использование торможения двигателем для снижения скорости, без применения рабочего тормоза;
 - 14) рациональное преодоление подъёмов (с разгона, без переключения передач);
 - 15) рациональное преодоление спусков (например, накатом, при необходимости применяя торможение двигателем на пониженной передаче);
 - 16) ограничение до минимума работы двигателя в режиме холостого хода на стоянках.
- Авторы утверждают, что рациональное, с точки зрения топливной экономичности, движение (мастерство водителя), может обеспечивать до 25% экономии.

Расход топлива при реальной эксплуатации легкового автомобиля на различных режимах движения по заданному маршруту

Для анализа топливной экономичности были проведены два экспериментальных заезда на различных режимах движения по заданному маршруту.

Так как современные легковые автомобили предлагают водителю выбрать режим движения, меняющий алгоритм работы КП, скорость отклика рулевого управления и реакцию на нажатие педали газа, самостоятельно, оба заезда были проведены в одном режиме: «Спорт». Данный режим позволил сохранить за водителем выбор плавности набора скорости. Передачи КП переключались в автоматическом режиме.

Требования к режимам движения

В ранее проведенном исследовании [2], в качестве режимов движения задавался стиль вождения: спокойный и агрессивный. Спокойный стиль вождения характеризуется движением с плавными ускорениями и торможениями и движением со скоростью потока машин. Агрессивный стиль характеризуется резкими ускорениями и торможениями, попытками успеть на догорающий сигнал светофора, частой сменой полос движения.

Из результатов работы мы знаем, что спокойный стиль вождения является более экономичным в сравнении с агрессивным. В приведенной работе при движении в спокойном стиле вождения часовой расход топлива составил 3,2 л/час при времени прохождения маршрута 41 минута 36 секунд. В то время, как при движении в агрессивном стиле расход составил 4,3 л/час, а время прохождения 38 минут 36 секунд.

В связи с этим для оценки топливной экономичности в данной работе зададимся приведенными стилями вождения, как примерами экономичного и не экономичного движения.

При формировании требований к водителю, в каждом из заездов, были введены ограничения:

Первый заезд (агрессивный стиль вождения):

- 1) преодолеть маршрут как можно быстрее, не нарушая ПДД;
- 2) при возможности менять полосу движения на более свободную;
- 3) при возможности успевать проехать на догорающий сигнал светофора.

Второй заезд (спокойный стиль вождения):

- 1) использовать движение накатом, когда это возможно;
- 2) минимизировать случаи экстренного торможения;
- 3) при необходимости повышения скорости задавать ускорения в диапазоне от 0,9 до 1,5 м/с²;
- 4) при необходимости снижения скорости задавать замедление в пределах 1,1-1,4 м/с²;
- 5) избегать необоснованных перестроений и маневров во время движения;
- 6) при возможности полагаться на торможение двигателем для снижения скорости без применения рабочего тормоза.

Сбор данных

В исследовании сбор данных проходил на автомобиле, оснащенном блоком телематики, который позволяет фиксировать скорость движения и количество поступившего в систему впрыска топлива с интервалом в 1 секунду. Блок телематики через CAN-шину получает данные о количестве поступившего воздуха и сравнивает его с заданным коэффициентом избытка воздуха. На основании полученных данных формируется значение поступившего количества топлива в 1/1 000 000 доле литра. Эти значения отправляются в облачное хранилище и могут быть получены при формировании отчета.

После проведения экспериментальных заездов был сформирован отчет со значениями, записанными блоком телематики во время поездки.

Помимо этого, в ходе прохождения маршрута к автомобилю был подключен диагностический сканер, что позволило записать номер включенной передачи в соответствующую секунду движения.

Для дальнейшей оценки силы, затраченной на преодоление силы тяжести, также были записаны значения координаты положения и высоты над уровнем моря в каждую из секунд движения транспортного средства.

Экспериментальные заезды

Два экспериментальных заезда проводились по одному заданному маршруту протяженностью 12,5 км. Маршрут был выбран таким образом, чтобы включать в себя дорожные условия городского движения: городские улицы с частыми остановками и ускорениями (рисунок 1). На рисунке также приведены участки с разгонами, замедлениями и ускорениями, по модулю превышающими $1,5 \text{ м/с}^2$, применяемые в ходе движения по маршруту для спокойного и агрессивного режимов движения. Ускорения оценивались ретроспективно, на основании полученных данных о скорости в каждую секунду каждого из заездов.

Во время прохождения маршрута температура окружающей среды составляла около 7°C ; скорость ветра 2 м/с ; атмосферное давление 739 мм. рт. ст. ; влажность 47% .

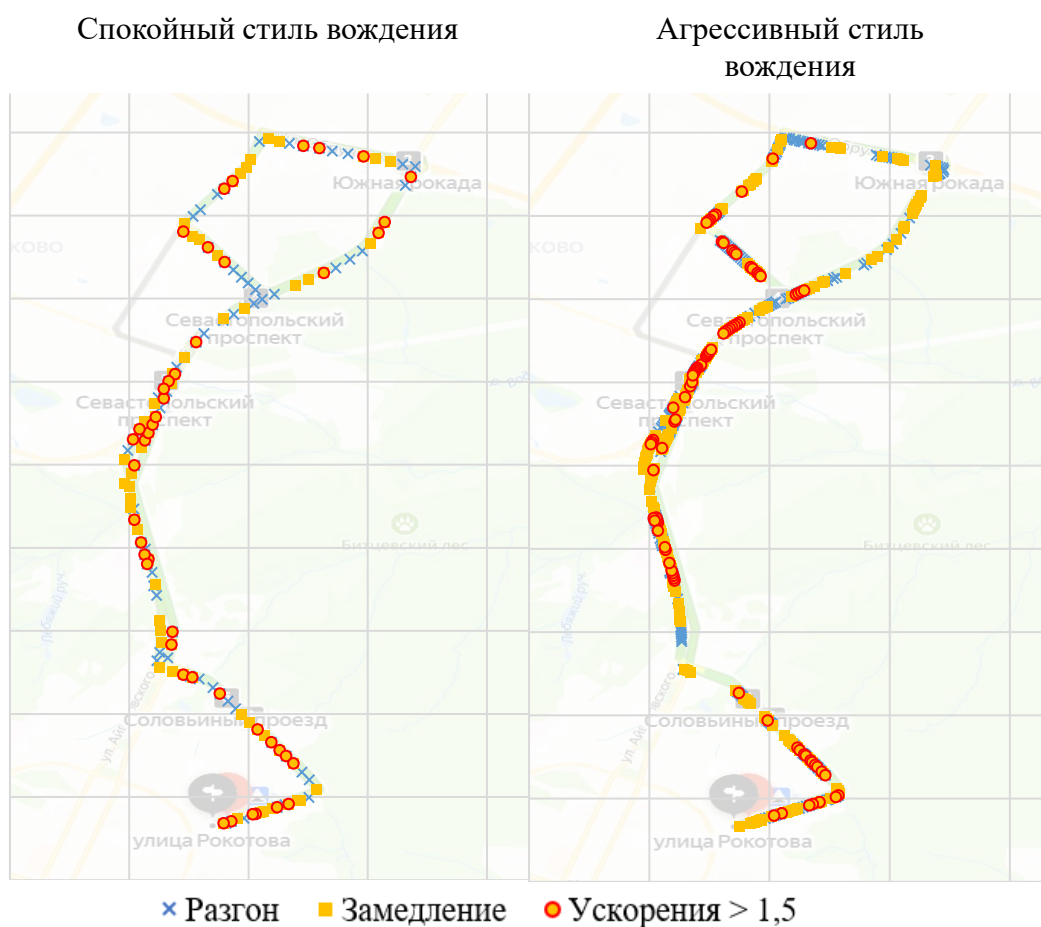


Рис. 1. Маршрут движения в экспериментальных заездах

В таблице 1 приведена характеристика каждой из поездок.

Таблица 1. Характеристика поездок

Стиль вождения	Количество разгонов	Количество замедлений	Ускорения $> 1,5 \text{ м/с}^2$
Спокойный	71	66	45
Агрессивный	188	224	87

Также были зафиксированы значения скорости, координаты, высоты над уровнем моря и номера включённой передачи. Зависимости скорости и ускорений от времени в спокойном и агрессивном режимах приведены на рисунках 2 и 3.

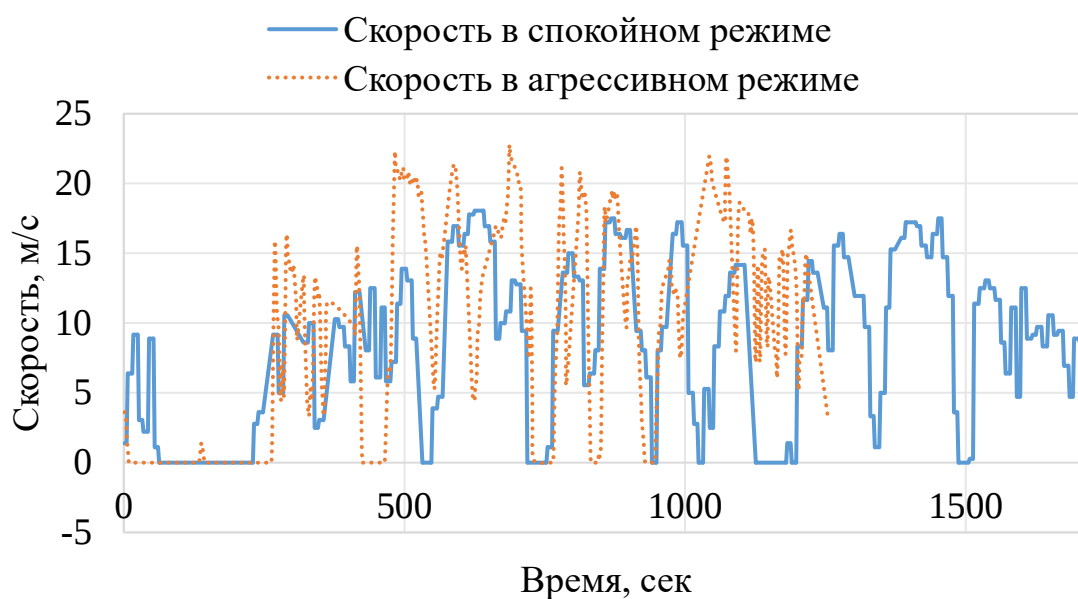


Рис. 2. Графики скорости

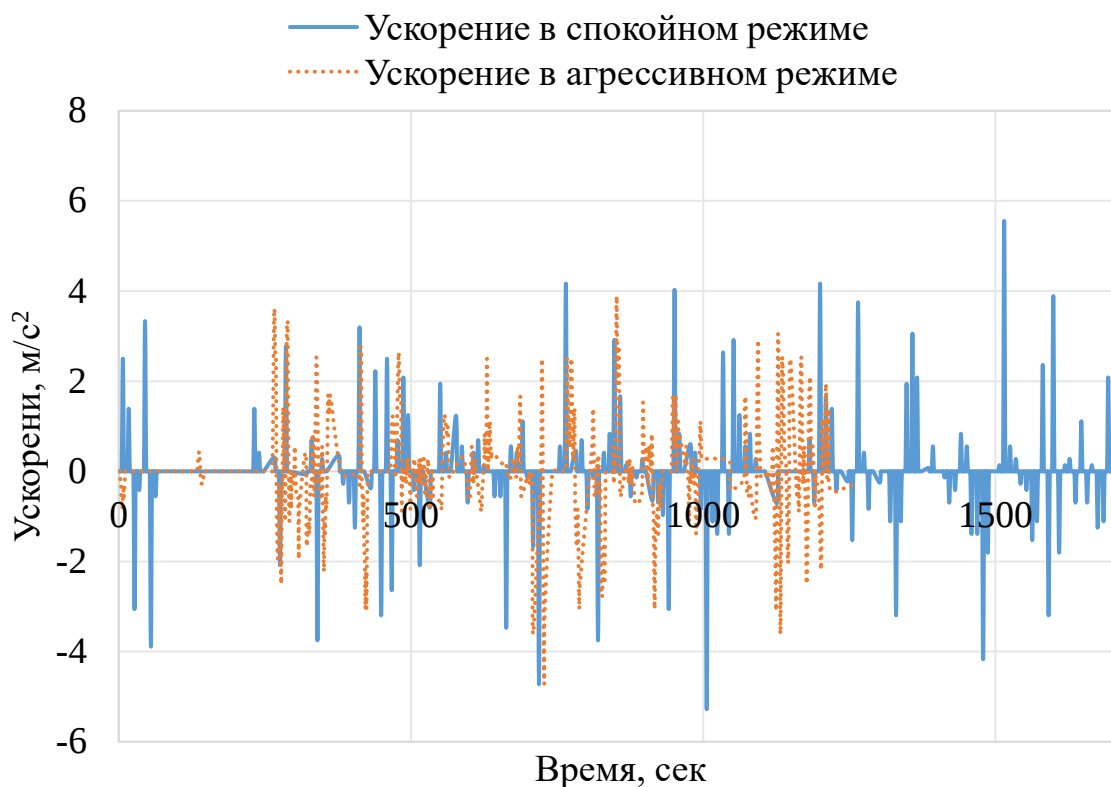


Рис. 3. Графики ускорений

В ходе проведенных экспериментальных заездов было выявлено различие в расходе топлива при использовании двух различных стилей вождения. На рисунке 4 приведены значения расхода топлива в спокойном и агрессивном стиле соответственно.

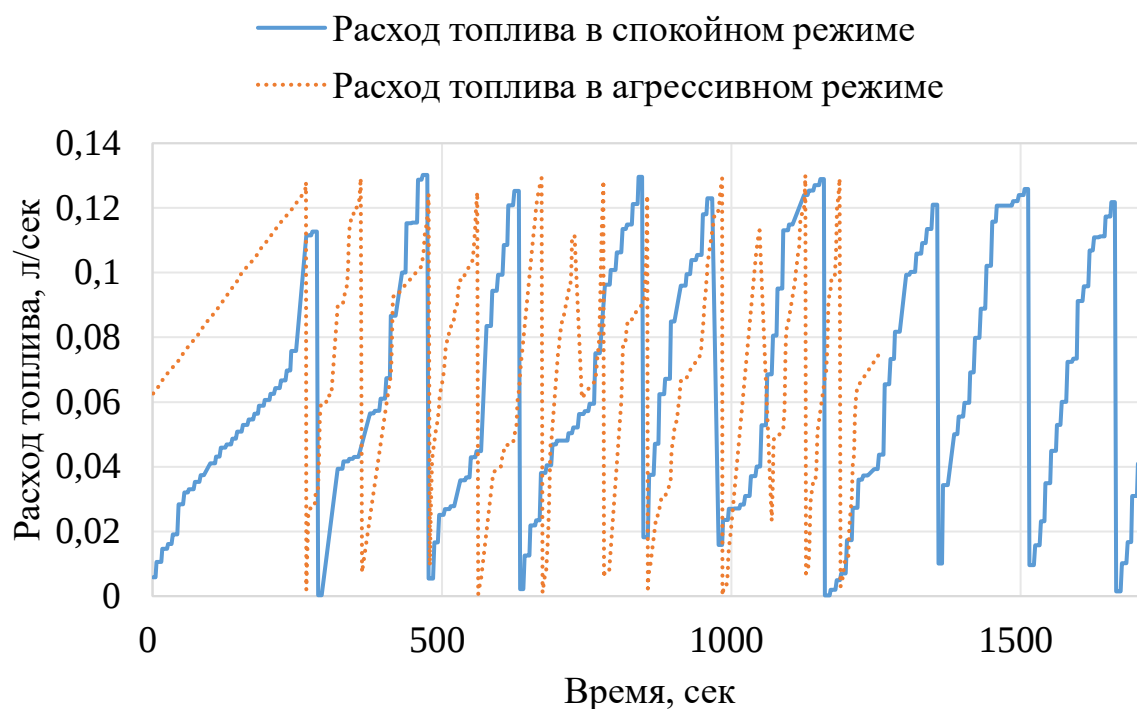


Рис. 4. Расход топлива

При анализе данных экспериментальных заездов установлено, что время в пути при спокойном стиле вождения составило 26 минут и 42 секунды. Расход топлива при этом составил 3,2 литра в час. Время в пути при агрессивном стиле вождения составило 21 минуту и 54 секунды. Расход топлива составил 4,3 литра топлива в час.

В таблице 2 приведены общие значения, полученные по итогам каждого из заездов.

Таблица 2. Данные по итогам заездов

Стиль вождения	Спокойный	Агрессивный
Средняя скорость, км/ч	29,7	33,35
Количество топлива, л	1,16	1,57
Снижение расхода топлива, %	26 %	
Часовой расход, л/час	3,2	5,0
Средний расход, л/100 км	13,54	14,18
Время в пути, мин	26:42	21:54

Полученные результаты подтверждают выводы, сделанные в работе [1], о том, что мастерство водителя, а соответственно, и стиль вождения, влияет на расход топлива примерно на 25%.

Математическая модель движения легкового автомобиля

При построении математической модели рассматривалось прямолинейное движение автомобиля и не учитывались потери на работу электроприборов (генератор, кондиционер, мультимедиа и т.д.). Также в модели не учитывалась скорость ветра.

В таблице 3 исходные данные для модели, а на рисунке 5 приведена внешняя скоростная характеристика двигателя, установленного на транспортном средстве и его удельный расход топлива.

Таблица 3. Технические параметры выбранного ТС

Масса автомобиля с учетом пассажира и водителя, кг											2130		
Тип системы питания двигателя (тип)											Распределенный впрыск топлива с электронным управлением		
Топливо											Бензин, АИ-95		
Плотность топлива, кг/м ³											750		
Момент инерции маховика, кг/м ² ·рад											0,695		
Коэффициенты, полученные в результате статистической обработки экспериментальных зависимостей											a _N = 0,05 b _N = 0,75 c _N = 0,2		
Передаточные числа коробки переключения передач:													
I	3,68	II	2,68	III	1,67	IV	1,02	V	0,83	VI	0,80	VII	0,64
Передаточное отношение главной передачи											4,733		
КПД трансмиссии											0,9		
Радиус колеса, м											0,276		
Масса колеса, кг											13		
Коэффициент сопротивления качению при малых скоростях											0,015		
Коэффициент сцепления с дорожной поверхностью											0,7		
Частота вращения на холостом ходу, об/мин											600		
Высота центра масс, м											0,787		
Площадь фронтальной поверхности, м ²											2,5		
Плотность воздуха, кг/м ³											1,225		
Коэффициент обтекаемости											0,55		

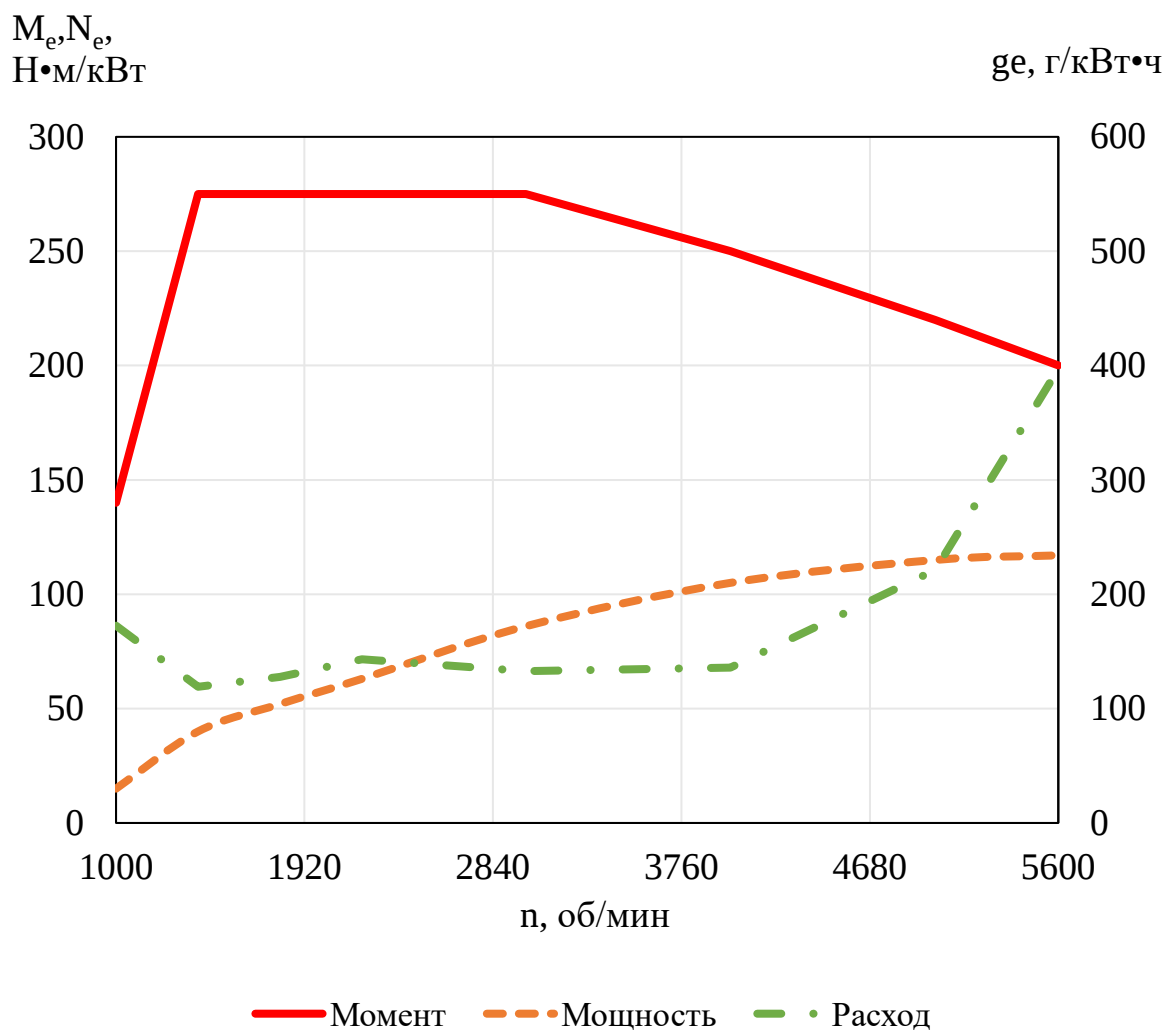


Рис. 5. Внешняя скоростная характеристика и удельный расход топлива

Математическая модель

Для оценки топливной экономичности каждого из экспериментальных заездов построим математическую модель. За основу модели взято уравнение движения транспортного средства (1).

$$F_d = \pm F_{ин} + F_w + F_f + m a \delta, \quad (1)$$

где $F_{ин}$ – сила инерции. F_w – сила сопротивления воздуха, F_f – сила сопротивления качению, $m a \delta$ – сила сопротивления разгону, δ – коэффициент учета вращающихся масс.

Силу инерции, действующую на автомобиль, находим по уравнению (2).

$$F_{ин} = \pm m g \sin \alpha, \quad (2)$$

где m – масса транспортного средства, α – угол подъема или спуска. Знак выбирается в соответствии с тем, едет автомобиль на подъем или на спуск.

Силу сопротивления воздуха находим по уравнению (3).

$$F_w = C_x S_{фронт} \rho \frac{v^2}{2}, \quad (3)$$

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления,

$S_{\text{фронт}}$ – площадь фронтальной поверхности автомобиля, v – скорость движения автомобиля.

Силу сопротивления качению колес найдем по формуле (4).

$$F_f = mg f, \quad (4)$$

где f – коэффициент сопротивления качению. Найдем его по формуле (5).

$$f = f_0 + k_f v^2, \quad (5)$$

где $f_0 = 1,225$ – коэффициент сопротивления качению при движении на малых скоростях.

Коэффициент учета вращающихся масс найдем по формуле (6).

$$\delta = 1 + \frac{J_M \eta u_{\text{тр}}^2 + \sum J_k}{m_k r_k^2}, \quad (6)$$

где J_M – момент инерции маховика двигателя,

η – КПД трансмиссии,

$\sum J_k$ – момент инерции всех колес автомобиля, который находится по формуле (7).

$$\sum J_k = \frac{m_k r_k^2}{2}. \quad (7)$$

Часовой расход топлива при полной нагрузке двигателя будем оценивать по формуле (8).

$$g_{t100} = \frac{g_e v F_d}{1000 \eta}. \quad (8)$$

Часовой расход топлива при частичной нагрузке будем оценивать по формуле (9) [3].

$$g_t = g_{t100}(a_N I^2 + b_N I + c_N), \quad (9)$$

где I – степень используемой мощности двигателя,

a_N, b_N, c_N – коэффициенты, полученные в результате статистической обработки экспериментальных зависимостей.

Степень используемой мощности двигателя найдем по формуле (10).

$$I = \frac{P_d}{P_e^c}, \quad (10)$$

где P_d – мощность двигателя, затрачиваемая на преодоление сопротивлений движению, при заданной скорости, кВт,

P_e^c – стендовая эффективная мощность двигателя по внешней скоростной характеристике при угловой скорости (частоте вращения), соответствующей заданной скорости движения, кВт.

Мощность двигателя на преодоление сопротивлений движению находится по формуле (11).

$$P_d = \frac{P_f + P_w}{k_c \eta}, \quad (11)$$

где P_f и P_w – мощности, затрачиваемые на преодоление сопротивления качению и воздуха соответственно, кВт,

$k_c = 0,95 \dots 0,96$ – коэффициент корректировки характеристики двигателя при испытании по ГОСТ 14846-81.

Мощности, затрачиваемые на преодоление сопротивления качению и воздуха, будем вычислять по формулам (12) и (13).

$$P_f = F_f v, \quad (12)$$

$$P_w = \frac{F_w v}{1000}. \quad (13)$$

Реализация модели в Matlab Simulink

Полученная математическая модель была реализована в вычислительной среде программного комплекса Matlab Simulink. В качестве постоянных показателей модели были заданы вес и геометрические параметры исследуемого транспортного средства, радиус и масса колеса, внешняя скоростная характеристика (ВСХ) двигателя, передаточные числа коробки передач (КП) и главной передачи (ГП), удельный расход топлива. Также были заданы зависимости скорости по времени, номер включенной передачи и высоты над уровнем моря, записанные в ходе проведения экспериментальных поездок. Расчетные схемы структурных элементов модели в программном комплексе Simulink приведена на рисунках 6-11.

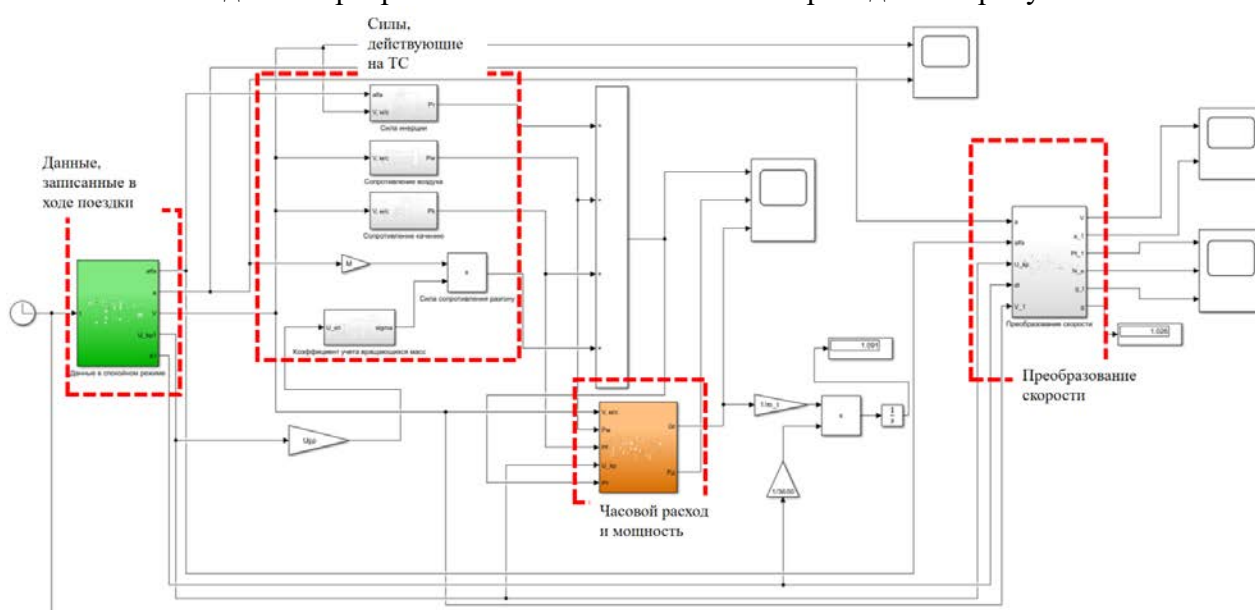


Рис. 6. Общая расчетная схема в Matlab Simulink

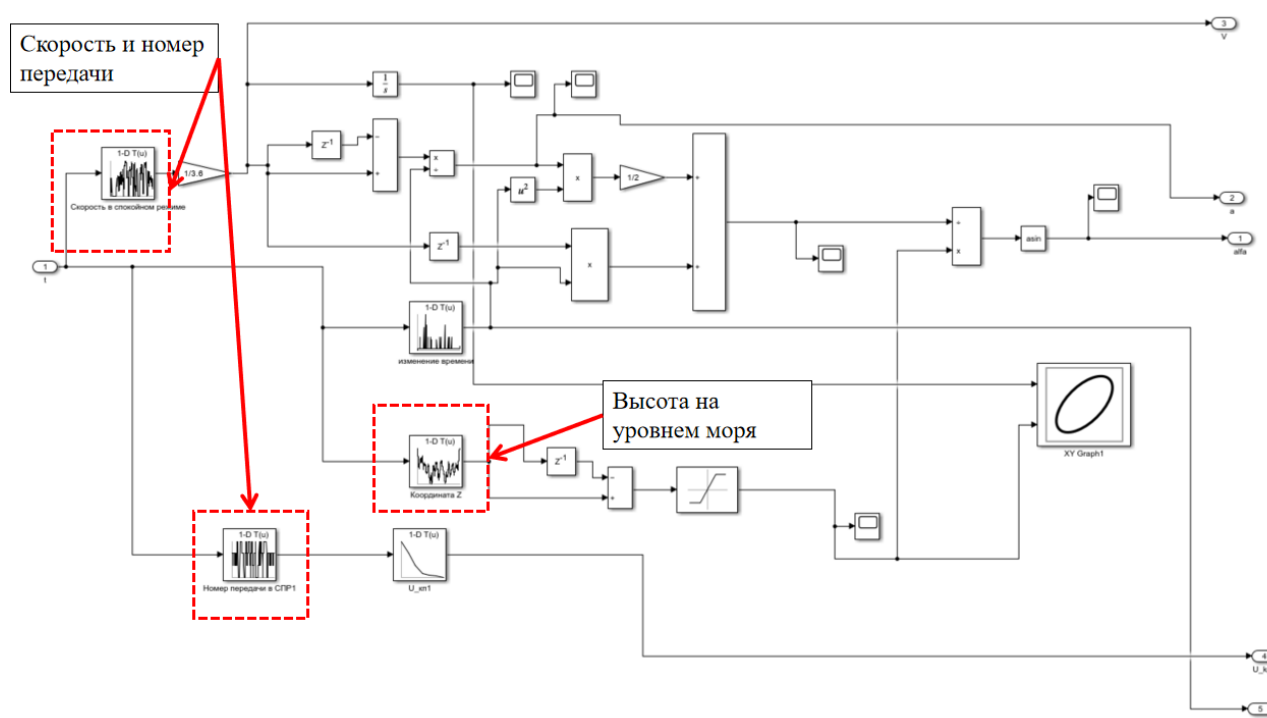


Рис. 7. Расчетная схема для обработки данных, полученных из заездов

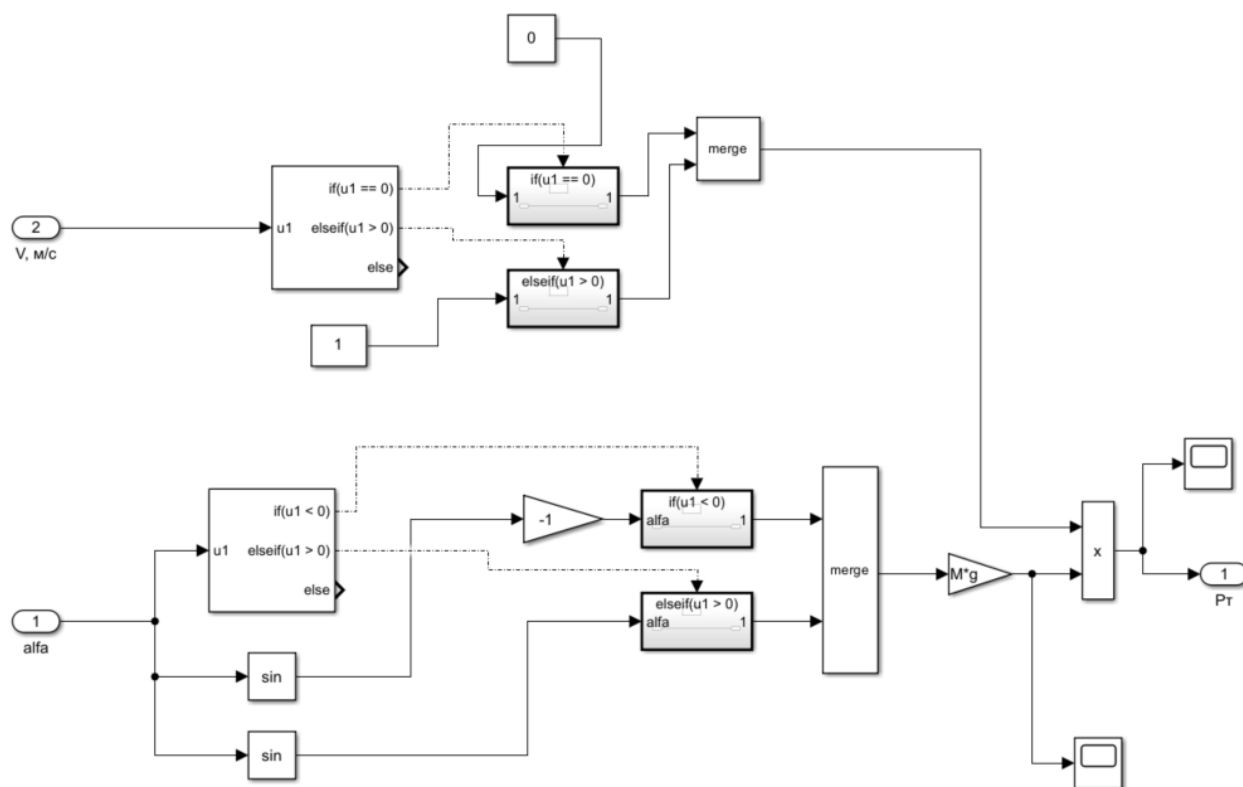


Рис. 8. Расчетная схема для силы инерции

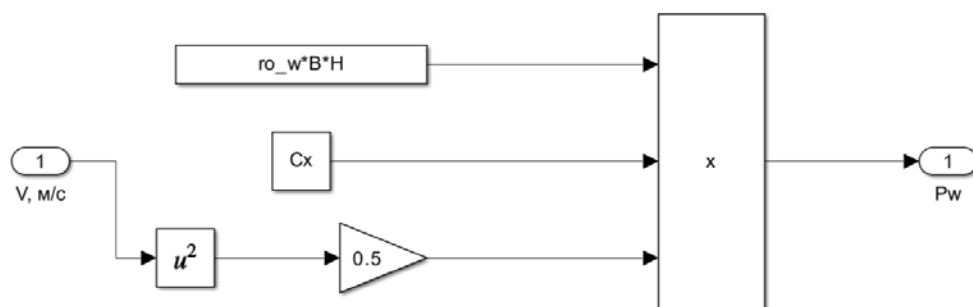


Рис. 9. Расчетная схема для силы сопротивления воздуха

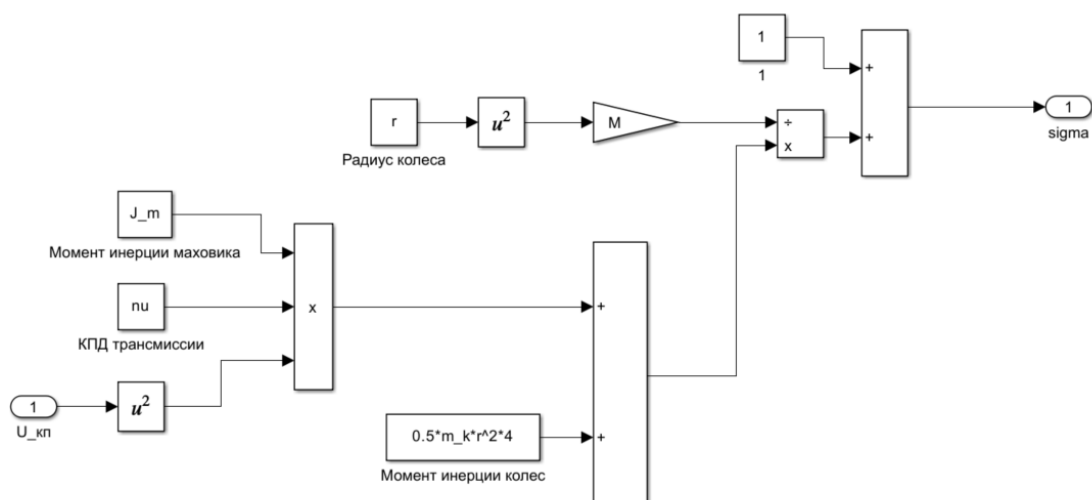


Рис. 10. Расчетная схема для силы сопротивления разгону

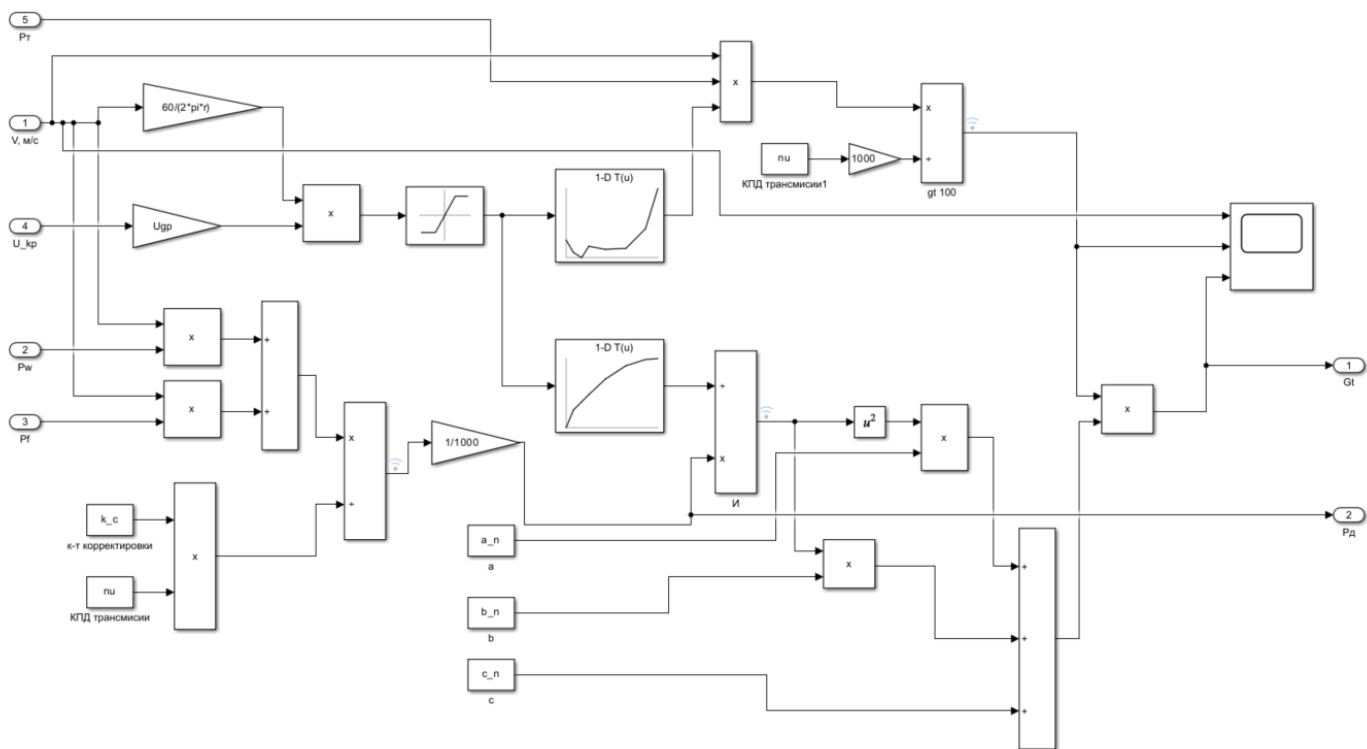


Рис. 11. Расчетная схема для часового расхода топлива

По итогам моделирования каждого из заездов были построены графики зависимостей тягового усилия, мощности и часового расхода топлива по времени. Графики приведены на рисунках 12-13.

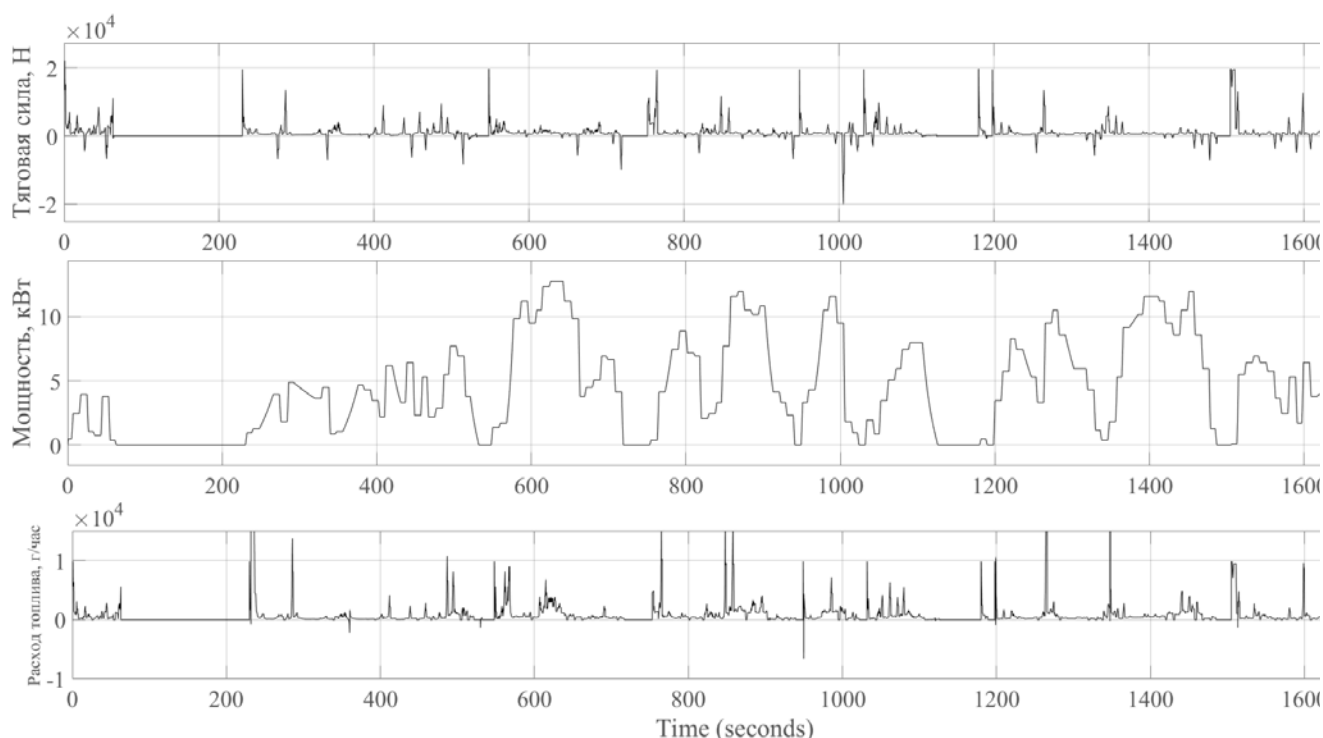


Рис. 12. Графики изменения тягового усилия, мощности и часового расхода топлива в спокойном режиме движения

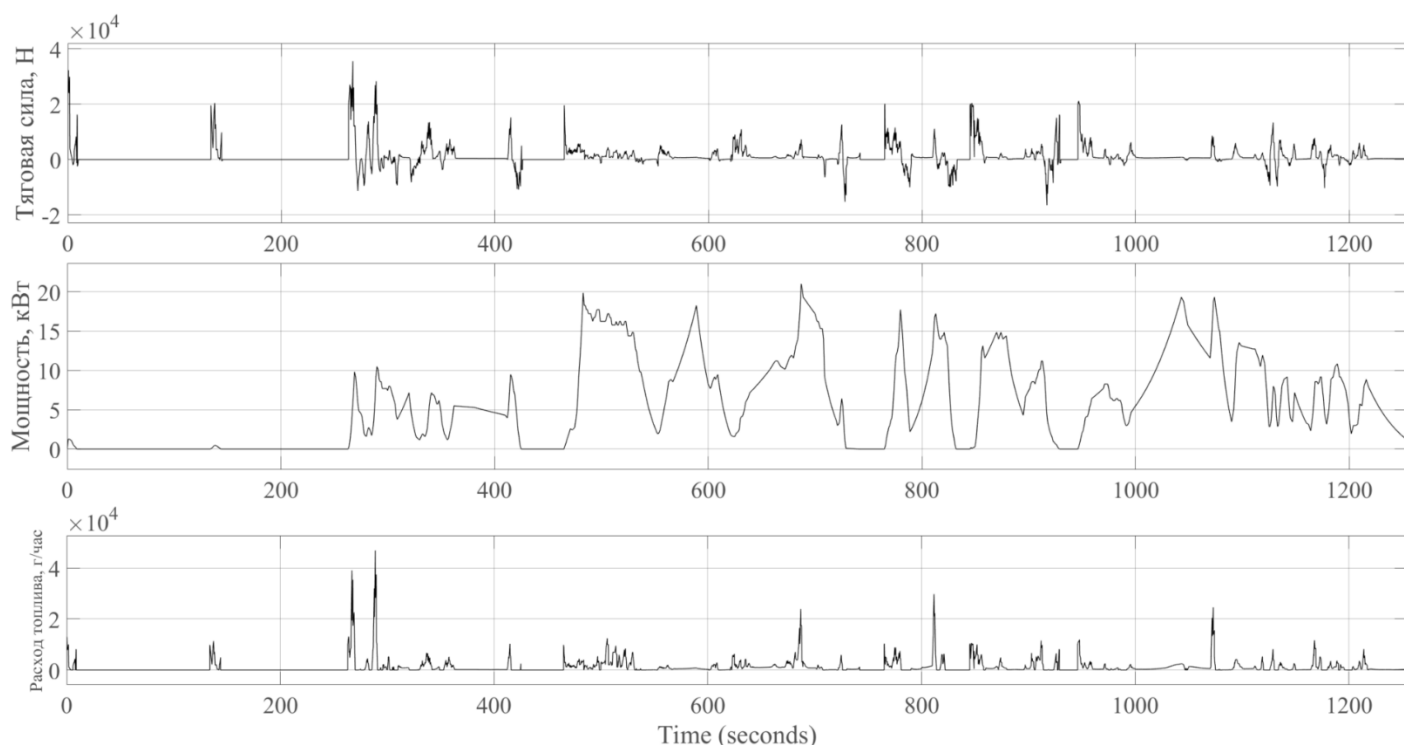


Рис. 13. Графики изменения тягового усилия, мощности и часового расхода топлива в агрессивном режиме движения

Метод повышения топливной экономичности

Одними из предлагаемых требований для повышения топливной экономичности было указано применение ускорений и замедлений, не превышающих 1-1,5 м/с². Зададим данное условие в модели и принудительно ограничим в заезде в спокойном стиле в соответствии с ограничением по ускорению. Модель с ограничением по ускорению приведена на рисунке 14.

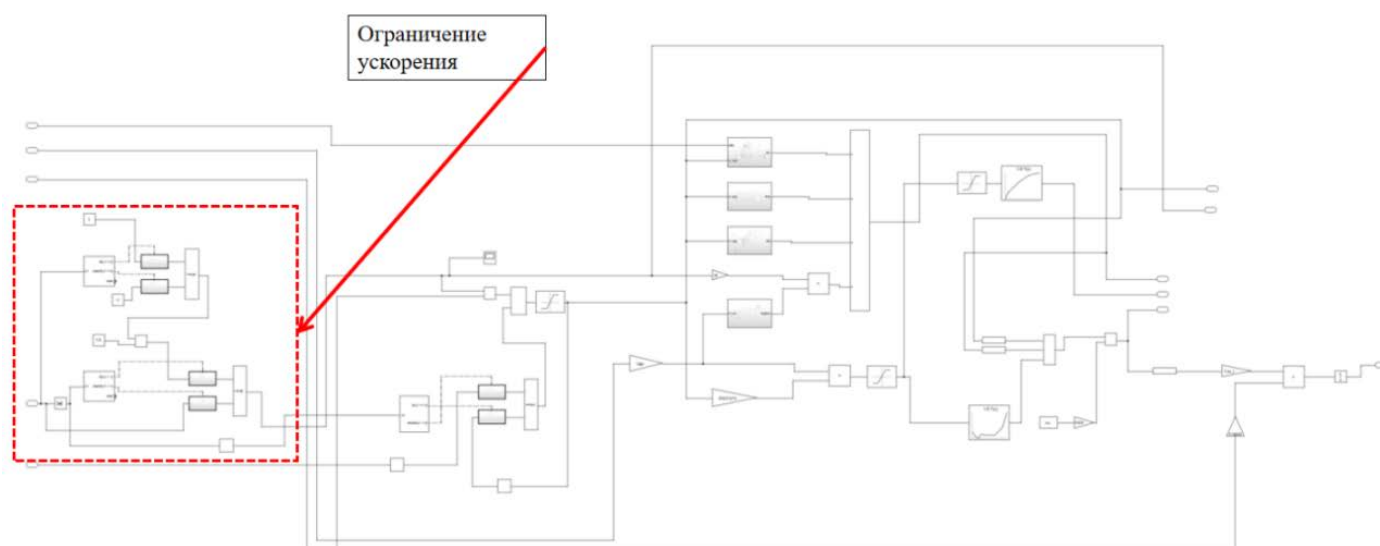


Рис. 14. Общая расчетная схема с ограничением ускорения

По итогам моделирования заезда в спокойном стиле вождения с ограничением по ускорению были получены зависимости скорости, ускорения, тягового усилия, мощности и часового расхода топлива по времени приведенные на рисунках 15-17.

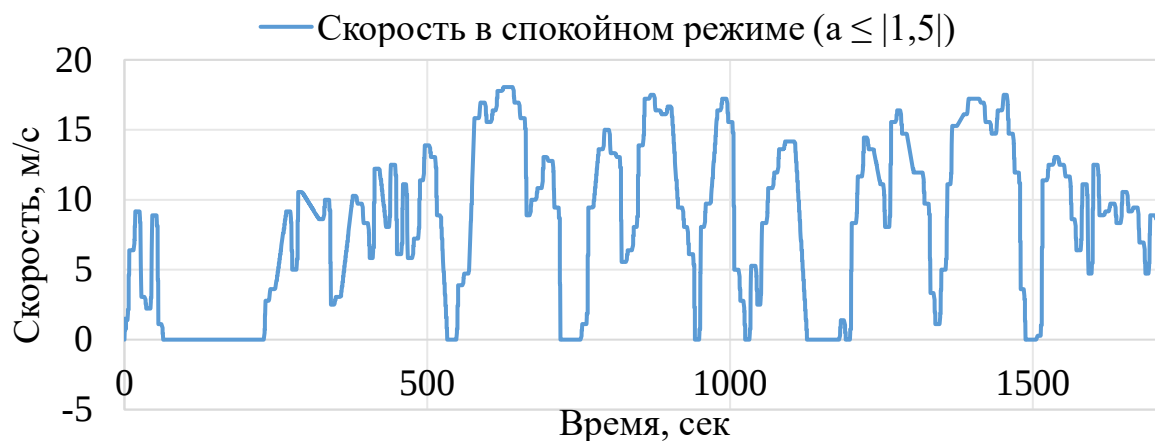


Рис. 15. Графики скорости при $a \leq |1,5|$

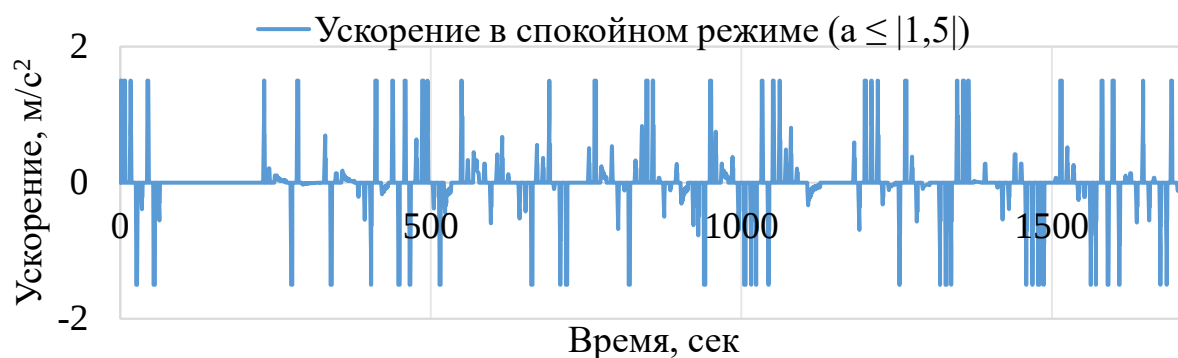


Рис. 16. Графики ускорений при $a \leq |1,5|$

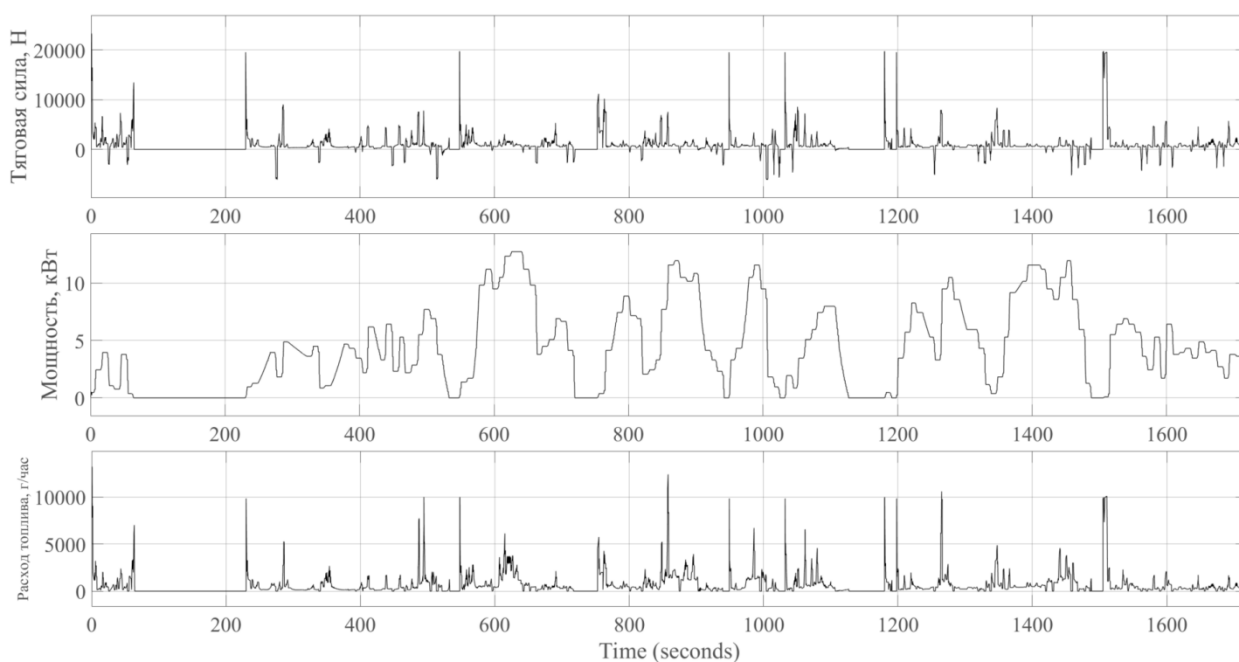


Рис. 17. Графики изменения тягового усилия, мощности и часового расхода топлива в спокойном режиме движения при $a \leq |1,5|$

По итогам моделирования была сформирована таблица 4 оценочных параметров в реальных и моделируемых заездах.

Таблица 4. Оценочные параметры в заездах

Параметр	Реальная эксплуатация		Мат. модель		Мат. модель с ограничением по ускорению
	I	II	I	II	I
Средняя скорость, м/с	8,25	9,26	8,49	10	8,49
Среднее по модулю ускорение, м/с ²	0,24	0,61	0,23	0,52	0,21
Количество топлива, л	1,16	1,57	1,19	1,75	1,02
Снижение расхода топлива в сравнении с наиболее энергозатратным режимом, %	34%	11%	32%	-	42%

Таким образом, в ходе работы получены следующие результаты:

1) построена математическая модель прямолинейного движения автомобиля. Расход топлива в спокойном режиме составил 1,16 литра при реальной эксплуатации и 1,19 литра при моделировании (разница с экспериментальными данными: 3%). При реальной эксплуатации автомобиля в агрессивном режиме расход топлива составил 1,57 литра и 1,75 при моделировании (разница с экспериментальными данными: 11 %);

2) при ограничении ускорений и замедлений до 1,5 м/с² по модулю в сравнении с моделированием без ограничений удалось достигнуть снижения расхода топлива на 14 % в спокойном режиме;

3) определены наиболее и наименее энергозатратные режимы движения: смоделированное движение в агрессивном стиле и смоделированное движение с ограничением по ускорению в спокойном режиме соответственно. Разница в количестве затраченного топлива между данными режимами составила 42%.

Заключение

В ходе работы были проведены два экспериментальных заезда. Первый заезд – в спокойном режиме, второй – в агрессивном. Были получены значения расхода топлива и общее количество затраченного на маршрут топлива.

Для анализа, затраченного в ходе каждой из поездок количества топлива, была построена динамическая модель движения легкового автомобиля. Сравнительная оценка расчетных и экспериментальных показателей движения подтвердила адекватность модели. Хорошее совпадение с реальными значениями получено по расходу топлива.

Исследование показало, что за счет рационального выбора стиля вождения возможно снизить расход топлива на 26 %. В случае строгого соблюдения требования о поддержании ускорений и замедлений, не превышающих 1,5 м/с² возможно добиться дополнительного снижения расхода ещё на 16 %.

В дополнение отметим, что психология водителя играет ключевую роль в формировании его поведения на дороге и, соответственно, в потреблении топлива автомобилем. Водители, предпочитающие спокойный стиль вождения, более терпеливы и склонны к рациональному подходу в управлении транспортным средством. Они осознают, что небольшая потеря времени незначительна по сравнению с экономией топлива. Такие водители стремятся к

плавному и предсказуемому движению, что позволяет минимизировать резкие изменения нагрузки на двигатель и, соответственно, снижает расход топлива.

С другой стороны, водители, предпочитающие агрессивный стиль вождения, часто испытывают чувство спешки и стремятся сократить время в пути любой ценой. Они склонны к резким маневрам, частым обгонам и ускорениям, что приводит к значительному увеличению расхода топлива. Психологически такие водители могут не осознавать или игнорировать долгосрочные последствия своего поведения, включая повышенные эксплуатационные расходы и негативное воздействие на окружающую среду.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Шипилову Михаилу за предоставленную возможность использования его автомобиля для сбора данных при реальной эксплуатации, а также за участие в роли водителя во всех проведенных заездах.

Список литературы

1. Тарасик В.П., Пузанова О.В. Влияние режима движения автомобиля на его топливную экономичность // Вестник Белорусско-Российского университета. 2020. С. 76 – 85.
 2. Чечулин А.И., Сафонов А. Б. Анализ топливной экономичности для различных ездовых циклов легкового автомобиля // Научно-исследовательская работа студента магистратуры. 2024. 23 с
 3. Кравец В. Н. Теория автомобиля // Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. – 2-е изд., переработ. 2013. 413 с.
-

АВТОРЫ

Чечулин Алексей Ильич, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра СМ10 "Колесные машины", студент, chilaleksey@gmail.com

Шаболин Михаил Леонидович, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра СМ10 "Колесные машины", старший преподаватель, shabolin@bmstu.ru

Сафонов Борис Андреевич, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра СМ10 "Колесные машины", доцент, к.т.н., borissaf@mail.ru

Machines & Plants Design & Exploiting

*Electronic journal
International Public Organization
"Integration strategy"
<http://maplants-journal.ru>*

Link to the article:
//Machines and Plants:Design and Exploiting.
2025. № 3. pp. 44 – 60

DOI:

Received: 25.09.2025

Accepted for publication: 01.10.2025

© Interntional Public Organization "Integration strategy"

Investigation of the fuel efficiency of a passenger car in various driving styles in urban traffic conditions

Alexey I. Chechulin,
Mikhail L. Shabolin *,
Boris A. Safonov

*shabolin@bmstu.ru
Bauman Moscow State Technical University
(Moscow, Russia)

The article presents the results of a comparative study of fuel consumption during the actual operation of a car on an urban route when driving in a calm and aggressive driving style. The developed mathematical model of the rectilinear motion of the car and the simulation results based on data collected during real operation are presented. The developed model is equipped with an acceleration and deceleration limiter so that the final accelerations do not exceed modulo 1.5 m/s². A comparison of fuel consumption in the actual operation of the car, in modeling based on the collected data and in modeling with acceleration limitation is carried out.

Keywords: fuel efficiency, passenger car, driving style, urban driving mode, fuel consumption, telematics.

Thanks

The authors would like to thank Mikhail Shipilov for the opportunity to use his car to collect data in real operation, as well as for participating as a driver in all the races.

References

1. Tarasik V.P., Puzanova O.V. The influence of the vehicle's driving mode on its fuel efficiency // Bulletin of the Belarusian-Russian University. 2020. pp. 76-85.
2. Chechulin A.I., Safonov A. B. Analysis of fuel efficiency for various driving cycles of a passenger car // Research work of a graduate student. 2024. 23 s
3. Kravets V. N. Theory of the car // Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev. – 2nd ed., revised. 2013. 413 p.

AUTHORS

Alexey I. Chechulin, Bauman Moscow State Technical University, Department of CM10 "Wheeled vehicles", student, chilaleksey@gmail.com

Mikhail L. Shabolin, Bauman Moscow State Technical University, Department of CM10 "Wheeled Vehicles", Senior lecturer, shabolin@bmstu.ru

Boris A. Safonov, Bauman Moscow State Technical University, Department of CM10 "Wheeled Vehicles", Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, borissaf@mail.ru