

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian journal of transport engineering <https://t-s.today/>

2017, Том 4, №4 / 2017, Vol 4, No 4 <https://t-s.today/issues/vol4-no4.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/01TS417.pdf>

DOI: 10.15862/01TS417 (<http://dx.doi.org/10.15862/01TS417>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Юшков В.С., Овчинников И.Г. Математическая модель движения транспортных средств по виброполосе, предназначенной для снижения аварийности на автомобильных дорогах России // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №4 (2017) <https://t-s.today/PDF/01TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/01TS417

For citation:

Yushkov V.S., Ovchinnikov I.G. [Mathematical model of movement of vehicles by vibropolose, intended to reduce emergency on roads of Russia] Russian journal of transport engineering, 2017, Vol. 4, no. 4. Available at: <https://t-s.today/PDF/01TS417.pdf> (In Russ.) DOI: 10.15862/01TS417

УДК 625.7:621.317

Юшков Владимир Сергеевич

ФГБОУ ВО «Московский педагогический государственный университет»
Анапский филиал, Россия, Анапа
Старший преподаватель
E-mail: vova_84_07@mail.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=595349

Овчинников Игорь Георгиевич

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов¹
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь
Доктор технических наук, профессор
E-mail: bridgesar@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=2922

Математическая модель движения транспортных средств по виброполосе, предназначенной для снижения аварийности на автомобильных дорогах России

Аннотация. Технические средства организации дорожного движения, в связи с постоянным ростом парка транспортных средств, требуют постоянного развития и модернизации. В работе предлагается инновационный подход решения данной проблемы путем создания по краям поверхности автомобильной дороги искусственной неровности, создающей вибрации при движении автомобиля и потому называемой виброполосой. Представлена расчетная схема транспортного средства при движении по данной полосе и соответствующая математическая модель. С использованием данной модели построены графики зависимости перемещения рамы транспортного средства от глубины неровностей и график зависимости вертикального ускорения кресла водителя от скорости движения автомобиля при различной глубине неровностей виброполосы. Рассчитаны рекомендуемые параметры искусственной неровности, позволяющие при различных скоростях движения транспортных средств разных классов оказывать необходимое вибрационное воздействие на водителя.

¹ 410054, Саратов, Политехническая 77

Ключевые слова: автомобильная дорога; виброполоса; искусственная неровность; математическая модель; транспортное средство

Введение

В настоящее время одной из основных проблем в России является высокий уровень аварийности на автомобильных дорогах, что приводит к растущему числу погибших и пострадавших в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП). С данной проблемой сталкивается не только наша страна, но и ряд зарубежных стран, поэтому обеспечение безопасности дорожного движения становится глобальным вызовом для всего человечества.

Для повышения безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах разрабатывается комплекс инженерно-технических, планировочных и организационных решений, а также проводятся различные мероприятия, направленные на защиту всех участников движения от ДТП и их последствий [1].

Для решения данной проблемы существует ряд технических средств регулирования и повышения безопасности дорожного движения. Однако применение данных средств и увеличение штрафов за несоблюдение правил дорожного движения не всегда обеспечивает необходимый уровень снижения аварийности на автомобильных дорогах.

1. Математическая модель движения транспортных средств по виброполосе

В работе предлагается создание искусственной неровности в виде виброполосы, использование которой позволяет значительно снизить количество ДТП путем устранения монотонности движения и повышения внимания водителя. В зарубежных странах для этих целей используется шумовая полоса, применение которой свидетельствует о высокой эффективности данной технологии. Так, например, в США такие полосы применяются в 85 % штатов, что приводит к снижению количества смертельных случаев. В Японии устройство шумовых полос на обочинах автомобильных дорог и на сплошной разделительной полосе позволило снизить количество столкновений со встречными транспортными средствами на 55 %. В Дании, Финляндии и Швеции устройство шумовых полос является обязательным при строительстве новых автомобильных дорог, т. к. также способствует снижению аварийности.

Главной отличительной особенностью предлагаемой виброполосы от существующих шумовых полос является не шумовое воздействие на водителя, а действие виброускорения, вызывающее повышение внимания водителя к характеру движения транспортного средства и приводящее к снижению скорости и повышению управляемости транспортным средством.

Существующие аналоги виброполос в большинстве случаев устраиваются в пределах населенных пунктов для снижения скорости движения, например, перед пешеходными переходами, образовательными учреждениями. Также применение виброполос снижает вероятность столкновения со встречным транспортным средством или съезда с обочины.

В связи с этим ставится задача построения математической модели движения автотранспортных средств (АТС) с целью оценки тактильного восприятия водителями некомфортных режимов движения при проезде по виброполосе. С использованием этой математической модели можно исследовать различные геометрические параметры виброполосы, вызывающие генерирование и передачу различных признаков движения.

В большинстве теоретических исследований колебаний АТС рассматриваются в виде системы сосредоточенных масс, взаимодействующих с поверхностью движения через упругие элементы и колеса с пневматической шиной, причем предполагается, что контакт шины с

поверхностью дорожной конструкции происходит в одной точке [3]. Однако при рассмотрении реальных условий движения контакт колеса транспортного средства с искусственной неровностью является более сложным, и потому необходимо учитывать размеры пятна контакта, величину деформации упругой шины, а также неровности различного типа и деформации самой поверхности дорожной конструкции.

Расчетная схема движения АТС, на основе анализа которой строится математическая модель взаимодействия АТС с дорожной конструкцией, представлена на рис. 1.

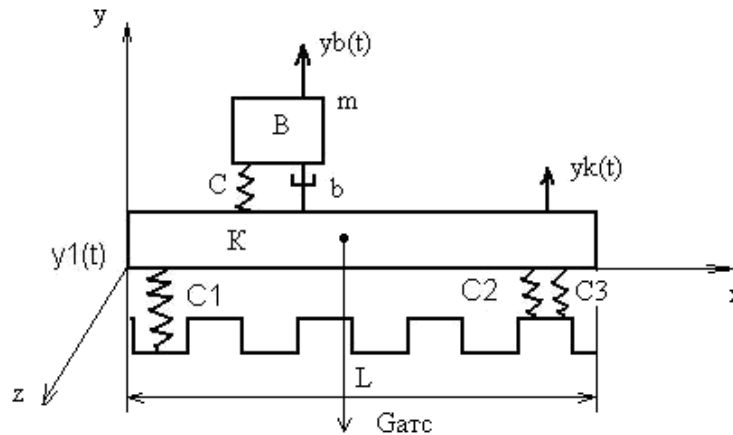


Рисунок 1. Расчетная схема АТС при движении по виброполосе, где *K* – рама АТС; *B* – водитель; *C*₁, *C*₂, *C*₃ – жесткость амортизаторов АТС; *C* – жесткость системы «кресло-водитель»; *b* – элемент демпфирования; *L* – длина рамы АТС; *G*_{АТС} – вес автомобиля (составлен авторами)

Система дифференциальных уравнений, представляющая математическую модель движения поддресоренных и неподдресоренных масс автомобиля по неровной поверхности движения может быть записана в виде [2]:

$$\begin{cases} \ddot{y} + \frac{2\dot{y}}{M_n} \sum_{i=1}^n \mu_{ai} + \frac{2y}{M_n} \sum_{i=1}^n C_{pi} = \frac{2}{M_n} \left(\sum_{i=1}^n \mu_{ai} \dot{\xi}_i + \sum_{i=1}^n C_{pi} \xi_i \right) \\ \ddot{\psi} + \frac{2\dot{\psi}}{I_n} \sum_{i=1}^n \mu_{ai} l_i^2 + \frac{2\psi}{I_n} \sum_{i=1}^n C_{pi} l_i^2 = \frac{2}{I_n} \left(\sum_{i=1}^n \mu_{ai} l_i \dot{\xi}_i + \sum_{i=1}^n C_{pi} l_i \xi_i \right) \\ \ddot{\xi}_i + \frac{2\dot{\xi}_i \mu_{ai}}{m_i} + \frac{2\xi_i (C_{pi} + C_{si})}{m_i} = \frac{2}{m_i} \left(C_{si} h + \frac{2\dot{y} \mu_{ai}}{m_i} + \frac{2y}{M_n} \sum_{i=1}^n C_{pi} \right) \end{cases} \quad (1)$$

где: M_n – поддресоренная масса машины; I_n – момент инерции поддресоренной части машины; l_i – расстояние от элементов подвески до центра массы машины; μ_{ai} – коэффициент сопротивления амортизатора; C_p и C_{si} – коэффициент жесткости рессоры и шины; m_i – масса неподдресоренной части машины; h – высота неровностей поверхности движения; y, \dot{y}, \ddot{y} и $\psi, \dot{\psi}, \ddot{\psi}$ – абсолютные линейные и угловые перемещения, скорости, ускорения поддресоренной массы; $\xi, \dot{\xi}, \ddot{\xi}$ – абсолютные угловые перемещения, скорости и ускорения неподдресоренной части машины массой m_i .

Модель неровностей имеет вид:

$$q(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ h \sin 2\pi \frac{V_a}{3,6H} t & \text{при } 0 < t < 1,8 \frac{H}{V_a} \\ 0 & \text{при } t > 1,8 \frac{H}{V_a} \end{cases}, \quad (2)$$

$$H = \sqrt{r_{CT} \cdot (3r_{CT} + 2h) - h^2},$$

где: h – высота неровностей; V_a – скорость АТС; r_{CT} – статический радиус шины при номинальной нагрузке; t – время, отсчитываемое от момента соприкосновения шин переднего моста с неровностью при наезде; расчетная высота обособленной неровности может быть принята в первом приближении по условию $0,1r_{CT} < h < 0,2r_{CT}$, H – длина волны неровностей.

Приведенная математическая модель (1), (2) позволяет выполнить анализ процессов генерирования колебаний при движении транспортных средств по искусственной неровности в виде виброполосы.

Установочный уклон рамы запишем в виде: $tg\alpha = \frac{y_3 - y_1}{L}$, где y_1 и y_3 – осадка первой и третьей опоры.

Сумма проекций сил, действующих на транспортное средство при движении его по виброполосе, на ось Y и сумма моментов этих сил относительно оси Z может быть представлена системой уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^3 F_y = \sum_{i=1}^3 y_i C_i - \frac{m_{АТС} \cdot g}{2} = 0 \\ \sum_{i=1}^3 M_z = \sum_{i=1}^3 y_i \cdot C_i \cdot l_A - \frac{m_{АТС} \cdot g \cdot l_A}{2} = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

где: $m_{АТС}$ – масса АТС, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Вертикальное отклонение в точке с координатой x_i равно:

$$y_i = \frac{y_3 - y_1}{L} \cdot x_i + y_3. \quad (4)$$

Из системы уравнений (3) после преобразований определяются y_1 и y_3 с учетом угла α :

$$y_1 = \frac{1}{n} \left[f + \frac{m \cdot \xi \cdot n - m \cdot \chi \cdot f}{m \cdot \chi - \partial \cdot n} \right], \quad y_3 = \frac{\xi \cdot n - \chi \cdot f}{m \cdot \chi - \partial \cdot n}, \quad y_{ib} = (L - x_b) \cdot tg\alpha + y_3.$$

где: $\partial, m, n, \xi, \chi, f$ – параметры математической модели, зависящие от типа транспортного средства, движущегося по исследуемой виброполосе, y_{ib} – перемещение рамы АТС в зоне водителя.

С учетом виброизоляции кресла водителя, параметров массы водителя, жесткости системы «кресло-водитель» и элемента демпфирования представим амплитуду колебаний в форме:

$$y_b = y_{\max} \left[1 + (2\beta\lambda)^2 \right]^{0.5} / \left[(1 - \lambda^2)^2 + (2\beta\lambda)^2 \right]^{0.5},$$

где: $\beta = 0,2 \dots 0,3$ – зависит от параметров массы водителя; $\lambda = \frac{\omega_b}{\omega_0}$, ω_0 – частота колебаний рамы АТС; ω_0 – собственная частота места колебания водителя; y_{\max} – максимальная величина отклонения рамы АТС при кинематическом воздействии с учетом отклонения рамы от глубины виброполосы в зоне водителя $y_{\max} = y_{ib} + h$.

Исследуем влияние виброполосы с параметрами $h = 10 \dots 50$ мм, $H = 150 \dots 300$ мм. Рассматриваемая виброполоса генерирует колебания на скорости в $30 \dots 90$ км/ч в диапазоне $40 \dots 70$ Гц. Собственная частота АТС является величиной, кратной генерируемой частоте [7]. Это обстоятельство вызывает увеличение виброперегрузок водителя.

По известной собственной частоте колебаний АТС можно решить задачу определения амплитуды колебаний водителя. Воздействие ускорений на пассажиров и водителя в значительной степени определяется частотой колебаний АТС [4]. Увеличение ускорения может привести к неприятным или болезненным ощущениям (таблица 1) [2]. Методика проведения исследований вибрации на организм человека и транспортных систем описана в межгосударственных стандартах².

Таблица 1

Ускорения (м/с²) колебаний, оказывающие отрицательное воздействие на пассажиров и водителя [2]

Частота колебаний, Гц	Ощущения	
	неприятные	болезненные
1,0	2,3	2,7
1,5	2,1	2,5
2,0	1,9	2,3
3,0	1,7	2,0

2. Результаты теоретических и экспериментальных данных

В качестве примера выполнены расчеты при силовых и геометрических параметрах транспортного средства, соответствующих модели КамаЗ-53212 6х4.2. Результаты численного моделирования приведены в таблице 2 и на рисунках 2 и 3.

² ГОСТ 12.1.012-2004. Система стандартов безопасности труда. Вибрационная безопасность. Общие требования.

ГОСТ 31191.1-2004. Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека.

ГОСТ 31317.2-2006. Вибрация. Лабораторный метод оценки вибрации сидений транспортных средств.

ГОСТ 31248-2004. Вибрация. Измерение и анализ общей вибрации, воздействующей на пассажиров и бригаду рельсового транспортного средства.

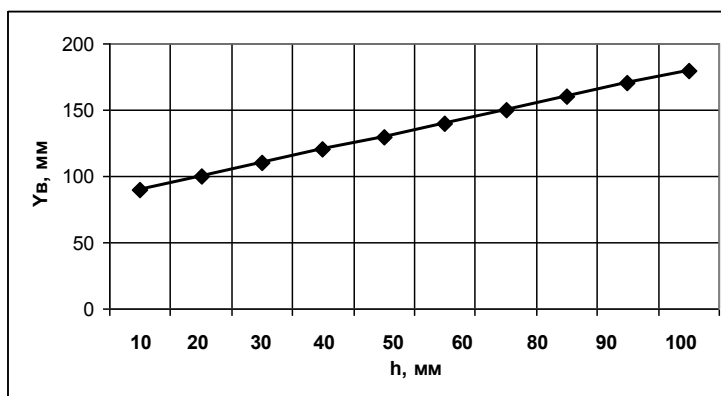


Рисунок 2. График зависимости перемещений рамы АТС в точке, соответствующей положению кресла водителя, от глубины неровностей виброполосы (составлен авторами)

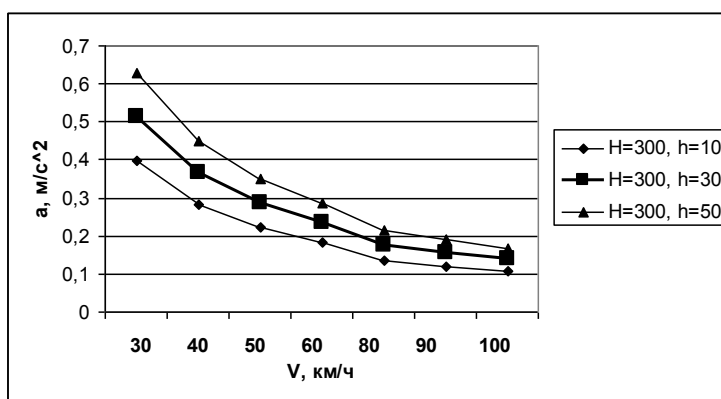


Рисунок 3. График зависимости вертикального ускорения кресла водителя от скорости движения АТС при различной глубине волны неровностей виброполосы (составлен авторами)

Таблица 2

Результаты численного моделирования (составлена авторами)

Автомобиль КамАЗ-53212			
H (мм)	h (мм)	V (км/ч)	a (м/с²)
150	10	30	0,182
		40	0,134
		50	0,107
		60	0,089
		80	0,066
		100	0,053
	20	30	0,208
		40	0,154
		50	0,122
		60	0,102
		80	0,076
		90	0,068
	30	30	0,235
		40	0,174
		50	0,138
		60	0,115
		80	0,086
		90	0,076
		100	0,068

Автомобиль КамАЗ-53212			
H (мм)	h (мм)	V (км/ч)	a (м/с ²)
	40	30	0,261
		40	0,193
		50	0,154
		60	0,128
		80	0,095
		90	0,085
		100	0,076
	50	30	0,288
		40	0,213
		50	0,169
		60	0,141
		80	0,105
		90	0,093
		100	0,084
200	10	30	0,248
		40	0,182
		50	0,144
		60	0,119
		80	0,089
		90	0,079
		100	0,071
	20	30	0,284
		40	0,208
		50	0,165
		60	0,136
		80	0,102
		90	0,090
		100	0,081
	30	30	0,320
		40	0,235
		50	0,186
		60	0,154
		80	0,155
		90	0,102
		100	0,092
	40	30	0,357
		40	0,261
		50	0,207
		60	0,171
		80	0,128
		90	0,113
		100	0,102
	50	30	0,393
		40	0,288
50		0,228	
60		0,189	
80		0,141	
90		0,125	
100		0,112	
250	10	30	0,319
		40	0,231
		50	0,182
		60	0,150
		80	0,111
		90	0,099
		100	0,089

Автомобиль КамАЗ-53212			
H (мм)	h (мм)	V (км/ч)	a (м/с ²)
	20	30	0,366
		40	0,265
		50	0,208
		60	0,172
		80	0,128
		90	0,113
		100	0,102
	30	30	0,412
		40	0,298
		50	0,235
		60	0,194
		80	0,144
		90	0,128
		100	0,115
	40	30	0,459
		40	0,332
		50	0,261
		60	0,216
		80	0,160
		90	0,142
		100	0,128
	50	30	0,506
		40	0,366
		50	0,288
60		0,238	
80		0,177	
90		0,157	
100		0,141	
300	10	30	0,396
		40	0,283
		50	0,221
		60	0,182
		80	0,134
		90	0,119
		100	0,107
	20	30	0,454
		40	0,324
		50	0,253
		60	0,208
		80	0,154
		90	0,16
		100	0,122
	30	30	0,512
		40	0,365
		50	0,285
		60	0,235
		80	0,174
		90	0,154
		100	0,138
	40	30	0,570
		40	0,407
		50	0,318
60		0,261	
80		0,193	
90		0,171	
100		0,1544	

Автомобиль КамАЗ-53212			
H (мм)	h (мм)	V (км/ч)	a (м/с ²)
	50	30	0,628
		40	0,448
		50	0,350
		60	0,288
		80	0,213
		90	0,189
		100	0,169

При увеличении глубины неровностей (рис. 2) с 10 мм до 100 мм амплитуда колебаний рамы в точке, соответствующей положению кресла водителя, возрастает практически по линейному закону на 70 %. В случае изменения скорости движения автомобиля с 30 до 100 км/час ускорение в точке рабочего места водителя уменьшается в три раза. В результате проведенных расчетов было выявлено, что наибольшее влияние на водителя оказывает глубина неровностей виброполосы (рис. 3) [8].

Физиологическим показателем восприятия водителем транспортного средства вибраций является время воздействия. При этом известно [5], что испытания, связанные с оценкой влияния вибраций на человека, осуществляются в течение 15 минутного цикла.

Выводы

На основании проведенного расчетного анализа с использованием приведенной модели рекомендуется устройство данной полосы со следующими параметрами: глубина неровности 50 мм; длина волны неровности 200 мм; ширина элемента искусственной неровности 150 мм; ширина виброполосы 150 мм [6].

По результатам проведенных и других [9, 10, 11] исследований можно заключить, что использование современных инновационных технических средств управления поведением водителя во время движения позволяет снизить количество ДТП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амбарцумян В.В. Безопасность дорожного движения – Глобальная проблема. Журнал «Контакт», № 774, США, Калифорния. 2007. – С. 30-31.
2. Вахламов В.К. Конструкция, расчет и эксплуатационные свойства автомобилей // учебное пособие. Изд-во «Академия» 2007, 560 с.
3. Ларин В.В. Теория движения полноприводных колесных машин: учебник / Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010 – 391 с.
4. Майборода, О.В. Основы управления автомобилем и безопасность движения: Учебник водителя автотранспортных средств категорий «С», «D», «E» / О.В. Майборода. – М.: ИЦ Академия, За рулем, 2011. – 256 с.
5. Фролов К.В. Виброизоляция машины и виброзащита человека-оператора. Государственный научно-исследовательский институт машиноведения, АН СССР, 1973. – 195 с.
6. Юшков В.С., Овчинников И.Г. Обоснование геометрических параметров виброполосы устанавливаемой на автомобильных дорогах // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, № 5 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/33TVN517.pdf> (доступ свободный).
7. Юшков В.С., Кычкин В.И., Юшков В.С. Воздействие виброполосы на человека – оператора при движении автомобиля // Журнал «Наука и техника в дорожной отрасли» № 1 Москва 2013 г. С. 21-23.
8. Юшков В.С. Достижения в развитии технических средств позволяющих снизить дорожно-транспортные происшествия // В сборнике: Выдающиеся научные достижения Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. 2017. С. 16-19.
9. Guit L., Moussu L. Les enrobes coules a froid discontinus, une solution innovante pour le traitement des zones accidentogenes II Revue Generate des Routes. – 1999. – № 774.
10. Huebner R.S., Anderson D.A., Warner J.S. Proposed design guidelines for reducing hydroplaning on new and rehabilitated pavements: Res. Results Dig. Nat. Coop. Highway Res. Program // Transp. Res. Boazol. – 1999. – № 243.
11. Synnefa, A., Karlessi, T., Gaitani, N., Santamouris, M., Assimakopoulos, D.N. and Papakatsikas, C. (2011). Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate. Building and Environment vol.46, pp. 38-44.

Yushkov Vladimir Sergeevich

Moscow state pedagogical university
Anapa branch, Russia, Anapa
E-mail: vova_84_07@mail.ru

Ovchinnikov Igor Georgievich

Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Russia, Saratov
Perm national research polytechnic university, Russia, Perm
E-mail: bridgesar@mail.ru

Mathematical model of movement of vehicles by vibropolose, intended to reduce emergency on roads of Russia

Abstract. Technical means of organizing traffic, in connection with the constant growth of the fleet of vehicles, require constant development and modernization. The paper proposes an innovative approach to solving this problem by creating an artificial unevenness along the edges of the road surface, creating vibrations when the vehicle moves and, therefore, called the vibratory band. A computational diagram of the vehicle is shown for driving along this strip and the corresponding mathematical model. Using this model, we plotted the dependence of the movement of the frame of the vehicle on the depth of the irregularities and the graph of the dependence of the vertical acceleration of the driver's seat on the speed of the car at various depths of the unevenness of the vibration strip. The recommended parameters of the artificial unevenness are calculated, which allow to provide the necessary vibration influence on the driver at different speeds of vehicles of different classes.

Keywords: road; vibroband; artificial unevenness; mathematical model; vehicle

REFERENCES

1. Ambartsumyan V.V. (2007). Road safety – A global problem. *Contact magazine*, 774, pp. 30-31. (in Russian).
2. Vakhlamov V.K. (2007). Konstruktsiya, raschet i ekspluatatsionnye svoistva avtomobilei. [*Design, calculation and operational properties of cars.*] Moscow: Publishing house "Academy", p. 560.
3. Larin V.V. (2010). Teoriya dvizheniya polnoprivodnykh kolesnykh mashin. [*Theory of motion of all-wheel drive vehicles.*] Moscow: Publishing house MSTU. N.E. Bauman, p. 391.
4. Maiboroda O.V. (2011). Osnovy upravleniya avtomobilem i bezopasnost' dvizheniya: Uchebnik voditelya avtotransportnykh sredstv kategorii «S», «D», «E». [*Basics of driving and traffic safety: A textbook for drivers of categories "C", "D", "E".*] Moscow: IC Academy, Driving, p. 256.
5. Frolov K.V. (1973). Vibroizolyatsiya mashiny i vibrozashchita cheloveka-operatora. [*Vibration isolation machine and vibration protection of human operator.*] Moscow: ANSSSR, p. 195.
6. Yushkov V.S., Ovchinnikov I.G. (2017). Substantiation of geometric parameters of a vibratory band installed on highways. *Naukovedenie*, [online] 5(9). Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/33TVN517.pdf> (in Russian).
7. Yushkov B.S., Kychkin V.I., Yushkov V.S. (2013). The impact of a vibrating band on a human operator when driving a car. *Journal of Science and Technology in the Road Industry*, 1, pp. 21-23. (in Russian).
8. Yushkov V.S. (2017). Achievements in the development of technical means to reduce road accidents. *Collection of articles on the materials of the international scientific-practical conference*, pp. 16-19. (in Russian).
9. Guit L., Moussu L. (1999). Les enrobes coules a froid discontinus, une solution innovante pour le traitement des zones accidentogenes. *II Revue Generate des Routes*, 774.
10. Huebner R.S., Anderson D.A., Warner J.S. (1999). Proposed design guidelines for reducing hydroplaning on new and rehabilitated pavements: Res. Results Dig. Nat. Coop. Highway Res. Program. *Transp. Res. Boazol.*, 243.
11. Synnefa A., Karlessi T., Gaitani N., Santamouris M., Assimakopoulos, D.N., Papakatsikas C. (2011). Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate. *Building and Enviroment*, 46, pp. 38-44.