

# ЗАКОНЫ ИЗМЕНЕНИЯ УСКОРЕНИЙ АВТОМОБИЛЯ В ПРОЦЕССЕ ЕГО РАЗГОНА

С. А. Горожанкин, д.т.н., профессор; Н. В. Савенков, к.т.н., доцент

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**Аннотация.** В данном исследовании проведен анализ режимов разгона автомобиля категории N3 на участках городского ездового цикла с целью нахождения оптимальных вариантов изменения ускорения. Конечной целью являлась оптимизация параметров движения для нахождения минимального значения расхода топлива за цикл. Определение этой величины позволяет вычислять сопутствующие значения остальных параметров движения – режимы работы двигателя внутреннего сгорания, коэффициенты использования мощности двигателя, номер включенной передачи, длины участков разгона, время их прохождения и др. Результаты рекомендуется использовать в процессе проектирования систем управления роботизированными и автоматическими коробками передач.

**Ключевые слова:** автомобиль, двигатель внутреннего сгорания, трансмиссия, режим разгона, ускорение, путевой расход топлива.



*Горожанкин  
Сергей Андреевич*



*Савенков  
Никита Владимирович*

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Приоритетной задачей как этапов проектирования и доводки, так и технической эксплуатации автотранспортных средств [1,2] является снижение путевого расхода топлива. Топливно-экономические эксплуатационные свойства автомобилей определяются не только контрольным расходом топлива, но и другими показателями, основными среди которых в настоящее время являются значения путевого расхода в комплексе ездовых циклов.

Одним из путей его снижения является строгое согласование параметров силовой установки (СУ) за счет обеспечения рациональных режимов работы её агрегатов, позволяющих поддерживать общий КПД СУ на высоком уровне. Для реализации этого требуется создание метода выбора рациональных параметров процесса движения с учетом влияния неустановившихся режимов работы узлов и агрегатов автомобиля.

Целью настоящей работы является исследование возможности обеспечения максимальной топливной экономичности автомобиля категории N3 путем оптимизации режима работы его СУ при движении на режиме разгона как в городских, так и загородных условиях.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение этой научной задачи позволяет определить для конкретной модели автомобиля рациональные режимы работы двигателя и параметры трансмиссии в соответствии с заданными режимами движения. В статье приведены результаты исследования режима ускоренного движения грузовых автомобилей категории N3 на одном из участков стандартизированного городского ездового цикла, а также в целом для такого цикла. Это позволяет выработать рекомендации как для проектирования СУ (ДВС с роботизированными и, в перспективе, автоматическими коробками передач), так и по рациональному управлению этими установками.

В данной работе исследованы параметры движения трехосных самосвалов модели КамАЗ-5511, ориентированных на эксплуатацию преимущественно в городской черте, а также по грунтовым или отсыпным дорогам с ровной подготовленной поверхностью.

Обязательным условием вычисления параметров процесса движения является связь характеристик автомобиля и параметров его СУ со скоростью движения и продольным ускорением. Для горизонтальных участков дороги, на которых

проводятся испытания в стандартизованных ездовых циклах, расчетные зависимости упрощаются.

На базе результатов опытных исследований, выполненных для двигателя модели КамАЗ-740.10 в МАМИ, авторами получены аналитические зависимости нагрузочно-скоростных характеристик [3] для эффективной мощности  $N_e$  и эффективного удельного расхода топлива  $g_e$ . Это дало возможность получить универсальную статическую (для установившихся режимов работы) характеристику рассматриваемого двигателя, которая позволяет определять функции вышеперечисленных показателей  $g_e(n,k)$  и  $N_e(n,k)$  на установившихся режимах с частичными нагрузками. Диаграмма этой характеристики в виде проекций зависимости на плоскость с координатами  $n$  и  $k$  приведена на рис. 1.

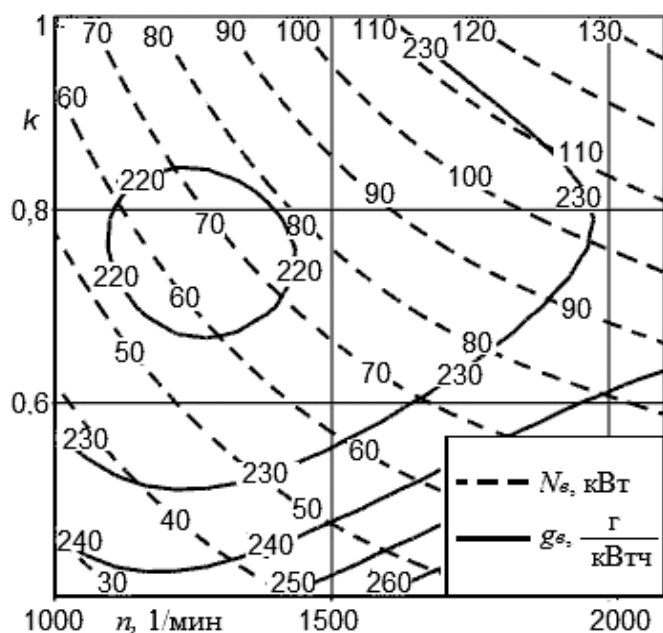


Рис. 1. Универсальная статическая характеристика двигателя КамАЗ-740.10

Параметр  $k$  (коэффициент использования мощности двигателя) на рис. 1 представляет отношение текущего значения эффективной мощности двигателя к значению эффективной мощности того же двигателя при его работе по внешней скоростной характеристике (ВСХ) при той же частоте вращения, т.е.

$$k = \frac{N_e}{N_{eВСХ}}, \quad (1)$$

На диаграмме приведены линии равной эффективной мощности и линии равных эффективных удельных расходов топлива для частичных нагрузок. Эта характеристика позволяет определять установившиеся режимы работы ДВС, на которых каждому значению  $N_e$  соответствует такое сочетание параметров регулирования  $n$  и  $k$ , при котором обеспечивается минимальная величина  $g_e$ .

Вычисление параметров движения автомобиля и его силового агрегата осуществлено на основе

классической теории автомобиля [1,2,4]. Для проведения расчетов режимов движения автомобиля с учетом характеристик его двигателя и трансмиссии в рамках данного исследования разработан комплекс компьютерных программ, позволяющих выполнять вычисление параметров всех составляющих участков городского или магистрального ездовых циклов на дороге в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54810-2011. В программах заложены показатели ДВС, в том числе топливно-экономические, основные технические характеристики автомобиля (масса, габариты, коэффициент аэродинамического сопротивления и др.). Это позволило на основе энергетического баланса силовой установки в каждый момент времени вычислять параметры участков движения в цикле, удельный расход топлива ДВС, расходы топлива по участкам цикла, а также за цикл в целом. Для оценки расхода топлива двигателем в программу введены аналитические выражения для его внешних и частичных скоростных характеристик, отображенных на рис. 1.

Алгоритм программ дает возможность для всех участков ездового цикла вычислять текущие значения скорости, ускорения, пройденного пути, частоты вращения ДВС, его мощности, коэффициента использования мощности и удельного расхода топлива. Это позволяет имитировать динамику движения автомобиля в городских условиях или загородном цикле.

Исследования показали, что при постоянных ускорениях автомобиля в процессе разгона на каждом отдельном участке ездового цикла не обеспечивается минимальный расход топлива на этом участке. Установлено, что для оптимизации параметров движения по минимальному путевому расходу топлива необходимо учитывать не только значения продольных ускорений автомобиля, но и законы изменений этих ускорений на отдельных участках цикла. Причиной этого является зависимость удельного расхода топлива двигателем от коэффициента использования его мощности и, соответственно, от крутящего момента [5,6]. Последний в свою очередь определяется характером изменения ускорения автомобиля на каждом из участков разгона. В общем случае закон изменения ускорения автомобиля от его текущей скорости при прохождении отдельного участка разгона можно представить в виде функции:

$$J = J(w), \quad (2)$$

где  $w$  – текущее значение скорости на участке разгона.

В исследованиях принимались следующие зависимости изменения ускорения автомобиля от скорости:

- 1) постоянное ускорение на всем протяжении участка:  $J = \text{const}$ ;
- 2) ускорение, изменяющееся по линейному закону:

$$J = J_{cp} \cdot (1 + a_1(w/w_{cp} - 1)), \quad (3)$$

где  $w_{cp}$  – среднее значение скорости на участке,  $J_{cp}$  – среднее значение продольного ускорения автомобиля на этом же участке,

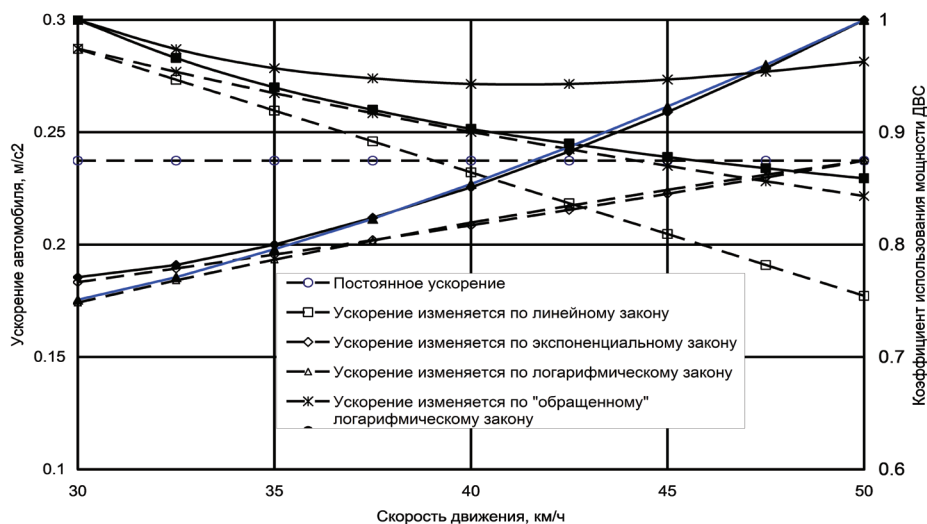


Рис. 2. Изменение ускорений и коэффициента использования мощности двигателя при оптимизации по времени прохождения участка

Таблица 1.

Параметры движения при оптимизации по времени прохождения участка для автомобиля с полной массой 19 т

	Постоянное ускорение	Ускорение изменяется по линейному закону	Ускорение изменяется по экспоненциальному закону	Ускорение изменяется по логарифмическому закону	Ускорение изменяется по «обращенному» логарифмическому закону
Расход топлива на участке, г	255	253.6	250.8	250.7	256.7
Время движения на участке, с	49.5	44.1	45.2	45.2	43.8
Путевой расход топлива (спр), кг/100км	46.36	46.11	45.6	45.58	46.67

3) экспоненциальная зависимость

$$J = J_{cp} \cdot \exp(a_2 w), \quad (4)$$

4) логарифмическая зависимость

$$J = J_{cp} \cdot \ln(a_3 w), \quad (5)$$

5) логарифмическая зависимость вида («обращенная логарифмическая»)

$$J = J_{cp} \cdot (1 - \ln(a_4 w)). \quad (6)$$

Приведенные выражения сравнительно просты и могут быть реализованы системой управления силовым агрегатом автомобиля. В выражениях (2) - (6) коэффициенты  $a_1, a_2, \dots$ , принимаемые в результате оптимизации по какому-либо критерию. В качестве таковых могут выступать: минимальное время прохождения участка; минимальный расход топлива на участке, минимальный расход топлива в единицу времени движения и т.п.

В качестве типового участка разгона автомобиля КамАЗ-5511 был принят участок городского ездового цикла (в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54810-2011) длиной 550 м. На указанном участке автомобиль движется с разгоном от скорости 30 км/ч до скорости 50 км/ч, причем по достижении этой скорости он

должен двигаться с постоянной скоростью 50 км/ч до отметки 550 м. Таким образом, указанный участок содержит два отрезка пути – отрезок разгона и отрезок движения с постоянной скоростью.

Исследования показали (рис. 2), что для автомобиля с полной массой 19 т оптимизация по времени прохождения участка приводит к возрастанию коэффициента использования мощности двигателя (их графики изменений отображены сплошными линиями с зачерненными расчетными точками) до величин 0.85...1.0 практически при всех законах изменения ускорений (ускорения отображены пунктирными линиями), за исключением линейного, в конце участка разгона. При этом для этого закона время прохождения участка практически минимально – 44.1 с. Расход топлива минимален при логарифмическом и экспоненциальном законах изменения ускорений, как это следует из данных, приведенных в таблице 1. Путевой расход топлива в данной таблице приведен для справки. Его величина ни в коей мере не определяет контрольный путевой расход топлива, либо расход в ездовом цикле в целом.

Скоростная характеристика эффективного удельного расхода топлива ДВС является в значительной мере дифференцированной по своим значениям в эксплуатационном нагрузочно-скоростном диапазоне. Работа двигателя с позиции энергетической эффективности более предпочтительна в определенной области

значений коэффициентов использования мощности и частоты вращения коленчатого вала. Для рассматриваемого двигателя такими являются (например, при условии сохранения  $g_e < 225 \text{ г/(кВт·ч)}$ ) диапазоны  $[1 > k > 0,6]$  и  $[1000 < n < 1700]$ .

Идентичные расчеты для варианта оптимизации по минимальному расходу топлива на участке разгона показали, что в этом случае коэффициент использования мощности двигателя лежит в пределах 0.55...0.78 при всех рассмотренных законах изменения ускорений, как это представлено на рис.3, аналогичном рис. 2. При таком варианте оптимизации в значительной мере нивелируются расходы топлива (от 231.3 до 233.4 г) и время прохождения участка (48.4-50.7 с).

В определенной мере полученные результаты соответствуют известным положениям теории автомобилей [2], в соответствии с которыми рекомендуемые значения коэффициента использования мощности  $k$  составляют  $\sim 0.75$  при относительной скорости вращения коленчатого вала  $n/n_{ном}$  около 0.65.

Установлено, что минимальные величины ускорений для некоторых режимов весьма незначительны. Поэтому в процессе дальнейших исследований для всех режимов движения вводилось ограничение минимального значения ускорения на участке разгона величиной 0.1 м/с. Однако это ограничение несущественно изменило результаты, представленные в таблице 2. В целом можно констатировать, что с целью обеспечения минимального путевого расхода топлива

на участках разгона автомобиля вполне приемлемо осуществлять изменение его продольных ускорений по линейному закону, представленному выражением (2). Коэффициент  $a_1$  в этой зависимости может принимать как отрицательные, так и положительные значения, что отвечает либо увеличению, либо уменьшению ускорения по мере разгона. Для любого участка ездового цикла такой коэффициент может быть найден путем оптимизации, что обеспечит минимальный путевой расход топлива для ездового цикла в целом.

В ходе вычислений параметров городского ездового цикла на дороге путем численного интегрирования и оптимизации режимов работы силового агрегата режимы движения автомобиля принимались согласно требований ГОСТ Р 54810-2011. Указанный стандарт не предусматривает определенного номера включенной передачи для участков цикла, а также времени прохождения этих участков. Это дает возможность в процессе расчета режимов движения в городском цикле на дороге для АТС категорий N2, N3 и M2 класса II разбивать цикл на различное число участков в зависимости от тягово-мощностных и конструкционных параметров автомобиля. К ним отнесены мощность, частота вращения двигателя, передаточные числа трансмиссии, диаметры колес и др. В целом исследования показали, что для выбранного автомобиля число расчетных участков городского цикла составляет 60-63 в зависимости от типа установленной трансмиссии (передаточные числа КПП и заднего моста).

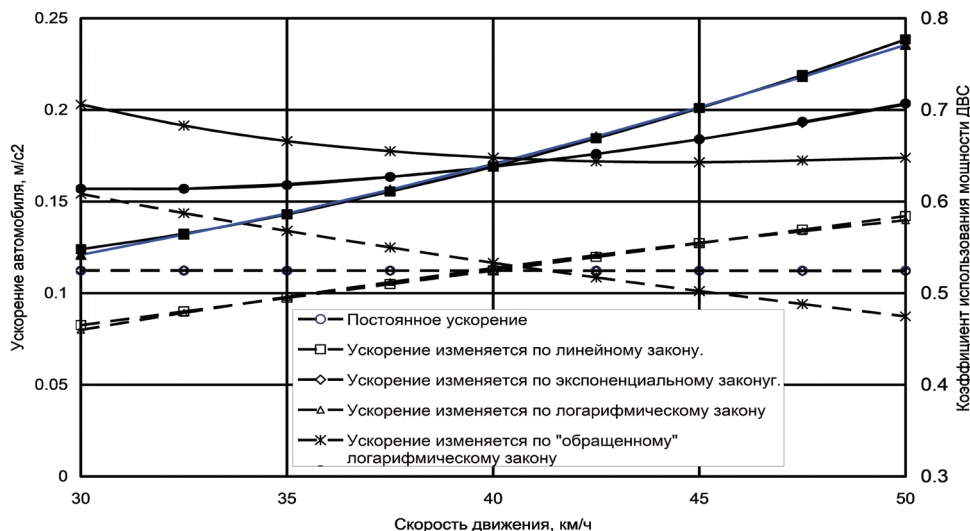


Рис. 3. Изменение ускорений и коэффициента использования мощности двигателя при минимизации расхода топлива на участке автомобиля с полной массой 19 т

Таблица 2.

Параметры движения при минимизации расхода топлива на участке для автомобиля с полной массой 19 т

	Постоянное ускорение	Ускорение изменяется по линейному закону	Ускорение изменяется по экспоненциальному закону	Ускорение изменяется по логарифмическому закону	Ускорение изменяется по «обращенному» логарифмическому закону
Расход топлива на участке, г	232	231.3	232	231.3	233.4
Время движения на участке, с	49.5	50.6	49.5	50.7	48.4
Путевой расход топлива (спр.), кг/100км	42.18	42.05	42.18	42.05	42.44

Таблица 3.

Результаты моделирования движения автомобилей в условиях городского ездового цикла в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54810-2011

Грузоподъемность автомобиля, кг	Полная масса автомобиля, кг	Движение при максимальных ускорениях на участках разгона		Движение при постоянных ускорениях и оптимизации по минимальному времени прохождения цикла		Движение при оптимизации по минимальному путевому расходу топлива в цикле и постоянных ускорениях		Движение при оптимизации по минимальному путевому расходу топлива в цикле и переменных ускорениях	
		Путевой расход топлива кг/100км	Средняя скорость в цикле, км/ч	Путевой расход топлива кг/100км	Средняя скорость в цикле, км/ч	Путевой расход топлива кг/100км	Средняя скорость в цикле, км/ч	Путевой расход топлива кг/100км	Средняя скорость в цикле, км/ч
10000	19000	40.18	29.12	39.35	28.76	38.04	28,08	38.02	27.96
0	9000	24.03	29.93	24.32	29.60	23.01	27.54	22.90	27.33

Результаты расчетов расходов топлива в городском ездовом цикле автомобилем при его полной массе приведены в таблице 3 для нескольких вариантов оптимизации параметров.

Из результатов, представленных в таблице 3, следует, что путевой расход топлива составляет 38.04 кг/100 км (суммарный расход топлива за цикл составляет 1522 г) при постоянных значениях ускорений на участках разгона. Оптимизация с изменением этих ускорений по линейной зависимости от скорости автомобиля для каждого из участков разгона практически не дает снижения путевого расхода - его величина уменьшается всего до 38.02 кг/100 км (1521 г за цикл), т.е. снижается менее чем на 0.1%. Таким образом, для достижения максимальной экономичности с достаточной для практики точностью ускорения автомобиля можно принимать постоянными в пределах каждого из участков.

Картина изменяется при снижении массы автомобиля (уменьшении массы перевозимого груза). При движении в городском ездовом цикле порожнего автомобиля вследствие существенного снижения его полной массы с 19 т до 9 т (см. таблицу 3) значительно уменьшаются нагрузки на двигатель и трансмиссию. При максимальной полной массе коэффициенты запаса мощности двигателя невелики, поэтому на участках разгона он работает при значениях коэффициентов использования мощности  $k$ , близких к единице. Для порожнего автомобиля этот коэффициент снижается до величин  $\sim 0.55...0.78$ . Это в свою очередь позволяет принимать оптимальную зависимость изменений ускорений автомобиля от скорости на участках разгона. Так, например, изменение ускорений автомобиля по линейной зависимости от скорости дает снижение путевого расхода топлива на  $\sim 0.52\%$  (с 23.02 до 22.90 кг/100 км). Снятие ограничений по минимальным значениям ускорений (с ограничением до  $0.1 \text{ м/с}^2$ ) позволяет довести путевой расход до 22.48 кг/100 км, что соответствует  $\sim 2\%$  экономии топлива.

**ВЫВОДЫ**

1. В исследовании рассмотрены режимы разгона автомобиля категории N3 при различных вариантах изменений их продольных ускорений в процессе разгона.

2. Показано, что процесс движения грузового автомобиля для неустановившихся режимов в городском ездовом цикле может быть оптимизирован для снижения путевого расхода топлива.

3. Определено, что при оптимизации следует учитывать характеристики автомобиля, его двигателя, параметры трансмиссии, режимы движения, массу перевозимого груза.

4. Для моделей автомобилей категории N3 в городском ездовом цикле путевой расход топлива может быть снижен на 3-5% при рациональном выборе передач трансмиссии и скорости движения при их переключении.

5. Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования при проектировании блоков управления роботизированными и автоматическими коробками передач.

**Список литературы**

1. Литвинов А.С. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств: Учебник для вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство» / А.С. Литвинов, Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
2. Горожанкин С.А., Савенков Н.В. Оптимизация режимов работы силового агрегата автомобиля в городском цикле. Научный журнал «Вестник ДонНУ». Сер.Г: Технические науки. – Донецк: ДонНУ, 2019; 1/2019. – С. 73-78.
3. Горожанкин С. А. Методики для аппроксимации зависимостей нескольких переменных в программной среде MS Excel и Mathcad / Научно-технические ведомости СПб-ГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление // С.А. Горожанкин, А.А. Шитов, Н.В. Савенков. – 2016, № 3(247), – С. 35–47.
4. Бортницкий И.П. Тягово-скоростные качества автомобилей / И.П. Бортницкий, В.И. Задорожный. – К: Вища школа, 1978. – 176 с.
5. Работа автомобильного двигателя на неустановившемся режиме / Е.М. Акатов, П.М. Белов, Н.Х. Дьяченко, В.С. Мусатов. М-Л: Машигиз, 1960, – 282 с.
6. Патрахальцев Н.Н. Неустановившиеся режимы работы двигателей / Н.Н. Патрахальцев, Ю.А. Соколов.–М.: НИИинформтяжмаш, 1976, №4-76-34. – 42 с.