

УДК: 625.7:621.317

В.С. Юшков, Б.С. Юшков, В.И. Кычкин

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ВИБРОПОЛОСЫ ПРИ СИСТЕМНОМ ПОДХОДЕ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Предложен системный подход к анализу и моделированию движения автотранспортного средства (АТС) по виброполосе как фактору снижения дорожно-транспортных происшествий (ДТП) с учетом состояния поверхностных слоев дороги и подвесочных узлов АТС. Проведены вычислительные эксперименты, результаты которых не противоречат реальной ситуации. При выборе параметров виброполосы учтены требования стандартов.

Ключевые слова: системный подход, ситуация, снижение частоты ДТП, автомобильная дорога, виброполоса, распространение волны, низкочастотные колебания.

V.S. Iushkov, B.S. Iushkov, V.I. Kychkin

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

THE USE OF VIBROPULSE WITH A SYSTEMATIC APPROACH TO ENSURING SAFETY OF ROAD TRAFFIC

The system approach to the analysis and modelling of movement the vehicle on vibrating strip, as is offered the factor of decrease road and transport incidents in view of a condition of superficial layers of road units automatic telephone exchange. Computing experiments which results are not inconsistent a real situation are carried spent. At choice parameters vibrating strip requirements of standards are taken into account.

Keywords: system approach, situation, decrease transport incidents, highway, vibrating strip, distribution of a wave, low-frequency fluctuations.

Необходимость снижения частоты ДТП на автомобильных дорогах, повышение эффективности эксплуатации АТС, снижение рисков проявления негативных процессов транспортной инфраструктуры на основе эффективных расчетно-экспериментальных методов проектирования, строительства, эксплуатации, ремонта и восстановления требуемых транспортно-эксплуатационных показателей, надежности технологических критериев объектов транспорта на этапах жизненного цикла, сокращение ресурсопотребления, адаптация к производствен-

ным условиям, учет экологических проблем определяют актуальность совершенствования и поиска новых форм и механизмов инновационного пути решения существующих и перспективных задач дорожно-транспортного комплекса России [1].

Среди имеющихся в настоящее время методов проектирования авторы рассматривают возможность реализации решения поставленной задачи на основе анализа ситуаций относительно дороги и оператора для случая, когда число возможных состояний АТС при движении по виброполосе оказывается существенно больше, чем количество управляющих воздействий. Действительно, разные типы АТС двигаются с различными скоростями, ориентировка АТС при движении различная, профессионализм вождения у каждого оператора разный. Таким образом, имеем условие $C \geq U$, где C – число ситуаций; U – число возможных управляющих воздействий, направленных на блокирование ДТП.

Метод ситуационного анализа включает в себя следующее: использование естественного языка и формальных правил; классификацию ситуаций и создание ее структуры, включающей возможные ситуации и соответствующие им управления (снижение скорости АТС, выезд с виброполосы, остановка). При наличии модели управления производится обучение этих моделей процессам принятия решения [2].

Ситуационное пространство, направленное на завершение структуры системного подхода с целью устранения ДТП, в котором все необходимые знания для принятия решения конкретизированы, представлено на рис. 1. Действие оператора всегда должно быть направлено на минимизацию риска ДТП.

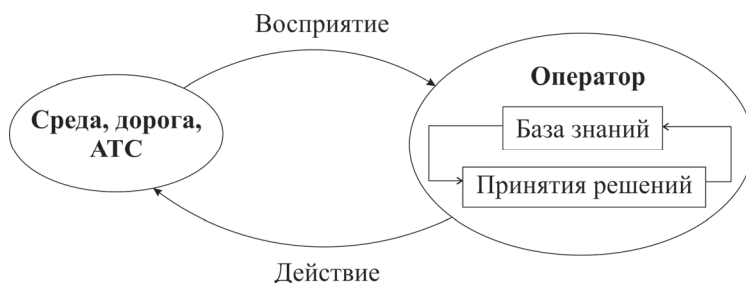


Рис. 1. Ситуационное пространство реализации движения АТС

Общепризнана актуальность эффективного контроля качества автомобильных дорог, являющегося основным показателем транспортно-эксплуатационных характеристик дорожных одежд [3].

Устройство виброполосы в качестве гарантированной процедуры снижения частоты ДТП путем создания некомфортных условий движения АТС и, следовательно, на основании созданной ситуации принятие оператором решений о снижении скорости движения или изменении направления движения требуют оценки технического состояния автомобильной дороги, т.е. той ее части, по которой проходит данный элемент конструкции трассы. Актуальность проблемы эффективного управления прочностью и надежностью дороги определяется важной ролью функционального назначения этой конструкции в снижении частоты и устранении ДТП.

К числу проблем, которые нуждаются в новых решениях при создании дорог и надежной эксплуатации уже существующих, относится и проблема неразрушающих методов контроля качества. Одним из наиболее перспективных способов неразрушающего контроля является динамический метод диагностики прочности дорожного полотна, основанный на глубинных связях структуры и материалов дорожной конструкции с ее механическими свойствами. Структура и материалы полностью определяют физико-механические свойства дорожной одежды, в то же время определяют особенности процессов генерирования и распространения упругих колебаний (скорость распространения, декремент затухания, спектральный состав, фазовые соотношения и т.д.). Поэтому между этими двумя группами параметров можно поставить однозначное соответствие, которое будет тем точнее, чем более детально могут быть зарегистрированы измерительной аппаратурой особенности динамических явлений [4, 5]. В процессе испытаний дорожной одежды для оценки ее прочности измеряют упругий прогиб от расчетной нагрузки при статическом и динамическом нагружении.

В результате испытаний статической нагрузкой вычисляют статический модуль упругости, который при оценке прочности сравнивают с общим расчетным модулем, определенным на основе требуемого статического модуля. Модуль упругости дорожной одежды, определенный в результате измерения динамических прогибов с помощью установок динамического нагружения, является динамическим модулем, и при оценке прочности дорожной одежды его сопоставляют с общим расчетным модулем, рассчитанным на основе требуемого динамического модуля упругости.

Связь прогибов дорожного полотна и модуля упругости устанавливается методами механики сплошных сред на основе моделей де-

формирования сложных, неоднородных структур. Нагрузка на дорожное полотно также моделируется с учетом времени ее действия, способа передачи на упруго-вязкую среду, особенностей эксплуатации дорожной конструкции на перегонах.

На втором этапе рассмотрим построение динамической модели конструкции дорожной одежды на участках виброполосы. Представим эту модель изолированной балкой, лежащей на упругом основании жесткостью k . Влияние окружающих элементов в этом случае будет тем меньше, чем меньше площадь пятна контакта или чаши прогиба, т.е. рассматриваем действие локальной нагрузки. Расчету балок на упругом основании посвящены, в частности, работы [6, 7].

Пренебрегаем инерцией масс балки при их поворотах в процессе колебаний и сдвигами (поперечные перемещения), возникающими от воздействий касательных напряжений. Таким образом, принимается известная модель виброполосы на основе балки Бернулли-Эйлера [8]. В связи с малыми размерами глубины элементов виброполосы по сравнению с толщиной слоя асфальтобетона считаем балку однородной по высоте.

Реакция дорожной конструкции рассматривается как волновое движение частиц среды относительно своего положения равновесия. При этом предполагаем, что среда обладает следующими свойствами: сплошность, смещения и деформации малы, физические законы соответствуют линейному закону связи напряжений и деформаций, скорость распространения упругих волн и положения фронта волны соответствуют модели Гейгенса сферического излучателя [9]. Движение частиц среды рассматриваем поперек направления распространения волны с колебательной скоростью частиц. Продольные и поперечные ускорения АТС составляют около 30–50 % вертикальных ускорений. Частотный диапазон всех спектров составляет 0–500 Гц. Основная мощность сосредоточена в области частот 0–20 Гц, доля высоких частот в зависимости от скорости движения АТС составляет от 15 до 30 % полной дисперсии ускорений.

В рамках принятых допущений модель колебаний дорожного полотна при действии подвижной сосредоточенной нагрузки представим в форме [1]

$$\frac{\partial^4 x}{\partial z^4} + 4v^2 \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 4\mu^4 x = \frac{1}{EJ} f(z, t), \quad (1)$$

где x – прогиб балки; EJ – жесткость поперечного сечения балки при изгибе; $4v^2 = m_0/EJ$; $4\mu^4 = k/EJ$; $f(z, t)$ – интенсивность нагрузки; m_0 – масса единицы длины балки.

Если нагрузка, сохраняя свою величину, движется вдоль оси балки со скоростью v , то:

$$f(z, t) = f(z - vt).$$

При $z - vt = \xi$ решение уравнения (1) запишем в виде

$$x = e^{\alpha\xi} (c_1 \cos\beta\xi + c_2 \sin\beta\xi) + e^{-\alpha\xi} (c_3 \cos\beta\xi + c_4 \sin\beta\xi) + \Phi(\xi),$$

где $\alpha = \sqrt{\mu^2 - v^2v^2}$, $\beta = \sqrt{\mu^2 + v^2v^2}$, $\Phi(\xi)$ – частное решение неоднородного уравнения. При условии, что по виброполосе движется сосредоточенная сила P , запишем:

– при $\xi > 0$

$$x = -\frac{P}{8EJ\mu^2\alpha} e^{-\alpha\xi} \left(\cos\beta\xi + \frac{\alpha}{\beta} \sin\beta\xi \right), \quad (2)$$

– при $\xi < 0$

$$x = -\frac{P}{8EJ\mu^2\alpha} e^{-\alpha\xi} \left(\cos\beta\xi - \frac{\alpha}{\beta} \sin\beta\xi \right),$$

где P – величина силы.

Прогиб под силой составляет:

$$|x|_{\xi=0} = \frac{P}{8EJ\mu^2\alpha}. \quad (3)$$

Затухание прогибов по мере удаления от точки приложения нагрузки следует экспоненциальному закону.

На третьем этапе рассмотрим изменения и влияния нагрузки P и скорости движения АТС на параметры реакции конструкции виброполосы.

Увеличение вертикальных нагрузок связано с неровностями. Неровности поверхности виброполосы могут быть приняты в виде, представленном на рис. 2.

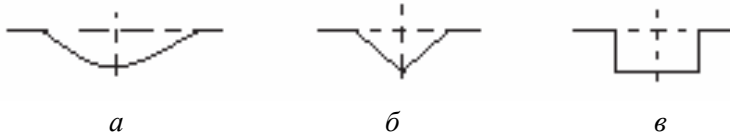


Рис. 2. Формы неровностей участка виброполосы

Неровность дороги в зоне виброполосы представляем в виде, приведенном на рис. 3. Лобовыми и боковыми компонентами нагрузки пренебрегаем.

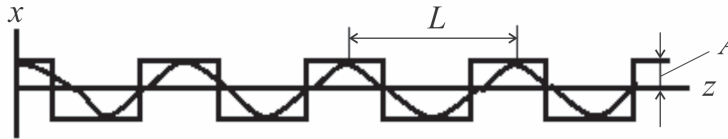


Рис. 3. Модель неровности виброполосы

Изменение высоты неровностей задаем выражением (рис. 2, а):

$$x = A \cdot \cos\left(2\pi \frac{z}{L}\right) = A \cdot \cos\left(2\pi \frac{v \cdot t}{L}\right), \quad (4)$$

где A – амплитуда неровностей, $A = h/2$; L – расстояние между соседними выступами; h – глубина неровностей.

Принимая скорость АТС постоянной по направлению движения $v = \text{const}$, запишем вертикальную составляющую скорости при движении по неровностям:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dz} \cdot \dot{z} = v \cdot \frac{dx}{dz}.$$

$$\text{Вертикальное ускорение } \ddot{x} = v^2 \cdot \frac{d^2x}{dz^2}.$$

Сила взаимодействия колеса и дороги $P_b = mv^2 \frac{d^2x}{dz^2}$, где m – масса поддресоренной части АТС.

Нагрузка на виброполосу возрастает пропорционально квадрату скорости движения АТС без учета демпфирующих свойств шин и вертикальному ускорению, вызванному неровностями конструкции дороги. Наибольшие вертикальные ускорения будут наблюдаться при движении по третьей виброполосе (рис. 2, в). Проведенные авторами исследования показывают, что с учетом толерантности оператора и требований ГОСТ 12.1.012–78 (СТ С-В 2602–80) ускорения могут достигать недопустимых значений $\ddot{x} > [\ddot{x}]$.

Амплитуда смещения колеса АТС относительно горизонтальной плоскости $x_0 = A \frac{1}{1 - \Omega^2}$, где $\Omega = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{v}{Lf_0}$; ω_0 – собственная частота системы «дорожная одежда – грунтовое основание».

Для определения собственной частоты колебаний системы «дорожная одежда – грунтовое основание» ω_0 рассматривается одномассовая модель затухающих вертикальных колебаний конструкции дороги, которая с принятыми допущениями действия подвижной нагрузки на виброполосе позволяет получить численные значения ω_0 и, кроме того, оценить влияние скорости подвижной нагрузки на динамические перемещения точки контакта нагрузки и чаши прогиба [3, 9, 10].

В общем виде запишем полигармонические динамические вертикальные перемещения в форме

$$x(z_i, t) = \sum_{i=1}^N A(z_i) e^{-n_i t} \cdot \cos(\omega_i t + \gamma_H).$$

Принимая фазовые сдвиги равными нулю, представим вертикальные затухающие колебания точки контакта нагрузки и поверхности движения, учитывая первую форму колебаний, в виде

$$x_0 = \frac{P}{8EJ\mu^2\alpha} \cdot e^{-nt} \cdot \cos(\omega_0 t), \quad (5)$$

где n – коэффициент затухания по первой форме колебаний.

После удара колеса АТС по впадине виброполосы дорожная одежда совместно с подстилающим грунтом является с известными приближениями волноводом соответствующей присоединенной массы, значение которой определяет собственную частоту вертикальных колебаний частиц и вертикальные перемещения по соотношению (3).

Из соотношения (3) после преобразований запишем:

$$x_{\xi=0} = \frac{P}{2} \frac{1}{\sqrt[4]{4k^3 EI} \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{V_{кр}^2}}},$$

где $V_{кр}$ – максимально возможная скорость распространения волны, соответствующая скорости звука в дорожной конструкции, $V_{кр} = \sqrt{\frac{4kEI}{m_0^2}}$. Значение критической скорости $V_{кр} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, что соответствует скорости распространения бегущей волны.

Принимая во внимание исследования, приведенные в [6], дифференцированное задание массы единицы длины модели виброполосы определяется с учетом времени воздействия движущейся нагрузки и ее величины на исследуемую конструкцию. Фактическая продолжительность нагружения зависит от скорости движения АТС, распределения вертикальных напряжений по глубине зоны возмещения [11]. Следуя результатам расчетов, представленных в работе [6], запишем значения присоединенной массы единицы длины системы «дорожное покрытие – грунтовое основание» при постоянной скорости АТС в форме

$$m_0 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot v \cdot \sum_{i=1}^k h_i \cdot t_i \cdot \rho_i,$$

где ρ_i – плотность материалов слоев конструкции в зоне виброполосы; t_i – время действия нагрузки в слое конструкции; h_i – толщина слоя; k – количество слоев.

При численных экспериментах было принято: скорость АТС принимается 30–70 км/ч, вертикальные напряжения в пределах 0,1–0,001 МПа.

В качестве примера на четвертом этапе иллюстрируем результаты вычислений параметров волны с использованием ресурсов Microsoft Office Excel 2007 при принятых исходных данных: расчетный модуль упругости в пределах от 108 до 300 МПа.

На рис. 4 приведены результаты расчетов совмещенных волнового и колебательного процессов. Наблюдается затухание волны и низкочастотных колебаний частиц среды.

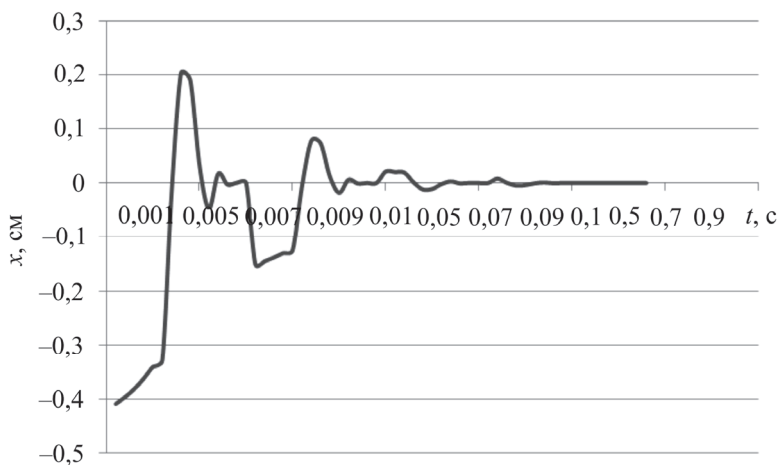


Рис. 4. Изменения прогибов от времени в расчетных точках волновых смещений

В заключение отметим, что метод ситуационного анализа представляет логическую цепочку процессов обеспечения безопасности дорожного движения и снижения рисков ДТП с применением виброполосы, рекомендует непротиворечивые технические и инженерные решения создания реальных функционирующих конструкций с требуемыми техническими характеристиками (прочность, долговечность, ремонтпригодность), способных оказывать направленное воздействие на оператора без повреждаемости АТС. При этом параметры виброполосы, в рамках приемлемых допущений, определяются расчетным путем, что создает возможность оптимизировать процессы взаимодействия системы «виброполоса – транспортное средство – оператор». Непрерывный мониторинг процесса функционирования виброполосы и фиксация его тренда позволяет получить данные для целесообразного использования ресурсов ее изготовления, надежности и планирования безопасности эксплуатации автомобильных дорог. Реализация системного подхода обеспечивает полноту рассмотрения исследуемой ситуации, т.е. комплексный учет и оценку всех научно-технических и социально-экономических факторов, связанных с достижением цели развития методов и средств снижения частоты и устранения ДТП автотранспортной отрасли.

Список литературы

1. Кычкин В.И., Белоногов Л.Б., Пугин К.Г. Оперативная оценка прочности дорожных одежд // Сб. науч. тр. Т. 2. Совершенствование транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог / Междунар. акад. транспорта. – Иркутск, 1999. – С. 38–46.
2. Юшков Б.С., Кычкин В.И., Юшков В.С. Воздействие виброполосы на человека – оператора при движении автомобиля // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2013. – № 1. – С. 21–23.
3. Кычкин В.И., Юшков В.С. Математическая модель создания некомфортных условий при движении автомобиля по виброполосе // Инновации в науке. – Новосибирск, 2012. – Ч. I. – С. 73–80.
4. Колоушек В. Динамика строительных конструкций. – М. Стройиздат, 1965. – 631 с.
5. Смирнов А.В., Баженова А.Ю. Волновые поля. Как воздействуют подвижные вертикальные нагрузки на поверхность автомагистрали (продолжение, начало в № 11. 2011) // Автомобильные дороги. – 2011. – № 12. – С. 62–63.
6. Лугов С.В. Расчет продолжительности единичного приложения транспортной нагрузки с учетом прочностных свойств дорожной конструкции // Информавтодор: науч.-техн. информ. сб. – 2004. – № 2. – С. 20–29.
7. Смирнов А.В., Баженова А.Ю. Волновые поля. Как воздействуют подвижные вертикальные нагрузки на поверхность автомагистрали // Автомобильные дороги. – 2011. – № 11. – С. 68–69.
8. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. – М.: Наука, 1967. – 444 с.
9. Кычкин В.И., Юшков В.С. Резонансные колебания при движении автотранспортного средства по виброполосе // Молодой ученый. – Чита, 2013. – № 3. – С. 65–68.
10. Iushkov B.S., Iushkov W.S., Kychkin W.I. Vibrating strip and dynamic identification deformation condition of the road design // Materials of the II International research and practice conference. – Munich, Germany, 2012. – Vol. I. – P. 170–175.
11. Ремонт и содержание автомобильных дорог: справ. инженера-дорожника / А.П. Васильев, В.И. Баловнев, М.В. Корсунский [и др.]; под ред. А.П. Васильева. – М.: Транспорт, 1989. – 287 с.

References

1. Kychkin V.I., Belonogov L.B., Pugin K.G. Operativnaia otsenka prochnosti dorozhnykh odezhd [Operational estimation of durability of road pavement]. *Sbornik nauchnykh trudov. Tom 2. Sovershenstvovanie transportno-ekspluatatsionnogo sostoianiia avtomobil'nykh dorog*. Irkutsk: Mezhdunarodnaia akademiia transporta, 1999, pp. 38-46.
2. Iushkov B.S., Kychkin V.I., Iushkov V.S. Vozdeistvie vibropolosy na cheloveka – operatora pri dvizhenii avtomobilia [Effect of vibropulse on human operator when the car is in]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*, 2013, no. 1, pp. 21-23.
3. Kychkin V.I., Iushkov V.S. Matematicheskaiia model' sozdaniia nekomfortnykh uslovii pri dvizhenii avtomobilia po vibropolose [Mathematical model create uncomfortable conditions when driving on vibropulse]. *Innovatsii v nauke*. Novosibirsk, 2012, part I, pp. 73-80.
4. Koloushek V. Dinamika stroitel'nykh konstruksii [Dynamics of building structures]. Moscow: Stroizdat, 1965, 631 p.
5. Smirnov A.V., Bazhenova A.Iu. Volnovye polia. Kak vozdeistvuiut podvizhnye vertikal'nye nagruzki na poverkhnost' avtomagistrali (prodolzhenie, nachalo v №. 11. 2011) [Wave field. What is the impact moving vertical load on the surface of the highway (continued, for the beginning in № 11. 2011)]. *Avtomobil'nye dorogi*, 2011, no. 12, pp. 62-63.
6. Lugov S.V. Raschet prodolzhitel'nosti edinichnogo prilozheniia transportnoi nagruzki s uchetom prochnostnykh svoistv dorozhnoi konstruksii [Calculation of the duration of a single application transport loads with account of the strength properties of road construction]. *Nauchno-tekhnicheskii informatsionnyi sbornik "Informavtodor"*, 2004, no. 2, pp. 20-29.
7. Smirnov A.V., Bazhenova A.Iu. Volnovye polia. Kak vozdeistvuiut podvizhnye vertikal'nye nagruzki na poverkhnost' avtomagistrali [Wave field. What is the impact moving vertical load on the surface of the highway]. *Avtomobil'nye dorogi*, 2011, no. 11, pp. 68-69.
8. Timoshenko S.P. Kolebaniia v inzhenernom dele [Fluctuations in engineering]. Moscow: Nauka, 1967, 444 p.
9. Kychkin V.I., Iushkov V.S. Rezonansnye kolebaniia pri dvizhenii avtotransportnogo sredstva po vibropolose [Resonance oscillations when driving a vehicle on vibropulse]. *Molodoi uchenyi*, Chita, 2013, no. 3, pp. 65-68.

10. Iushkov B.S., Iushkov V.S., Kychkin V.I. Vibrating strip and dynamic identification deformation condition of the road design. *Materials of the II International research and practice conference*. Munich, Germany, 2012, vol. I, pp. 170-175.

11. Vasil'ev A.P., Balovnev V.I., Korsunskii M.V. [et al.]. Remont i sodержanie avtomobil'nykh dorog [Repair and maintenance of roads]. Ed. A.P. Vasiliev. Moscow: Transport, 1989, 287 p.

Получено 15.10.2014

Об авторах

Юшков Владимир Сергеевич (Пермь, Россия) – аспирант, старший преподаватель кафедры «Автомобили и технологические машины» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vova_84_07@mail.ru).

Юшков Борис Семенович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автомобильные дороги и мосты» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29).

Кычкин Владимир Иванович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги и мосты» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29).

About the authors

Iushkov Vladimir Sergeevich (Perm, Russian Federation) – Postgraduate student, Senior Lecturer, Department of Automobiles and technological machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: vova_84_07@mail.ru).

Iushkov Boris Semenovich (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Professor, Head of Department of Highways and bridges, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

Kychkin Vladimir Ivanovich (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Highways and bridges, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).