

# Эксперимент и теория: распределения характеристик движения автомобиля



Сергей ОГОРОДНОВ  
Sergey M. OGORODNOV

Сергей МАЛЕЕВ  
Sergey I. MALEEV



*Огороднов Сергей Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и тракторов Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.*

*Малеев Сергей Игоревич – ассистент кафедры автомобилей и тракторов Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.*

## Experiment and Theory: Distribution of Characteristics of Car Motion

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 28)

**Основным фактором, формирующим возмущение, действующее на автомобиль в условиях эксплуатации, является скорость движения. Аналитические исследования эксплуатационных свойств и показателей надёжности базируются на характеристиках движения – распределениях пробегов и скорости, в некоторых случаях устаревших, или неполных и не коррелируемых с характеристиками макропрофиля маршрутов движения. Приведены данные об исследованиях характеристик макропрофиля загородных дорог средней полосы России, предложена их классификация. Выделены стационарные массивы случайных величин относительных пробегов и выполнена аппроксимация случайных распределений скорости аналитическими зависимостями. Полученные результаты позволяют моделировать движение автомобиля на ранних стадиях проектных работ и повысить точность оценки исследуемых параметров и характеристик.**

*Ключевые слова:* автомобиль, возмущение, макропрофиль, аналитические исследования, теоретические методы, эксперимент, аппроксимация, распределение, пробег, скорость, проектирование, модель движения.

**П**роектирование автомобилей, выбор конструктивных параметров узлов и агрегатов осуществляется с использованием математических (расчётных) моделей [1–3]. Теоретические методы позволяют выполнить исследования динамических свойств объекта на ранних этапах проектных работ. При исследовании математической модели значимость конечного результата во многом зависит от способа формирования действующих возмущений. Движение транспортных средств (ТС) в условиях эксплуатации происходит при случайных вариациях скорости, обусловленных продольным рельефом пути (макропрофиль), типом микропрофиля и состоянием поверхности дороги, инфраструктурой, интенсивностью движения и другими факторами, в том числе субъективными.

Скорость движения признаётся решающим фактором, формирующим возмущение опорной поверхности. Аналитические исследования вибронгруженности, долговечности, топливной эффективности и других эксплуатационных свойств автомобилей опираются на характеристики, устанавливающие связь пройденного пути

(пробег) или времени движения автомобиля со скоростью.

Основным недостатком методик расчёта показателей эксплуатационных свойств автомобиля является идеализированное представление о распределениях пробегов на различных передачах коробки передач [3]. В них не учитываются изменившиеся за последние годы состояние автомобильных дорог, типаж ТС, условия движения и другие моменты. Кроме того, методики исходят из предположения нормальных законов распределения пробега (времени движения) на каждой из передач и скорости движения автомобиля в зависимости от пробега. В отдельных случаях распределения уточняются с помощью эмпирических коэффициентов [4].

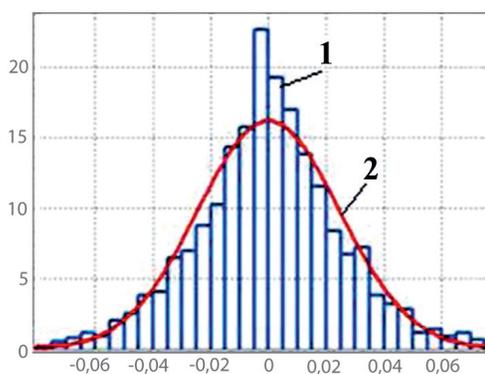
Достоверность результатов расчётов возрастает при использовании экспериментально установленных распределений относительных пробегов или аппроксимирующих их аналитических зависимостей, коррелированных с типом макропрофиля дороги (рельефа местности). Основное отличие полученных экспериментальных данных о распределениях пробегов состоит в увеличении доли пробега на высшей — пятой передаче и снижении доли пробега на третьей и четвёртой передачах. Объяснение этого факта может быть связано с увеличением скорости движения автомобилей вне города вследствие роста удельной мощности двигателя. Результаты такого рода подтверждаются, в частности, близкой по тематике поставленным задачам работой, выполненной в МГТУ им. Н. Э. Баумана [5].

В нашей статье приводятся сведения о выполненных авторами экспериментальных исследованиях [6–8]:

- макропрофиля загородных автомобильных дорог средней полосы России (Нижегородская область), предложена их систематизация в зависимости от типа рельефа местности;

- распределений времени и пробегов на каждой из передач и для различных маршрутов;

- распределений относительных величин пробегов и времени движения в зависимости от скорости и используемой передачи.



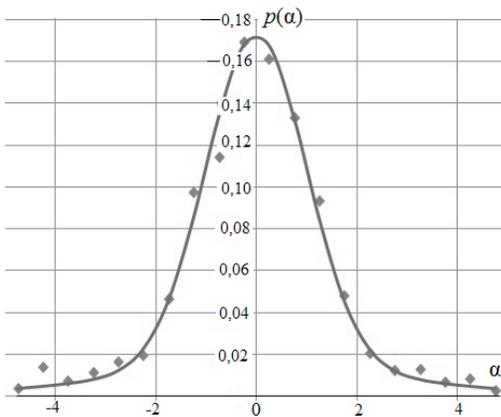
**Рис. 1. Характеристики макропрофиля:**  
1 – дискретная экспериментальная;  
2 – плотность распределения нормального закона.

## ИССЛЕДОВАНИЯ МАКРОПРОФИЛЯ ДОРОГ

Маршруты, выбранные в пределах Нижегородской области, отличались рельефом местности и наличием овражно-балочной сети. Протяжённость их составила от 50 до 150 км и зависела от продолжности рельефа. Параметры распределений продольных углов макропрофиля маршрутов движения определены методом регистрации географических координат и уклонов дороги с помощью приложения «Google Планета Земля». Для оценки статистической достоверности полученных характеристик дополнительно проведены экспериментальные исследования макропрофиля. Установлено, что необходимые условия стационарности исследуемых случайных процессов выполняются при размере выборочных реализаций 60 км для сильно пересечённой местности и 40 км для местности с малым числом пологих холмов.

Для определения закона распределения и количественных показателей характеристик плотности распределения продольных углов (уклонов) дороги применена методика обработки данных с условным геопространственным соотношением «пробег–высота над уровнем моря» [6]. При этом отмечено, что аппроксимация экспериментально полученной дискретной зависимости кривой плотности распределения нормального закона (рис. 1) не может быть признана удачной. Несоответствие плот-





**Рис. 2.** Плотность вероятности продольных уклонов макропрофиля дорог.

ности распределения продольных углов макропрофиля нормальному закону объясняется технологическими воздействиями на поверхность при строительстве загородных дорог, в результате которых относительно небольшие уклоны пути сглаживаются, а спуски и подъёмы значительной длины изменяются значительно меньше. Аналитическая зависимость, в большей степени соответствующая экспериментально полученному дискретному распределению, состоит из двух составляющих с нормальными законами распределений и может быть представлена выражением

$$p(\alpha_i) = k_1 \frac{\Delta\alpha}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\alpha_i)^2}{2\sigma_1^2}} + k_2 \frac{\Delta\alpha}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\alpha_i)^2}{2\sigma_2^2}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, k_1, k_2$  – параметры распределения,  $(k_1 + k_2) = 1, \alpha_{i(j+1)} = \alpha_{ij} + \Delta\alpha, \Delta\alpha = 0,5^\circ, \alpha_i = 0,5(\alpha_{ij} + \alpha_{i(j+1)})$ .

На рис. 2 показана характеристика плотности распределения продольных углов макропрофиля испытательного участка, полученная аппроксимацией дискретной экспериментальной зависимости с помощью выражения (1).

В результате исследований предложена систематизация типов макропрофиля дорог по степени «холмистости», отличающихся: максимальными значениями величин продольных углов  $\alpha_{\max}$ ; максимальными

ми значениями плотности вероятности  $p(0)$  при  $\alpha = 0$ ; значениями плотности вероятности  $p(1^\circ), p(2^\circ), p(3^\circ)$ , соответствующими продольным углам макропрофиля  $\alpha$ , равным  $1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$ .

Среди выбранных маршрутов движения с однозначным трендом характеристик макропрофиля имеются такие, в которых относительно ровные и длинные участки пути сменяются продолжительными крутыми подъёмами и спусками. Они отнесены к категории «сложный макропрофиль». Обозначения типов макропрофиля в соответствии со значениями параметров плотности вероятности продольных углов и по степени «холмистости» дороги, предложенные авторами, приведены в таблице 1 и имеют условный характер.

## МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Объектом исследования являлся лёгкий коммерческий автомобиль «ГАЗель NEXT» грузоподъёмностью 1,5 т с дизельным двигателем CUMMINS ISF 2.8, оборудованным электронным блоком управления. В состав блока входит шина CAN, предназначенная для передачи команд управления и информации. Сигналы шины обрабатывались с помощью дополнительного оборудования Electronic control module (ECM), обеспечивающего регистрацию: частоты вращения коленчатого вала, мгновенных значений скорости автомобиля, времени в пути, мгновенного расхода топлива и других параметров. Устройство ECM обеспечивает регистрацию сигналов через заданный промежуток времени – 0,8 с. Способ регистрации и обработки сигналов датчиков даёт представление о непрерывном неравномерном движении автомобиля, состоящем из отдельных режимов (разгон, постоянная скорость, замедление), совокупностью вариаций режимов, в пределах которых скорость считалась постоянной.

**Таблица 1**

### Систематизация типов макропрофиля

Наименование	Обозначение	$\alpha_{\max}, ^\circ$	$p(0)$	$p(1^\circ)$	$p(2^\circ)$	$p(3^\circ)$
Ровный	P	2,75	0,430	0,290	0,007	–
Среднехолмистый	CX	4,75	0,171	0,011	0,034	0,012
Холмистый	X	4,75	0,190	0,089	0,046	0,180
Сложный	C	4,75	0,214	0,078	0,039	0,210

Испытания велись при наиболее интенсивном движении на дороге. В целях исключения влияния на режим движения автомобиля субъективных факторов при испытательных заездах периодически менялись водители. Участки маршрутов, на которых скорость автомобиля определялась случайными факторами, при регистрации параметров не учитывались. Протяжённость маршрутов составляла 350–520 км. Измерения проводились при движении ТС в прямом и обратном направлении.

## ОЦЕНКА СТАЦИОНАРНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК

При расчёте эксплуатационных показателей ТС аналитическими методами [4, 5, 8, 9] имеет значение не только продолжительность движения, но и возможные изменения скорости на каждой из передач.

Продолжительность движения измеряется временем или пробегом. Анализ движения автомобиля по испытательным маршрутам выполнен с использованием экспериментальных распределений случайных дискретных величин пробега (времени) и скорости движения в зависимости от передачи. Случайные характеристики величин пробега (времени) могут рассматриваться как относительные. Относительный пробег – отношение суммарного пробега на данной передаче к длине маршрута движения. Относительное время – отношение суммарного времени движения на данной передаче ко времени движения в пределах маршрута.

Для получения статистически достоверной информации о законах распределения скорости движения в зависимости от величин относительных пробегов выполнены исследования характера стационарности случайных дискретных совокупностей (вариационный ряд) величин относительных пробегов на каждой из передач. Вариационные ряды получены как функции размеров выборочных реализаций (выборка). Массивы экспериментальных данных, соответствующих стационарным выборкам случайных процессов относительных пробегов, позволяют при обработке получить полноценную информацию.

В качестве примера приведена процедура обработки экспериментальных данных, полученных при движении ТС по маршруту протяжённостью 420 км, соот-

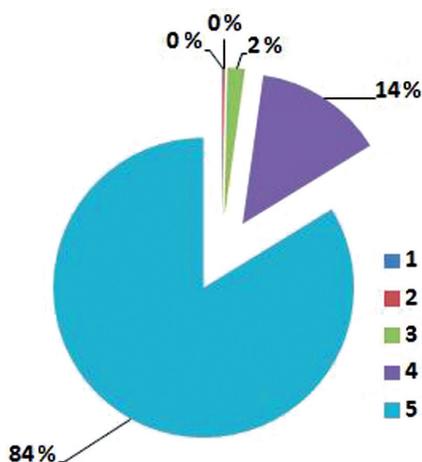


Рис. 3. Относительный пробег на передачах.

ветствующему дороге типа Р (таблица 1), с покрытием хорошего качества. С учётом приоритета, определяемого величиной пробегов на 4-й и 5-й передачах (98 % от длины маршрута), исследуются условия стационарности выборочных реализаций относительных пробегов (рис. 3).

Для оценки стационарности случайной величины используется коэффициент вариации  $V_x$  как относительная мера отклонения значений среднеквадратической величины от её среднеарифметического значения:

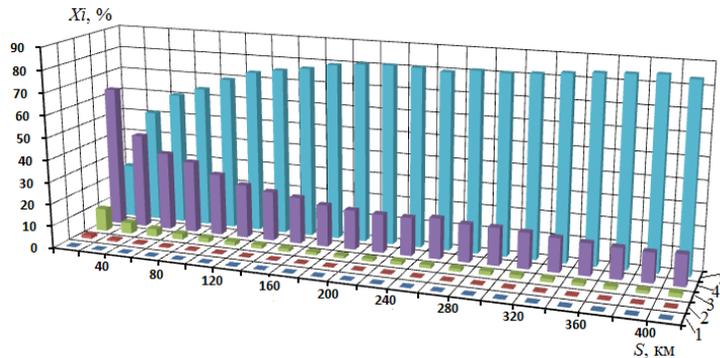
$$V_x = \frac{\sigma_x 100\%}{m_x}, \quad (2)$$

где  $m_x$  – среднее значение случайной величины,  $\sigma_x$  – среднее квадратическое отклонение.

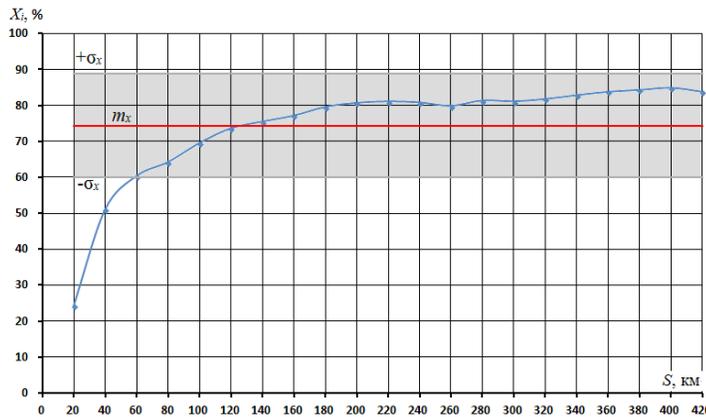
В технических задачах случайный процесс считается практически стационарным при значениях коэффициента вариации, меньших 10 %, и условно стационарным – при значениях коэффициента, не превышающих 20 %.

На рис. 4 показано распределение относительных пробегов  $X_i$  при движении на 5-й передаче в зависимости от размера выборки  $s_i$  и передачи. Для сокращения трудоёмкости обработки результатов испытаний размеры выборок принимались кратными 20 км. Расчёт среднеарифметических и среднеквадратических значений относительных пробегов, коэффициентов вариаций выполняется отдельно для каждой выборки. Наиболее полная выборка размером 420 км (длина маршрута) имеет сравнительно большой





**Рис. 4.** Дискретные совокупности случайных величин относительных пробегов в зависимости от размера выборки и передачи.



**Рис. 5.** Относительный пробег в зависимости от размера выборки и передачи.

разброс величин относительных пробегов  $X_i$  и малую выравненность дискретного ряда значений за счёт начального этапа (рис. 5). Установленная особенность распределения свидетельствует о возможной нестационарности исследуемого процесса. Относительная выравненность дискретного ряда значений относительных пробегов наступает при смещении начала отсчёта не менее чем на 80 км.

С этого момента значения коэффициента вариации для выборок существенно не отличаются, изменчивость вариационного ряда следует считать незначительной, а процесс практически стационарным.

Результаты расчёта моментных функций и коэффициентов вариации в зависимости от типа макропрофиля и передачи в таблице 2.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ

Установлено, что скорость автомобиля является многопараметрической функцией и зависит от характеристик макропрофиля

участков маршрута, передачи и ряда субъективных факторов.

При построении распределений скорости в зависимости от используемой передачи и относительного пробега (рис. 6) из массива данных выделяются массивы случайных величин относительных пробегов, отвечающие условию стационарности, и соответствующие им массивы данных о скорости движения. Для каждой передачи устанавливается диапазон изменения скорости движения, который разбивается на интервалы  $\Delta V_i = 5$  км/ч. В интервалы  $\Delta V_i$  отнесены мгновенные (измеренные) значения скорости движения  $V_p$ , большие или равные минимальному значению скорости  $V_{\min}$  интервала «n», и меньше максимальной скорости  $V_{\max}$  этого интервала.

Следующим шагом алгоритма обработки данных определяются величины относительных пробегов для интервалов  $\Delta V_i$  в диапазоне скоростей движения на каждой передаче.

В пределах выборочной реализации расстояние, пройденное за время движения

**Моментные функции и коэффициенты вариации относительных пробегов на 4-й и 5-й передачах в зависимости от типа макропрофиля**

Тип макропрофиля маршрута	№ передачи	Размер выборки, $n$ , км	Среднее значение относительных пробегов, $m_x$	Среднее квадратическое отклонение, $\sigma_x$	Коэффициент вариации, $V_x$ , %
Ровный	4	300	0,167	0,022	13,9
	5		0,783	0,025	3,2
Среднехолмистый	4	340	0,195	0,017	8,5
	5		0,720	0,036	5,0
Холмистый	4	260	0,144	0,012	8,5
	5		0,798	0,019	2,4
Сложный	4	240	0,171	0,013	1,7
	5		0,789	0,016	9,2

на каждой передаче, находится в соответствии с выражением

$$s_{\Sigma n} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m s_i = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m v_i t_{vi}, \quad (3)$$

где  $s_{\Sigma n}$  – суммарный пробег на передаче;  $n$  – номер передачи;  $v_i$  – скорость движения в пределах интервала  $\Delta V_i$ ;  $t_{vi}$  – время движения со скоростью  $v_i$  в пределах интервала  $\Delta V_i$ ;  $s_p$  – пробег со скоростью  $v_i$ ;  $k$  – число интервалов  $\Delta V_i$  в диапазоне изменения скорости на передаче  $n$ ;  $m$  – количество измеренных значений скорости в пределах интервала.

Относительный пробег на передаче определяется выражением

$$s_n = \frac{s_{\Sigma n}}{\sum_{n=1}^5 s_{\Sigma n}}, \quad (4)$$

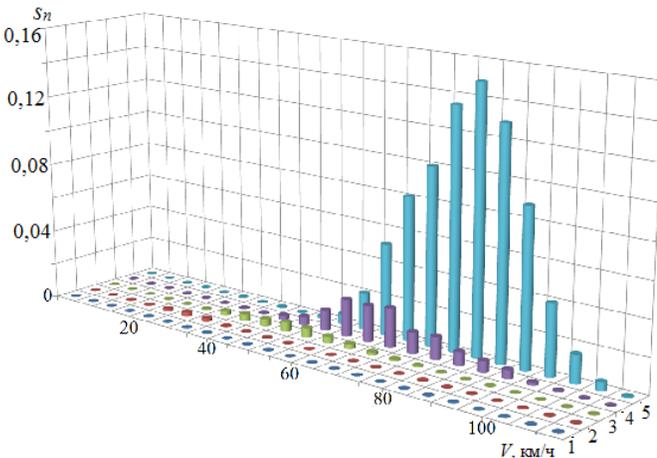
где  $s_n$  – относительный пробег на  $n$ -й передаче.

На рис. 6 приведены дискретные характеристики распределения скорости в зависимости от относительного пробега на каждой передаче.

На рис. 7–11 дискретные распределения скорости представлены отдельными точками, непрерывные аппроксимации дискретных зависимостей получены в результате их обработки методом наименьших средних квадратов. Экспериментальные распределения скорости могут быть аппроксимированы аналитическими выражениями. Установлено, что на дорогах с любым из исследованных типов макропрофилей распределения скоростей при движении на 1-й и 2-й передачах близки к логарифмически нормальному закону, а на высших передачах соответствуют нормальному закону.

Выражение для расчёта плотности вероятности скорости движения в заданном интервале (времени, пробега) для логарифмически нормального закона распределения имеет вид:

$$\rho(V_i) = \frac{\Delta V}{\sigma_{V_i} V_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln V_i - a)^2}{2\sigma_{V_i}^2}}, \quad (5)$$



**Рис. 6. Распределение скорости в зависимости от передачи и относительного пробега.**



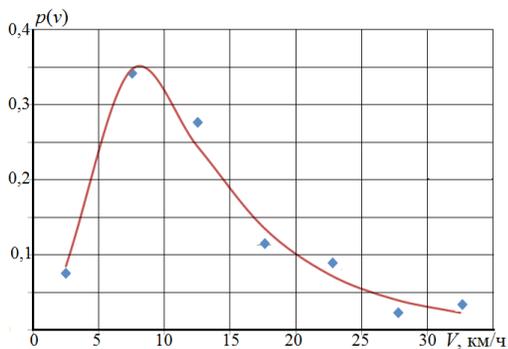


Рис. 7. Кривая распределения скорости, передача 1.

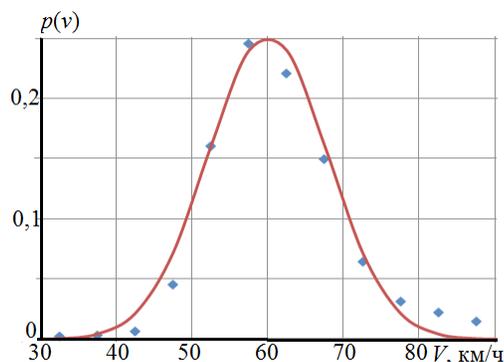


Рис. 10. Кривая распределения скорости, передача 4.

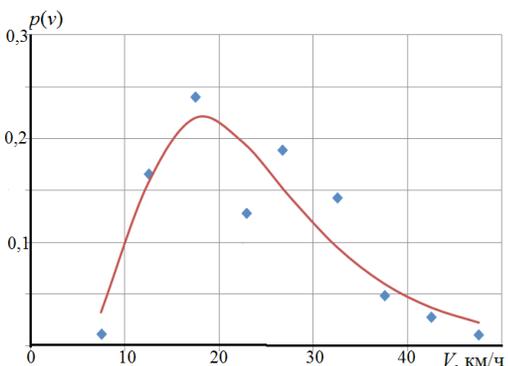


Рис. 8. Кривая распределения скорости, передача 2.

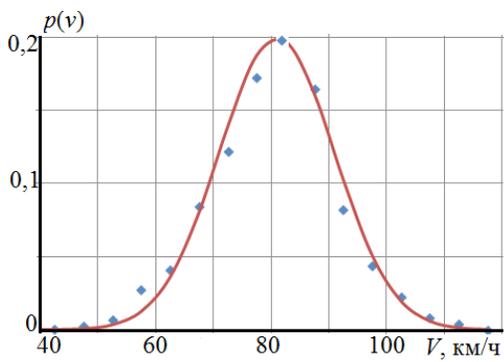


Рис. 11. Кривая распределения скорости, передача 5.

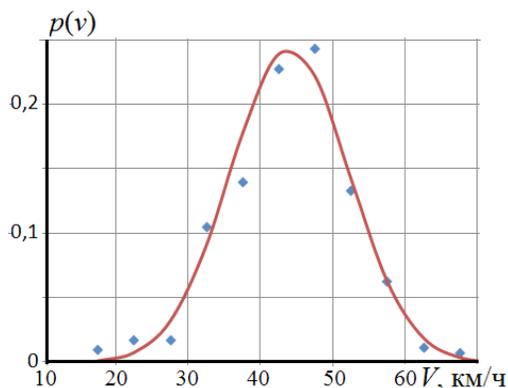


Рис. 9. Кривая распределения скорости, передача 3.

$$\rho(V_i) = \frac{\Delta V}{\sigma_{v_i} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(V_i - \bar{V}_i)^2}{2\sigma_{v_i}^2}}, \quad (6)$$

где  $\bar{V}_i$ ,  $\sigma_{v_i}$  – параметры распределения;

$$\Delta V = 5 \text{ км/ч}, V_{i(j+1)} = V_{i(j)} + \Delta V,$$

$$V_i = 0,5(V_{i(j)} + V_{i(j+1)}), V_i = (V_i^{\min}, V_i^{\max}),$$

$V_i^{\min}$ ,  $V_i^{\max}$  – минимальное и максимальное значения диапазонов.

Параметры распределений скорости по пробегу в зависимости от передачи при движении автомобиля категории  $N_1$  по дорогам с макропрофилем типов Р, СХ, Х, С приведены в таблицах 3 и 4.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные и теоретические распределения скорости ТС и аппроксимирующие их аналитические зависимости позволяют моделировать движение автомобиля с целью аналитического исследования показателей эксплуатационных свойств по основным типам дорог средней

где  $a$ ,  $\sigma_{v_i}$  – параметры распределения;  
 $V_{i(j+1)} = V_{i(j)} + \Delta V$ ,  $\Delta V = 5 \text{ км/ч}$ ,  
 $V_i = 0,5(V_{i(j)} + V_{i(j+1)})$ ,  $V_i = (V_i^{\min}, V_i^{\max})$  – минимальное и максимальное значения диапазона изменения скорости.

Выражение для расчёта плотности вероятности скорости движения при нормальном законе распределения:

Таблица 3

**Параметры распределений скорости в зависимости от передачи для дорог типов Р и СХ**

№ передачи	Параметры распределений скорости									
	a		$\bar{V}_i$		$\sigma_{v_i}$		$V_i^{\min}$		$V_i^{\max}$	
	Р	СХ	Р	СХ	Р	СХ	Р	СХ	Р	СХ
1	2,4	2,3	—	—	0,63	2,3	0	0	50	35
2	3,1	3,4	—	—	0,45	3,4	5	10	50	55
3	—	—	44	48	8,2	11	15	15	85	85
4	—	—	60	61	7,9	9	20	20	105	100
5	—	—	81	79	10	11	25	25	120	100

Таблица 4

**Параметры распределений скорости в зависимости от передачи для дорог типов Х и С**

№ передачи	Параметры распределений скорости									
	a		$\bar{V}_i$		$\sigma_{v_i}$		$V_i^{\min}$		$V_i^{\max}$	
	Х	С	Х	С	Х	С	Х	С	Х	С
1	2,9	2,6	—	—	0,63	0,60	0	0	50	50
2	3,4	3,2	—	—	0,20	0,48	5	5	85	75
3	—	—	49	54	12	15,0	20	15	90	85
4	—	—	65	62	12	9,8	25	20	110	100
5	—	—	81	77	11	9,0	30	30	115	105

полосы РФ. Получаемые данные обеспечивают сравнительный анализ конструктивных вариантов узлов и агрегатов, или моделей ТС одной категории, или близких по основным массовым и техническим характеристикам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Feng Tyan, Yu-Fen Hong. Generation of random road profile. CSME: B04-0001. – 2006. – Pp. 1373–1377.

2. Зезюлин Д. В., Макаров В. С., Тумасов А. В., Огороднов С. М. Обоснование методов решения задачи оценки усталостной долговечности деталей и узлов подвески автомобилей // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4. [Электронный ресурс]: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=9695>. Доступ 31.08.2017.

3. Цитович И. С., Вавуло В. А., Хваль Б. Н. Зубчатые колёса автомобилей и тракторов: проектирование и расчёт. – Минск: Изд-во Минобразования БССР, 1962. – 396 с.

4. Кравец В. Н. Теория автомобиля: Учеб. пособие / Нижегород. гос. техн. ун-т им. П. Е. Алексеева. – 2-е изд., переработ. – Н. Новгород, 2013. – 413 с.

5. Бутарович Д. О., Смирнов А. А. Распределение относительных пробегов лёгких коммерческих автомобилей по результатам дорожных испытаний // Журнал автомобильных инженеров. – 2013. – № 6. – С. 28–32.

6. Ogorodnov, S. Methodology of Roadway Impacts Modeling to Predict the Fatigue Life of Vehicles / S. Ogorodnov, D. Zezyulin, V. Makarov, V. Belyakov. Acta Technica Jaurinensis. – 2014. – Vol. 7. – No. 3. – pp. 267–279, DOI: 10.14513/actatechjaur.v.n3.277.

7. Belyakov, V. Modeling of roads impacts for life prediction of light commercial vehicles part / V. Makarov, D. Zezyulin. – FISITA 2014 World Automotive Congress, the Netherlands, Maastricht, 2–6 June. – F2014-LWS-040.

8. Малеев С. И., Зезюлин Д. В., Макаров В. С. Разработка расчётно-экспериментальной оценки расхода топлива при движении автомобиля по заданному маршруту // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. [Электронный ресурс]: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=14280>. Доступ 31.08.2017.

9. Мусарский Р. А. Математические модели колёсных экипажей: Учеб. пособие. – Н. Новгород: Нижегород. госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, 2008. – 164 с.

10. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и её инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.

Координаты авторов: **Огороднов С. М.** – [cte@mail.ru](mailto:cte@mail.ru), **Малеев С. И.** – [sergmaleev91@mail.ru](mailto:sergmaleev91@mail.ru).

Статья поступила в редакцию 08.08.2017, принята к публикации 31.08.2017.

**Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта по договору № 02.G25.31.0006 от 12.02.2013 г. (постановление правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года № 218).**

