

УДК 624.042:625.745.12

**Гриднев С.Ю.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: gridnev\_s\_y@rambler.ru

**Воронежский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 394006, Россия, г. Воронеж, ул. XX-летия Октября, д. 84

**Будковой А.Н.** – ведущий инженер

E-mail: budalex2005@mail.ru

**ОАО «Воронежпроект»**

Адрес организации: 394036, Россия, г. Воронеж, ул. Пушкинская, д. 1

### **Оценка динамического воздействия автомобиля на путь при торможении и разгоне с учетом кинематического возмущения**

#### **Аннотация**

Рассматривается задача колебаний модели одиночного автомобиля при торможении и разгоне с учетом кинематического возмущения от неровностей пути. Оценивается влияние неровностей проезжей части, которая находится в удовлетворительном состоянии, на динамическое воздействие автомобиля на путь. Проведены численные исследования колебаний автомобиля при различных ускорениях торможения и разгона, а также в зависимости от положения начала торможения на заданном участке профиля. Выполнен анализ результатов численных исследований.

**Ключевые слова:** динамическая модель автомобиля, торможение и разгон, профиль пути, кинематическое возмущение, динамическое воздействие на путь.

**Введение.** Анализ многочисленных экспериментальных исследований на автодорожных мостах различного класса и результатов вычислительных экспериментов ряда авторов по моделированию проезда подвижной нагрузки по транспортным сооружениям убедительно показывает влияние неровностей ездового полотна на существенное увеличение динамических коэффициентов. Эти результаты получены для случаев движения автомобилей с постоянной скоростью. Немногочисленные опубликованные научные работы, посвященные вопросам динамики автомобиля при переходных режимах движения с учетом неровностей профиля [1], выполнены для оценки тормозного пути на проезжей части и параметров эксплуатационных свойств транспортного средства. В данном исследовании ограничимся изучением влияния кинематического возмущения только от микропрофиля неровной проезжей части дороги или автодорожного моста, т.е. имеющей покрытие в удовлетворительном состоянии. Ставилась задача оценить влияние кинематического возмущения от неровностей проезжей части на динамическое воздействие автомобиля на путь при торможении и разгоне в сравнении с колебаниями при движении его по гладкому пути.

В настоящее время, несмотря на постоянно улучшающееся состояние покрытия автомобильных дорог, процент дорог, эксплуатирующихся с покрытием в неудовлетворительном состоянии, остается довольно высоким. Существующая дорожная сеть не всегда справляется с постоянно возрастающим транспортным потоком, обусловленным интеграцией России в европейское пространство и, во многом, подготовкой страны к проведению крупнейших мировых соревнований. Поэтому задача учета неровностей проезжей части при определении динамического воздействия транспортных средств на путь остается по-прежнему актуальной как наиболее приближенная к реальным условиям эксплуатации. Современные методики расчета и универсальные программные комплексы во многом способствуют этому.

С начала 90-х годов количество публикаций, посвященных воздействию подвижной нагрузки на транспортные сооружения, по понятным причинам, резко сократилось. В настоящее время эта теория требует дополнения и усовершенствования в вопросах, касающихся переходных режимов движения транспортных средств и оценки влияния их динамического воздействия на пролетные строения современных автодорожных мостов.

**Постановка задачи.** Под переходными будем понимать режимы, связанные с резким изменением скорости движения. Определяющим параметром неравномерного движения является производная скорости, то есть ускорение. В общем случае скорость автомобиля может меняться линейно, синусоидально или по любому другому более сложному закону. Наиболее распространенным является движение с постоянным во времени ускорением, то есть равноускоренное (разгон) или равнозамедленное (торможение) движение.

Для выполнения исследования используем плоскую динамическую модель трехосного автомобиля. Принятые допущения и общее описание модели представлены в [2] и [3]. В случае неравномерного движения и появления горизонтального ускорения в уравнение угловых колебаний кузова системы дифференциальных уравнений добавляется слагаемое  $M \cdot \dot{V}(t) \cdot c$ , учитывающее изменение скорости движения, и образуется дополнительный момент, который перераспределяется на оси автомобиля (рис. 1). В этом случае система дифференциальных уравнений движения принимает вид (1).

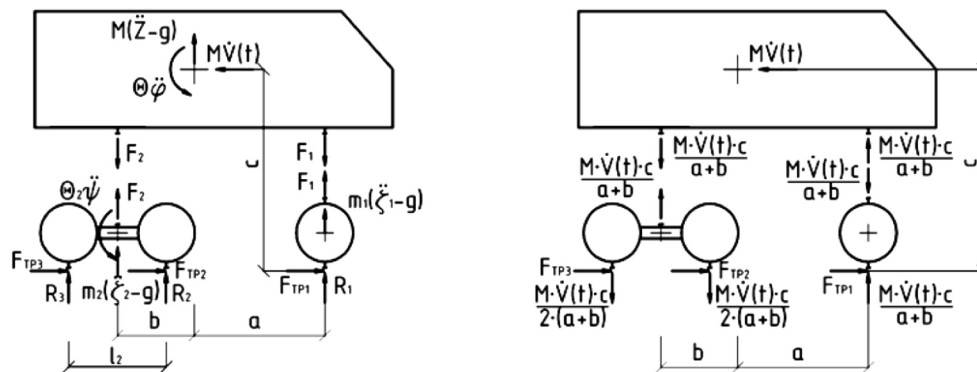


Рис. 1. Схема перераспределения дополнительного момента на оси трёхосного автомобиля при описании переходных режимов движения

$$\begin{cases} M \cdot \ddot{Z}(t) + F_1(v_1, \dot{v}_1) + F_2(v_2, \dot{v}_2) - M \cdot g = 0; \\ \theta \cdot \ddot{\varphi}(t) + F_1(v_1, \dot{v}_1) \cdot a - F_2(v_2, \dot{v}_2) \cdot b + M \cdot \dot{V}(t) \cdot c = 0; \\ m_1 \cdot \ddot{\zeta}_1(t) - F_1(v_1, \dot{v}_1) + R_1(u_1, \dot{u}_1) - m_1 \cdot g = 0; \\ m_2 \cdot \ddot{\zeta}_2(t) - F_2(v_2, \dot{v}_2) + R_2(u_2, \dot{u}_2) + R_3(u_3, \dot{u}_3) - m_2 \cdot g = 0; \\ \theta_2 \cdot \ddot{\psi}(t) + R_2(u_2, \dot{u}_2) \cdot l_2 / 2 - R_3(u_3, \dot{u}_3) \cdot l_2 / 2 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

Из уравнения равновесия  $\sum X = 0 \dots$  имеем:

$$M \cdot \dot{V}(t) = \sum_{i=1}^3 F_{mpi} \quad (2)$$

**Учет неровностей пути.** При равномерном движении колебания транспортных средств возбуждаются неровностями проезжей части, а при движении по проезжей части моста еще и перемещениями пролетного строения. Профиль проезжей части под колесами задается дискретно ординатами через 1 м, которые получены нивелированием существующей проезжей части или генерацией на ЭВМ по заданным статистическим характеристикам. Промежуточные ординаты профиля в любой точке, необходимые при численном интегрировании дифференциальных уравнений движения, вычисляются с использованием алгоритма аппроксимации неровного пути кубическими сплайнами. Профиль колеи под колесами в промежутках между узловыми ординатами вычисляются с помощью кубических многочленов, склеенных по фиксированной схеме.

В дальнейших численных исследованиях используется характерный профиль асфальтобетонного покрытия, находящегося в удовлетворительном состоянии.

Неровности проезжей части  $h_i$  под  $i$ -ой осью, которые, в общем случае, вместе с перемещениями пролетного строения  $Y_i$ , являются функциями кинематического возмущения для динамической модели автомобиля, учитываются при определении деформаций шин  $U_i$  по известным обобщенным координатам (3). Возмущение от неровности проезжей части, действующие на вторую и третью оси, учитываются с запаздыванием по сравнению с первой осью:

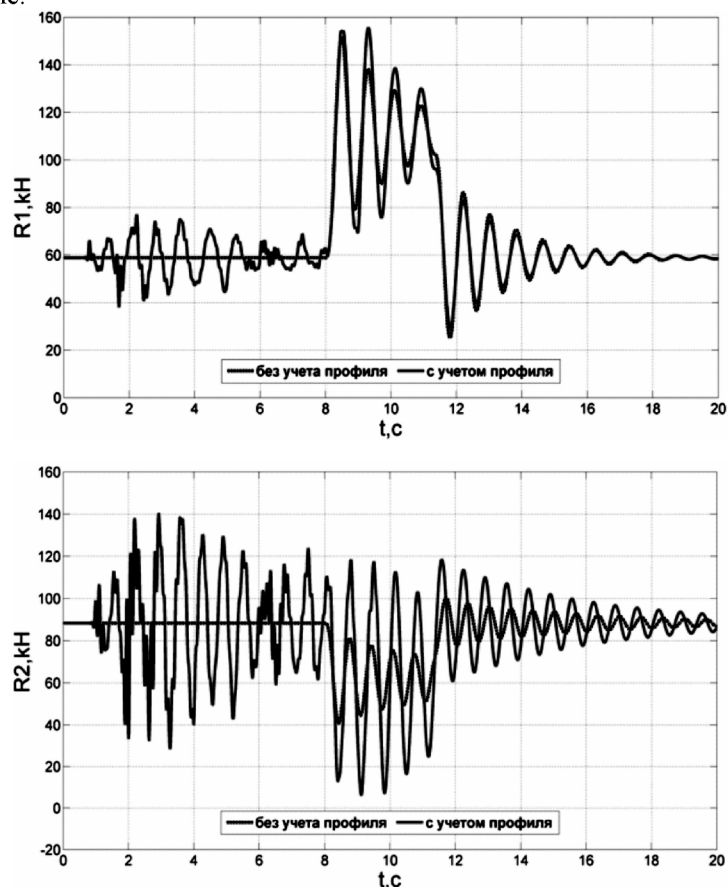
$$U_i = U_i(Z(t), \varphi(t), \xi_i(t), \psi(t), h_i, Y_i). \quad (3)$$

При равномерном движении определяющими параметрами являются характеристики профиля и скорость движения по нему автомобиля. На реальных профилях с увеличением скорости движения, как правило, растут и амплитуды колебаний автомобилей.

**Численные исследования.** Моделирование колебаний трехосного автомобиля при торможении и разгоне с учетом кинематического возмущения были реализованы в пакете Simulink системы MatLab в программном комплексе. В соответствии с табл. 3 [4], нормируется величина установившегося ускорения, при которой тормозная система считается пригодной к эксплуатации, и принимается равной не менее  $6 \text{ м/с}^2$ . С другой стороны, современные двигатели грузовых автомобилей мощностью  $400 \dots 500 \text{ л.с.}$  позволяют развивать при разгоне ускорение  $3 \dots 4 \text{ м/с}^2$ . Эти фактические данные и ограничивают диапазон исследуемых ускорений.

При переходных режимах и движении по профилю проезжей части, находящемуся в удовлетворительном состоянии, параметром, фактически определяющим границы колеблющихся величин, становится ускорение. Однако в большинстве случаев влияние кинематического возмущения является весьма существенным (рис. 2). Нетрудно представить расчетные ситуации, когда учет профиля при неравномерном движении вызовет сильное увеличение динамических давлений осей (например, резкое торможение перед значительной одиночной неровностью или на участке дорожного покрытия находящегося в неудовлетворительном состоянии).

Торможение:



Разгон:

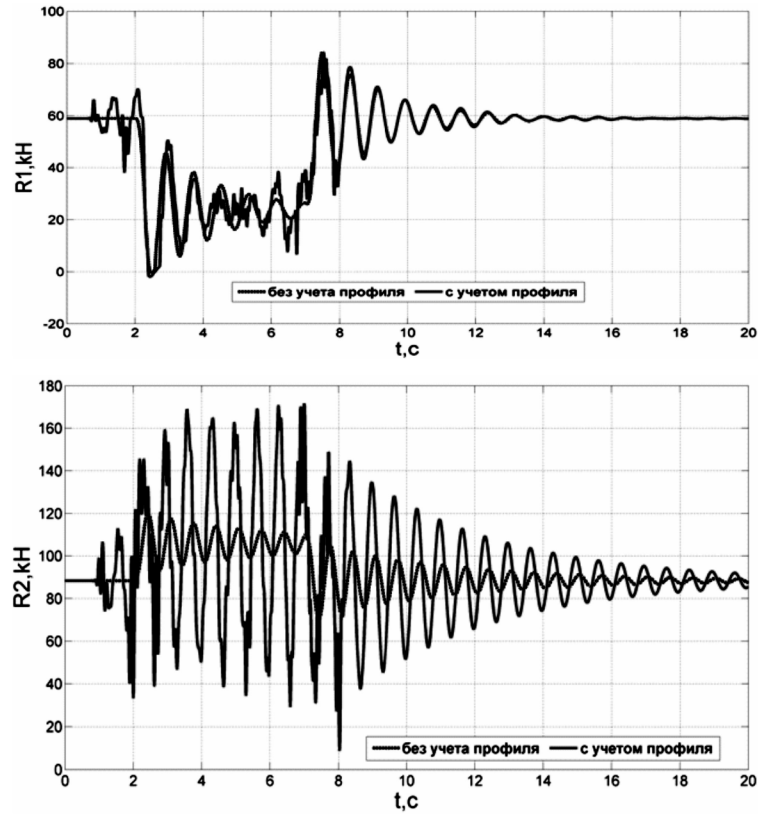


Рис. 2. Графики изменения динамических давлений осей  $R_1$  и  $R_2$  трехосного автомобиля при равнопеременном движении с ускорением  $4 \text{ м/с}^2$  без учета и с учетом профиля проезжей части

Оценим влияние места торможения при заданном кинематическом возмущении на величину и характер изменения динамических давлений осей. Исходные данные и параметры режима движения ранее приняты. Момент начала торможения фиксируется в начале, середине и конце заданного профиля. Исследование торможения выполняется до полной остановки (рис. 3).

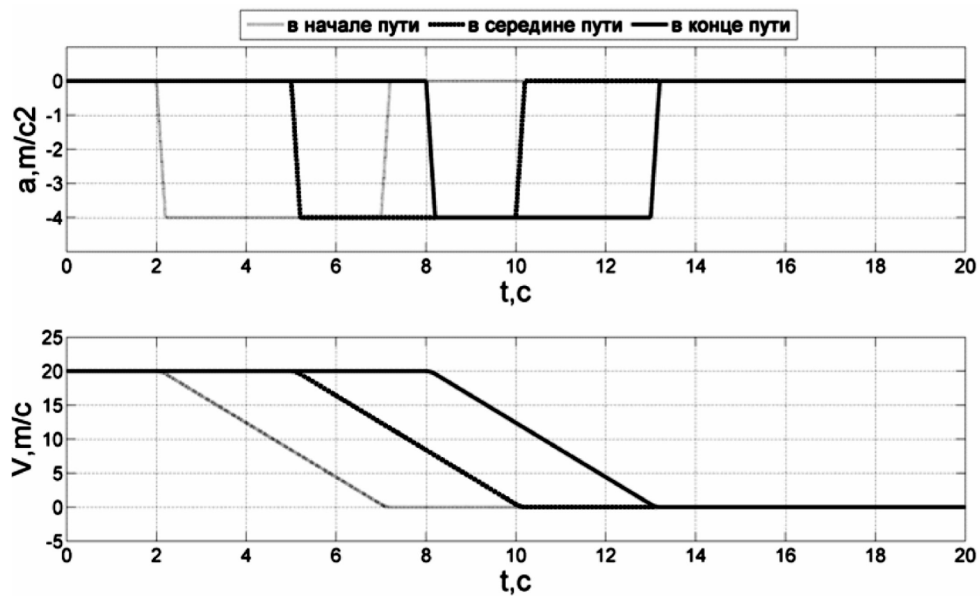


Рис. 3. Характеристики режима торможения для ускорения  $4 \text{ м/с}^2$

Для рассматриваемого случая оказалось, что максимальные значения динамических давлений достигаются при торможении в конце заданного участка профиля во всем исследуемом диапазоне ускорений (рис. 4). Сама же величина ускорения также определяет величину амплитуд колебаний силовых факторов (рис. 5).

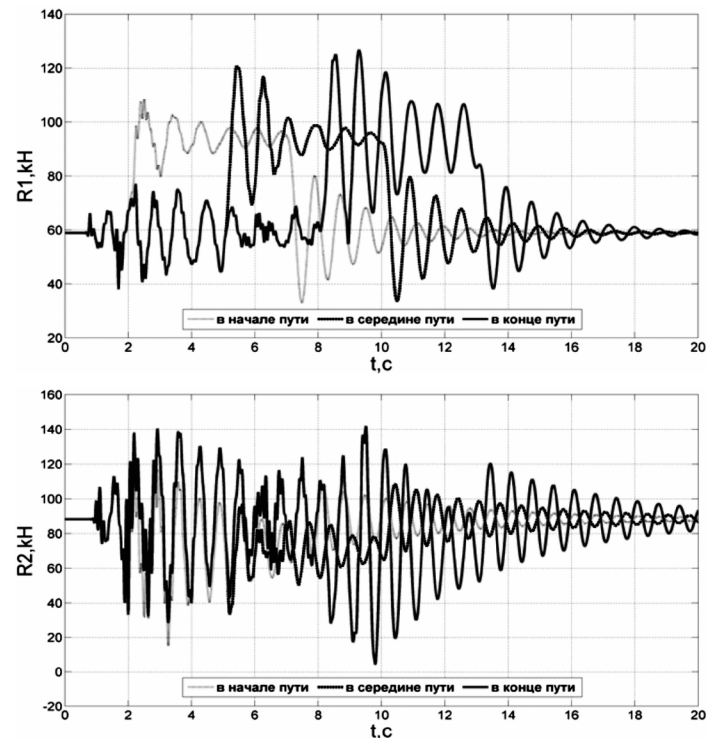


Рис. 4. Графики изменения динамических давлений осей трехосного автомобиля при торможении с ускорением  $4 \text{ м/с}^2$  в различных частях заданного профиля

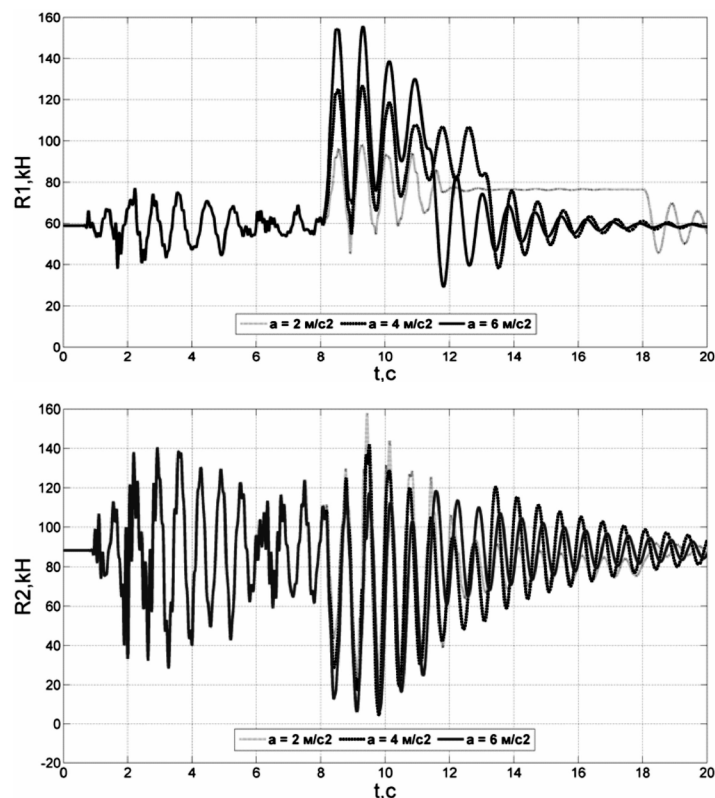


Рис. 5. Графики изменения динамических давлений осей трехосного автомобиля при торможении на заданном профиле в зависимости от ускорения

**Заключение.** Обобщая основные результаты численных исследований, сделаем некоторые выводы, полученные для выполненных вычислительных экспериментов по колебаниям автомобиля при движении по неровному пути с ускорениями.

Из графиков рис. 4 видно, что место торможения существенно влияет на величины динамических давлений осей. В данном случае их увеличение происходит по мере смещения участка торможения к концу заданного профиля во всем исследуемом диапазоне ускорений. Наиболее характерна эта зависимость для передней оси. Для полноты информации отметим, что максимальные значения динамических давлений осей достигаются при разгоне в начале заданного профиля.

Таблица

**Максимальные динамические коэффициенты давлений осей**

Торможение					
Величина ускорения, $m/c^2$	Динамический коэффициент давлений осей				
	Без учета профиля		С учетом профиля		
	Передняя ось R1	Задняя ось R2	Передняя ось R1	Задняя ось R2	Задняя ось R3
2	1,52	1,07	1,67	1,79	1,73
4	2,05	1,21	2,15	1,61	1,7
6	1,57	1,14	2,64	1,59	1,57
Разгон					
Величина ускорения, $m/c^2$	Динамический коэффициент давлений осей				
	Без учета профиля		С учетом профиля		
	Передняя ось R1	Задняя ось R2	Передняя ось R1	Задняя ось R2	Задняя ось R3
2	1,23	1,18	1,33	1,82	1,81
4	1,43	1,36	1,57	1,93	1,89

Неравномерное движение с учетом неровностей проезжей части является сложным нестационарным колебательным процессом и требует отдельного глубокого изучения в вероятностной постановке. Очевидно, что определяющими параметрами здесь будет не только величина самого ускорения, но и начальная/конечная скорости движения, в большей степени распределение масс и инерционные свойства автомобиля, характеристики профиля на участке неравномерного движения и за его пределами и т.д. Комплекс проведенных расчетов на используемом характерном профиле проезжей части в удовлетворительном состоянии позволил выявить некоторые особенности. Так, для рассмотренного автомобиля учет профиля при неравномерном движении привел к небольшому увеличению динамических давлений передней оси. Динамические коэффициенты составили: 2,64 при торможении и 1,57 при разгоне. Существенное влияние профиля, главным образом, сказалось на колебаниях задней оси и привело к росту динамических коэффициентов: 1,79 при торможении и 1,93 при разгоне.

Решение задачи моделирования движения транспортных средств при переходных режимах движения с учетом профиля проезжей части в вероятностной постановке является пока не исследованной в достаточной мере проблемой. При появлении ускорения возникающие колебания уже нельзя считать стационарным случайным процессом из-за различия квазистатических значений давлений осей на участках ускоренного и равномерного движения. Таким образом, речь идет уже о нестационарном воздействии подвижной нагрузки, что является очевидным дальнейшим направлением развития существующей теории динамического расчета мостов.

### Список литературы

1. Мазур В.В. Математическая модель динамики автомобиля при торможении на неровной дороге // Системы. Методы. Технологии: науч. журн. / Брат. гос. ун-т, 2009, № 4. – С. 42-45.
2. Гриднев С.Ю., Будковой А.Н. Методика расчета большегрузных транспортных средств при изменении режима движения // Современные методы статического и динамического расчета зданий и сооружений. Воронежский ГАСУ, Вып. 4, 2007. – С. 79-86.

3. Гриднев С.Ю., Будковой А.Н. Исследование динамического воздействия автотранспортных средств на пролетные строения мостов при переходных режимах движения // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. Сборник трудов международной конференции, Ч. 1. – Воронеж: ВГУ. – С. 128-135.
4. ГОСТ Р 51709-2001 «Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки». – М., 2001. – 40 с.

**Gridnev S.Yu.** – candidate of technical science, associate professor  
**Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering**  
The organization address: 394006, Russia, Voronezh, XX-letia Ortiabria st., 84  
**Budkovoy A.N.** – leading engineer  
**Open Joint-Stock Company «Voronezhproekt»**  
The organization address: 394036, Russia, Voronezh, Pushkinskaya st., 1

### **Assessment of the dynamic impact of a car on the road during braking and acceleration with taking into account the kinematic perturbations**

#### **Resume**

In this article influence of kinematic indignation from roughness of the carriageway on dynamic impact of the car on a way was estimated during the braking and dispersal. Such research is actual as such modes of movement are most approached to real service conditions. (Dispersal) or equal slow (braking) movement modes were considered uniformly accelerated. For performance of research the flat dynamic model of the triaxial car was used. In the equation of angular fluctuations of a body of system of the differential equations composed, considering change of speed of movement was added, and the additional moment which is redistributed on a car axis is formed. The carriageway profile under wheels was set discretely by results of leveling of the existing carriageway or generation on the PC according to the set statistical characteristics. Numerical researches of fluctuations of the car at various accelerations of braking and dispersal, and also depending on the provision of the beginning of braking on the set site of a profile are carried out. Some features are revealed. In the case under consideration the accounting of a profile at non-uniform movement led to small increase in dynamic pressure of a forward axis. Essential influence of a profile, the main thing, and image affected fluctuations of a back axis and led to growth of dynamic factors of pressure of an axis on a way. The braking place essentially influences sizes of dynamic pressure of axes.

**Keywords:** dynamic model of the car, braking and acceleration, profile path, kinematic indignation, dynamic impact on the way.

#### **References**

1. Mazur V.V. Mathematical model of the dynamics of the vehicle during braking on a rough road // System. Methods. Technology: scientific journal. / Brat. State University, 2009, № 4. – P. 42-45.
2. Gridnev S.Yu., Budkovoy A.N. Methods of calculation of heavy-duty vehicles in changing the movement // Modern methods of static and dynamic calculation of buildings and structures. – Voronezh SUA, Vol. 4, 2007. – P. 79-86.
3. Gridnev S.Yu., Budkovoy A.N. Analysis of the dynamic impact of motor vehicles on the span structures of bridges in transient modes of traffic // Urgent problems of applied mathematics, Informatics and mechanics. Proc. of the international conference, H. 1. – Voronezh: SABU. – P. 128-135.
4. GOST R 51709-2001 «Vehicles. The security requirements for the technical condition and methods of test». – М., 2001. – 40 p.