

Г.В. Борисов
ВЕРОЯТНОСТНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА
НОРМИРОВАНИЯ РАСХОДА АВТОМОБИЛЬНЫХ ТОПЛИВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предложена аналитическая методика определения расхода топлива от этапа сбора исходных данных до конечного результата. Это открывает новые возможности определения расхода топлива в условиях ограниченности времени, финансирования экспериментов, исходных данных о маршруте и т.д. В условиях работы современных АТП данная методика обладает существенными преимуществами перед экспериментальными и статистическими методами, предполагающими длительные, дорогостоящие эксперименты, сбор и анализ статистических данных.

Ключевые слова: *техническая эксплуатация автомобилей, коммерческая эксплуатация автомобилей, расход топлива автомобилей, нормирование расхода топлива автомобилей.*

Расход топлива автотранспортными средствами (АТС) является преобладающей составляющей в структуре себестоимости перевозок. Содержание и структура нормативных документов по нормированию расходов автомобильных топлив в РФ не претерпевали заметных изменений на протяжении последних 55 лет. В настоящее время действует распоряжение Минтранса РФ от 14.03.08 АМ-23-р «Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте» (в дальнейшем – Нормы), дополненное распоряжением Минтранса РФ № НА-50-р от 14.05.2014. Научно-методической основой определения базовых линейных норм расхода топлива является методика определения норм расхода топлива, разработанная в 1996 г. НИИАТ и утвержденная бессрочно Минтрансом РФ. После принятия решения Минэкономразвития России 20 апреля 2012 г. значения базовых и транспортных норм, других нормативов и поправочных коэффициентов, и методики расчета нормативного расхода топлива носят рекомендательный характер. Однако в силу отсутствия альтернативных методик нормирования расхода автомобильных топлив руководители предприятий продолжают нормировать топливо по действующей методике, либо списывают и отчитываются за расходуемое топливо перед налоговыми органами по факту.

Применяемая в настоящее время программа-методика НИИАТ для определения базовых норма расхода топлива предполагает учет особенностей эксплуатации автомобилей на основе комбинации городского и загородного циклов движения, полученных по ГОСТ 20306-90 и не применимых к современным условиям эксплуатации. Транспортные нормы расхода топлива определяются только в зависимости от расстояния перевозок и массы перевозимого груза и корректируются в зависимости от условий эксплуатации. Опыт показывает, что полученные по Нормам расходы топлив, как правило, отличаются от реальных в большую сторону. Кроме этого руководителям предприятий разрешается самостоятельно устанавливать нормы расхода топлива на основании контрольных замеров.

Ощущается острая необходимость в современной научно-обоснованной методике определения значений расходов топлив АТС для планирования затрат на перевозки, наиболее приближенных к реальным. Это представляется возможным при учете технико-эксплуатационных показателей АТС (тягово-скоростных и топливно-экономических характеристик), условий эксплуатации в вероятностном представлении и скорости движения как комплексного показателя действия гаммы факторов (дорожное покрытие, характеристики маршрутов движения, реальная полная масса АТС и т.д.). Методика должна иметь целостный характер, наиболее полно учитывающий специфику работы различных видов АТС.

В общем случае методики определения расхода топлива АТС можно разделить на следующие группы:

- **экспериментальные** (проведение длительных испытаний-замеров расхода топлива для конкретных АТС в заданных условиях);

- **статистические** (сбор и обработка статистических данных в условиях конкретных АТП в различных условиях эксплуатации);
- **аналитические** (расчет либо корректировка нормируемого значения расхода топлива конкретных АТС на заданных маршрутах движения).

Аналитические методики в силу их естественных преимуществ – отсутствие необходимости проведения длительных и дорогостоящих экспериментов, минимум затраченного времени и т.д., – необходимы для практического использования работниками АТП.

Автором выдвинута гипотеза, что нормирование расхода автомобильного топлива следует производить с учетом реальных законов распределения средней скорости движения АТС в конкретных транспортных условиях эксплуатации и использовании при этом топливно-экономической характеристики АТС.

Алгоритм предлагаемой вероятностно-аналитической методики состоит из решения нескольких последовательных задач, что позволяет получить (планировать) приближенное к реальности значение расхода топлив на маршрутах.

1. *Исходные данные*: конструкционные параметры АТС; маршрут движения (область эксплуатации). В данный раздел включается также алгоритм определения допустимой, для конкретного АТС, массы перевозимого груза.

2. *Определение средней скорости движения по маршруту* ($V_{cp} = f(\psi, m_{гр})$).

Существующая вероятностная методика определения средней скорости движения (Новиков О.А. и Уваров В.Н.) учитывает случайное распределение суммарного дорожного сопротивления ψ (через нормальное распределение) и среднюю скорость движения на i -й передаче V_{ci} и на j -м участке маршрута V_{cj} и при использовании стандартной динамической характеристики автомобиля позволяет получить среднее значение скорости движения по маршруту V_{cp} .

При совершенствовании и упрощении вероятностной методики определения средней скорости приняты следующие допущения: 1) участок маршрута, на котором выполняется условие $D_{i+1} \leq \psi < D_i$ (D_{i+1} и D_i – динамический фактор на i -й и следующей передачах коробки передач (КП)) преодолевается только на i -ой передаче; 2) скорость на i -й передаче меняется в пределах $V_{i-1} < V \leq V_i$ (V_{i-1} и V_i – скорость движения на i -й и предыдущей передачах); 3) переключение с i -й передачи на более высокую или низкую обуславливается суммарным сопротивлением ψ ; 4) переключение на более высшую передачу осуществляется при $D_{i+1} = \psi$; 5) время переключения передач не учитывается.

Для определения динамических характеристик АТС вместо выражения максимальной скорости на передаче ($V_i = 0,377 \frac{n_e \cdot r_k}{i_{кп} \cdot i_0}$) предложено выражение:

$$V_i = 3,6 \eta_{тр} \frac{P_e^{\max}}{F_T}, \text{ км/ч}, \quad (1)$$

где n_e – частота вращения коленчатого вала при максимальной эффективной мощности двигателя P_e^{\max} , Вт; r_k , м – радиус качения ведущего колеса; $i_{кп}$ – передаточное число КП; i_0 – передаточное число главной передачи; $\eta_{тр}$ – КПД трансмиссии; F_T , Н – сила тяги на ведущих колесах.

Выражение (1) для определения скорости движения на передаче является правомочным, поскольку стандартное выражение скорости при движении никогда не достигается, и используется для определения максимальных тяговых возможностей АТС. Данная замена также позволила сократить число пунктов расчета средней скорости движения АТС по маршруту.

В результате получено выражение средней скорости движения:

$$V_{cp} = \frac{3,6 P_e^{\max} r_d}{T_{ep} i_0} \sum_{j=1}^m W_j \cdot \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{\sum_{i=1}^n \frac{k_i}{i_{кп} \delta_i}}, \quad (2)$$

где T_{ep} , Н·м – крутящий момент при максимальной эффективной мощности; r_d , м – динамический радиус ведущего колеса; n – количество передач КП; m – количество участков маршрута с различными дорожными и транспортными условиями эксплуатации; $W_j = S_j/S_{общ}$ – частота участка маршрута того или иного типа; S_j – длина участка маршрута; k_i – относительный путь движения АТС на передачах в пределах от минимально устойчивой до предельной скорости; δ_i – коэффициент выбора закона распределения скоростей.

Часть выражения (2), вынесенная за знак суммы, характеризует технические параметры АТС и в целях данных расчетов представляется постоянной величиной. Выражение под знаком суммы с помощью коэффициентов k_i и δ_i учитывает вариацию дорожных и транспортных условий эксплуатации АТС, численное значение которого является безразмерным и изменяется в диапазоне от 0 до 1.

Физический смысл относительного пути движения описывается выражением $k_i = S_i/S_{общ}$, где S_i – путь пройденный АТС на i -й передаче и $S_{общ}$ – общая длина маршрута. Значение S_i при этом является случайным и с учетом принятых допущений: $S_i = S_{общ} \cdot p(D_{i+1} \leq \psi < D_i)$, поэтому величина k_i численно равна вероятности $p(D_{i+1} \leq \psi < D_i)$. Нахождение значения указанной вероятности зависит от закона распределения случайной величины $f(\psi)$. Кроме применяемого обычно нормального закона распределения через функцию Лапласа ($k_i = \Phi\left(\frac{D_i - m_\psi}{\sigma_\psi}\right) - \Phi\left(\frac{D_{i+1} - m_\psi}{\sigma_\psi}\right)$) автором предложены математические выражения для определения k_i с помощью других законов распределения: равномерный, экспоненциальный, гамма-распределение.

Коэффициент выбора закона распределения скоростей δ_i учитывает вариацию транспортных условий эксплуатации и определяется из выражения математического ожидания средней скорости на передаче $V_{ci} = \int_{V_{i-1}}^{V_i} V \cdot f(V) dV = \delta_i V_i$ для реальных законов распределения. Для равномерного и нормального распределения, а также для АТС, оснащенных механическими КП с большим числом ступеней, V_{ci} с достаточной точностью определяется как среднее значение: $V_{ci} = \frac{V_i + V_{i-1}}{2} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V_{i-1}}{V_i}\right) V_i$, откуда $\delta_i = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V_{i-1}}{V_i}\right)$.

Реальные распределения скоростей движения в диапазоне от минимальной устойчивой до предельно допустимой скорости вместо ранее используемого нормального закона следует описывать реальными законами распределения скоростей. Согласно выдвинутой гипотезы для учета городского движения используется показательный (в частности, экспоненциальный с отрицательной степенью) закон распределения. В результате решения выражения математического ожидания скорости $m(V) = \int_{V_{min}}^{V_{max}} V \cdot f(V) dV$ для указанного закона распределения получена теоретическая зависимость:

$$V_{ci} = m(V) = e^{-\lambda V_{i-1}} \left(V_{i-1} + \frac{1}{\lambda} \right). \quad (3)$$

Результатом усовершенствования и некоторого упрощения (уменьшение числа шагов алгоритма) вероятностной методики определения средней скорости по заданному маршруту являются: аналитические выражения коэффициента k_i , учитывающего вариацию дорожных условий по маршруту (для указанных законов распределения); аналитические выражения V_{ci} и коэффициента δ_i , учитывающего вариацию транспортных условий по маршруту; значение средней скорости движения АТС по маршруту с учетом вариации дорожных и транспортных условий эксплуатации.

3. Определение линейного расхода топлива АТС ($Q_s = f(V_{cp}, g_e, \psi)$).

Методика построения топливно-экономической характеристики автомобиля (Чудаков Е.А. и др.), где базовая зависимость $Q_s = f(V_a, \psi)$, основана на определении удельного эффективного расхода топлива g_e по имеющимся внешним скоростным (нагрузочным) характеристикам двигателя, либо при их отсутствии – по аналитическим выражениям вида $g_e = g_{ep} k_E k_K$, где g_{ep} – удельный расход топлива двигателем при максимальной мощности;

$k_E = f(E)$ – коэффициент, учитывающий влияние степени E приближения угловой скорости коленчатого вала $\omega_e = V_{a i_{\text{тр}}}/r_k$ на расчетном режиме к угловой скорости ω_p на режиме максимальной мощности; $k_I = f(I)$ – коэффициент, учитывающий влияние степени I использования мощности двигателя, определяемый по выведенным сотрудниками НГТУ им. Р.Е. Алексеева (Песков В.И. и др.) полиномам пятой степени для современных конструкций автомобильных двигателей, которые в отличие от выражений, предложенных С.Р. Лейдерманом в первой половине XX века, приближают результаты аналитических расчетов к реализуемым значениям расхода топлива.

С использованием вероятностной методики определения средней скорости, учитывающей вариацию дорожных и транспортных условий эксплуатации, и методики построения топливно-экономической характеристики автомобиля получено выражение линейного расхода топлива:

$$Q_s = \frac{0,1 \cdot g_{eP} \cdot k_{Ei V_{cp}} \cdot k_{I\psi_{ji} V_{cp}}}{\rho_T \cdot \eta_{\text{тр}}} \cdot (\psi_{j \text{ cp}} \cdot G_{\text{АТС}} + W \cdot V_{\text{cp}}^2), \quad (4)$$

где K_{Ei} и $K_{I\psi_{ji}}$ – определены для значений угловых скоростей вращения коленчатого вала двигателя, соответствующих средней скорости движения V_{cp} , км/ч (i, j – соответственно, текущая передача и участок маршрута); ρ_T – плотность топлива, кг/л; $G_{\text{АТС}}$, Н – полный вес АТС; W – фактор обтекаемости.

Полученное таким образом значение линейного расхода топлива Q_s будет являться наиболее вероятным в заданных условиях эксплуатации для конкретных АТС. Для полного использования преимуществ вероятностно-аналитической методики, состоящих, в первую очередь, в исключении пересчетов нормируемого значения расхода топлива при изменении условий эксплуатации, рекомендуется использовать циклограмму расхода топлива (рис. 1). Она строится путем совместного использования динамической, топливно-экономической характеристики и характеристик маршрута для конкретных марок АТС предприятия.

В результате определяется нормируемый диапазон расхода топлива. Для точного определения нормируемого значения расхода топлива АТС следует использовать выражение (4).

Экспериментальные исследования включали в себя этапы:

- реальное распределение скоростей движения $f(V_a)$ для городского движения (определяет математический вид коэффициента выбора закона распределения скоростей δ_i);
- сравнение нормативных значений расхода топлива и реальных эксплуатационных расходов с полученными значениями согласно предлагаемой методики.

Данные по значениям скоростей движения и реальным значениям расхода топлива для математической обработки были получены с применением прикладного программного комплекса «АвтоГРАФ», использующего средства спутниковой навигации *GPS* («ГЛОНАСС»). Анализ проведен на примере пятиосных автопоездов в составе седельных тягачей *Iveco EuroStar Cursor 430* и тентовых полуприцепов *Krone SDP 27*, выполняющих междугородные перевозки. Общий объем базы данных значений скоростей соответствует периоду эксплуатации АТС в течение 1,5 лет. Значения скоростей фиксировались при их фактическом изменении (диапазон съема данных от 2 до 15 с). Общее количество значений скоростей – свыше 450 тыс. – для удобства отображения и восприятия информации было разделено на 10 интервалов от 0 до 100 км/ч с шагом в 10 км/ч (реальное число расчетных диапазонов определялось математически с использованием аппарата теории вероятностей).

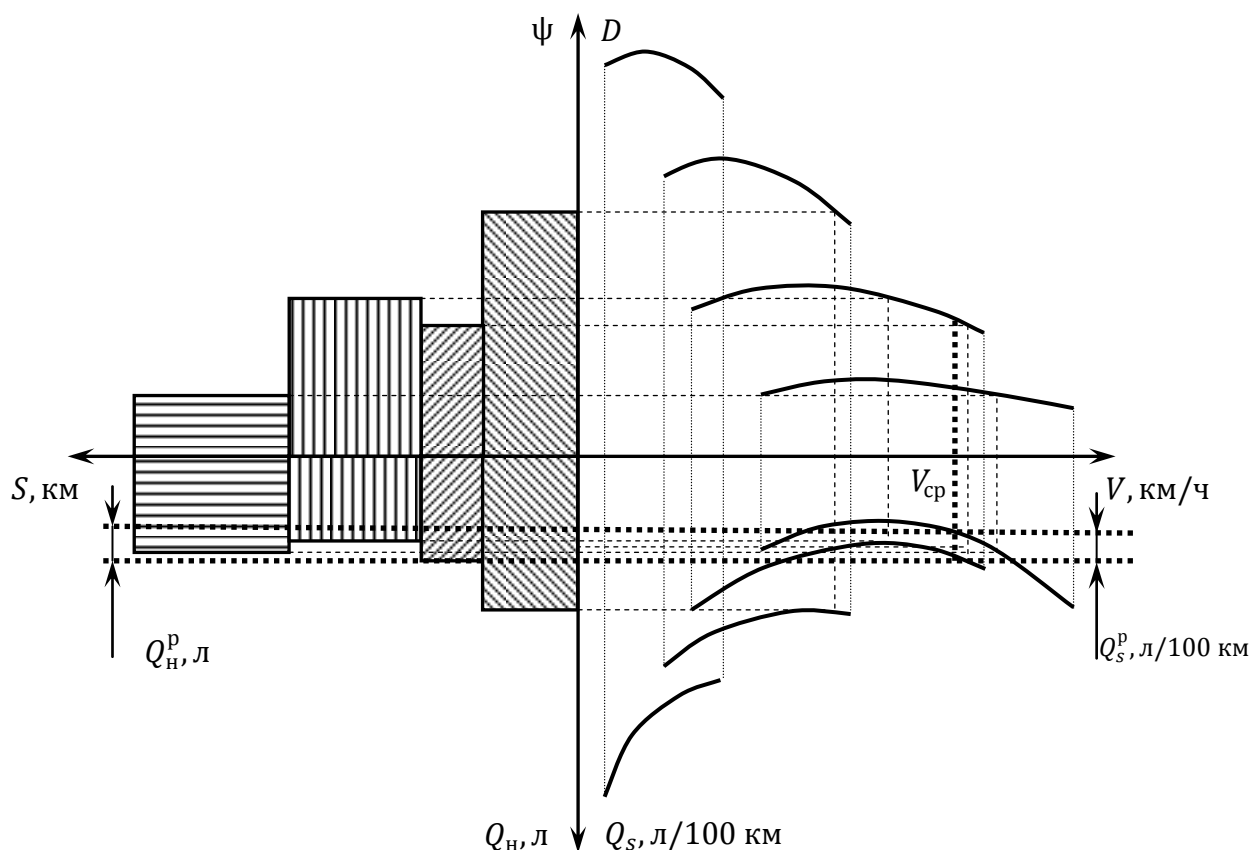


Рис. 1. Циклограмма нормирования расхода топлива АТС:

Q_s – линейный расход топлива; Q_s^p – реализуемое значение расхода топлива; Q_H – нормируемое значение расхода топлива; Q_H^p – реализуемое значение нормируемого расхода топлива

В результате проверялась гипотеза о применимости экспоненциального закона (с отрицательной степенью) для городского движения. Гистограмма опытного распределения приведена на рис. 2.

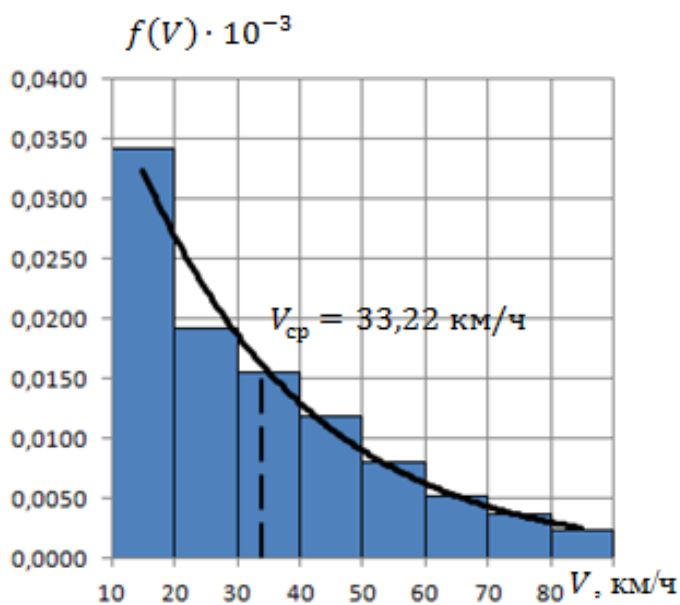


Рис. 2. Опытное распределение скоростей при движении в городах

Для городского движения была доказана правомочность использования показательного (экспоненциального с отрицательной степенью) закона распределения (с доверительной вероятностью $P_d = 95\%$) и получена экспериментальная зависимость плотности распределения скоростей:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} = 0,030151 e^{-0,030151 V_i}, \quad (5)$$

где $\lambda = 0,030151$ – параметр закона; x – середины интервалов значений скоростей движения. Кроме этого, с помощью критерия Пирсона, была доказана невозможность использования нормального закона распределения скоростей для городского движения АТС.

Опытные данные по значениям скоростей отражают объективную картину движения АТС, совершающих междугородные перевозки грузов с географией перевозок от Нижнего Новгорода до Санкт-Петербурга, Екатеринбурга и Челябинска. При этом данные по городскому движению содержат обобщенную информацию по всем крупным городам в указанных географических рамках. Нормативные значения расхода топлива определены по аналитическим выражениям, приведенным в Нормах на примере указанных АТС. Расчетные значения расхода топлива для указанных АТС получены по представленному ранее алгоритму. Экспериментальные (реальные) значения расходов топлив предоставлены АТП Нижнего Новгорода, эксплуатирующими указанные и подобные им АТС.

Сравнение величин нормативного и расчетного значения линейного расхода топлива с реальными эксплуатационными расходами топлива по предоставленным АТП Нижнего Новгорода данным произведено при изменении двух параметров: массы перевозимого груза и средней скорости движения на примере указанных АТС. Результаты сравнения представлены в графических зависимостях $Q_s(M_{гр})$ и $Q_s(V_{ср})$ на рис. 3,4. Построение зависимостей производилось по характерным точкам: для $M_{гр}$ – 0,5,10,15,20, $M_{доп}$, т; для $V_{ср}$ – V_{min} ,15,30,45,60, $V_{доп}$, км/ч.

Оценка сходимости результатов (при перевозке 20 т груза) показывает, что отклонение расчетного значения расхода топлива от реального составляет около 3,2 л/100 км, т.е. около 8,5% (при соответствующих значениях расчетного и реального расхода топлива - 41,26 л/100 км и 38,10 л/100 км). При этом нормативное значение расхода топлив 50,94 л/100 км превышает реальное на 33,7%.

При учете реальных распределений скоростей движения для перевозке 20 т груза по маршруту Нижний Новгород – Екатеринбург основные результаты расчетов следующие: $V_{ср} = 56,04$ км/ч и $Q_s = 38,53$ л/100 км, что отличается от реального расхода топлива в 1,2%.

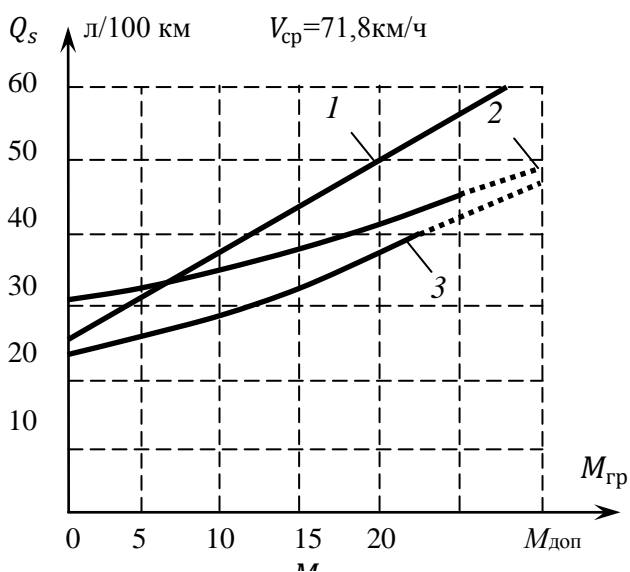


Рис. 3. Изменение линейного

расхода топлива от массы перевозимого груза:

- 1 – нормативное значение;
- 2 – расчетное значение;
- 3 – реальное значение.

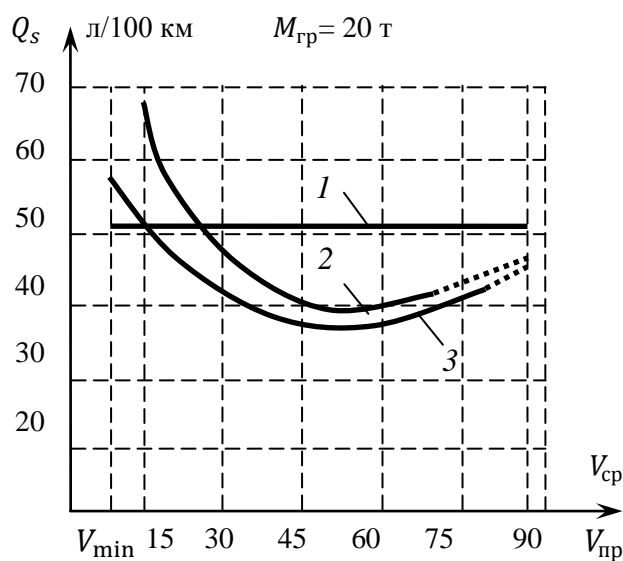


Рис. 4. Изменение линейного

расхода топлива от средней скорости движения:

- 1 – нормативное значение;
- 2 – расчетное значение;
- 3 – реальное значение.

В настоящее время автором проводится окончательная обработка данных и выверение методики, но можно утверждать, что состоятельность предлагаемой вероятностно-аналитической методики нормирования расхода топлива в условиях работы АТП доказана.

Библиографический список

1. **Борисов, Г.В.** К вопросу о нормировании расхода жидких топлив на автомобильном транспорте / Г.В. Борисов, К.Я. Лелиовский, Н.А. Кузьмин [Текст] // Автотранспортное предприятие. 2015. № 2. С. 51-55.
2. **Борисов, Г.В.** Нормирование расхода топлив на автомобильном транспорте / Г.В. Борисов, К.Я. Лелиовский, Г.В. Пачурин [Текст] // Фундаментальные исследования. 2015. № 3. С. 28-35.
3. **Борисов, Г.В.** Аналитический подход к нормированию расхода автомобильных топлив / Г.В. Борисов, Н.А. Кузьмин, Л.Н. Ерофеева [Текст] // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2015, №3.
4. **Борисов Г.В.** Уточнение топливного баланса автомобиля [Текст] / Н.А. Кузьмин, Г.В. Борисов // Безопасность транспортных средств в эксплуатации: материалы 78-й научной конференции НГТУ. – Н. Новгород: НГТУ, 2010. С. 138-140.