

УДК (UDC) 62-253

РАСЧЁТНАЯ ОЦЕНКА ВИБРОНАГРУЖЕННОСТИ АВТОМОБИЛЯ  
С КОЛЁСАМИ ПОВЫШЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПОТЕРЕ  
ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА В ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ШИНЕCALCULATED EVALUATION OF VIBRATION LOAD OF AUTOMOBILE  
WITH HIGH-SAFE WHEELS WHEN LOSS OF EXCESSIVE  
AIR PRESSURE IN THE PNEUMATIC TIREМазур В.В.  
Mazur V.V.Братский государственный университет (Братск, Россия)  
Bratsk State University (Bratsk, Russian Federation)

**Аннотация.** Колесо с пневматической шиной традиционной конструкции имеет существенный недостаток, который заключается в прекращении движения автотранспортного средства при потере избыточного давления воздуха. Потеря избыточного давления воздуха в пневматической шине при движении автомобиля с высокой скоростью может привести к дорожно-транспортному происшествию с тяжёлыми последствиями. Одним из технических решений, направленных на сохранение работоспособности колеса и повышение безопасности автомобиля при потере избыточного давления воздуха в пневматической шине, является применение внутренних дополнительных опор. Однако потеря избыточного давления воздуха даже в одной пневматической шине безопасного колеса с внутренней дополнительной опорой приводит к заметному ухудшению большинства эксплуатационных свойств, особенно при движении по дорогам с неровными поверхностями. Возрастающая интенсивность колебаний приводит к повышению уровня вибронгруженности, снижению показателей тягово-скоростных свойств, топливной экономичности, устойчивости и управляемости колёсной машины. Для обоснования параметров внутренних дополнительных опор и оценки их влияния на колебания и плавность хода автотранспортного средства на этапе проектирования была разработана новая математическая модель колебательной системы, эквивалентной подвеске автомобиля с колёсами повышенной безопасности. Модель предназначена для инженерных расчётов и отличается тем, что внутренние дополнительные опоры представлены как упруго-демпфирующие элементы системы поддрессоривания автомобиля.

**Ключевые слова:** безопасные колёса, система поддрессоривания, плавность хода, математическая модель, вибрация, вертикальные ускорения, амплитудно-частотная характеристика

**Дата принятия к публикации:** 10.07.2019  
**Дата публикации:** 25.09.2019

**Abstract.** The wheel with a pneumatic tire of traditional design has a significant drawback, which is to stop the movement of the vehicle with the loss of excess air pressure. The loss of excess air pressure in the pneumatic tire when driving a car at high speed can lead to a traffic accident with serious consequences. One of the technical solutions aimed at preserving wheel working ability and improving vehicle safety in case of loss of overpressure of air in a pneumatic tire is the use of internal additional supports. However, the loss of excess air pressure even in one pneumatic tire leads to a noticeable deterioration in most of the performance properties, especially when driving on roads with uneven surfaces. Intensive oscillations lead to an increase in the vibration level, reducing the performance of high-speed properties, fuel efficiency, stability and controllability of the wheeled vehicle. A new mathematical model of the springing system has been developed, which is equivalent to a vehicle suspension with high-safety wheels and allows one to substantiate the parameters of the internal additional supports and evaluate their influence on the vibrations and smooth running of the vehicle at the design stage. The model is intended for engineering calculations and differs in that internal additional supports are presented as spring-damping elements of the vehicle springing system. The results of study can be claimed by manufacturers of civil and military vehicles, wheeled armored vehicles and special machines.

**Keywords:** high-safe wheels, springing system, smooth running, mathematical model, vibration, vertical acceleration, amplitude-frequency characteristic

**Date of acceptance for publication:** 10.07.2019  
**Date of publication:** 25.09.2019

**Сведения об авторе:**

**Мазур Владимир Викторович** – кандидат технических наук, доцент по кафедре автомобильного транспорта, доцент, кафедра машиностроения и транспорта, Братский государственный университет, e-mail: mazurvv@yandex.ru.

ORCID: 0000-0001-9487-3280

**Author information:**

**Vladimir V. Mazur** – Candidate of Technical Sciences, Associate professor in the Department of automobile transport, Associate professor, Department of mechanical engineering and transport, Bratsk State University, e-mail: mazurvv@yandex.ru.

ORCID: 0000-0001-9487-3280

## 1. Введение

Колесо с пневматической шиной традиционной конструкции имеет существенный недостаток, который заключается в прекращении движения автотранспортного средства при потере избыточного давления воздуха.

Поиск технических решений, направленных на сохранение работоспособности колеса при потере избыточного давления воздуха в пневматической шине, осуществлялся с момента её изобретения шотландским инженером Робертом Уильямом Томсоном в 1845 году [1]. Отмечая преимущества физических свойств сжатого воздуха, Р.У. Томсон указывал на возможность потери избыточного давления при механических повреждениях пневматической шины и предлагал вместо воздуха заполнять камеру конским волосом или губкой, а также устанавливать металлические пружины и куски натурального каучука или гуттаперчи.

В начале XX века возникла идея применения автомобильных колёс с дополнительными опорами внутри камерных пневматических шин [2-7]. Однако из-за сложности изготовления и обслуживания такие колёса серийно не производились и не нашли широкого применения. В свою очередь, бескамерные шины на гражданских автомобилях до 1954 года практически не применялись из-за ошибочного мнения об их низких надёжности и безопасности.

Первой серийной гражданской машиной с колёсами повышенной безопасности *Depovo* английской фирмы «Данлоп» является легковой автомобиль *Mini 1275 GT*, который выпускался с 1974 года. Многочисленные испытания показали, что после сквозного повреждения пневматической шины острым предметом автомобиль мог продолжать движение со скоростью до 80 км/ч на расстоянии до 160 км без замены или ремонта колеса [8].

Современные колёса повышенной безопасности с внутренними дополнительными опорами обеспечивают более длительное устойчивое и управляемое движение автомобиля с высокой скоростью даже при потере избыточного давления воздуха в нескольких пневматических шинах [9-13]. Однако потеря избыточного давления воздуха даже в одной пневматической шине приводит к заметному ухудшению большинства эксплуатационных свойств, особенно при движении по дорогам с неровными поверхностями, так как возрастающая интенсивность колебаний приводит не только к повышению уровня вибронегруженности водителя, пассажиров и перевозимых автотранспортным средством грузов, но и к снижению показателей тягово-скоростных свойств, топливной экономичности, устойчивости и управляемости колёсной машины. Именно поэтому научные исследования, направленные на совершенствование конструкций колёс повышенной безопасности как элементов системы поддрессоривания и оценка их влияния на эксплуатационные свойства автомобиля, являются актуальными.

## 2. Постановка задач исследования

Влияние потери избыточного давления воздуха в пневматических шинах на тягово-скоростные свойства, топливную экономичность, проходимость, устойчивость и управляемость автотранспортного средства в достаточной степени изучено [14-18], однако в большинстве случаев только по результатам натурных испытаний и экспериментальных исследований конкретных опытных или серийных образцов.

Внутренние дополнительные опоры, которые при одних и тех же размерах колёс повышенной безопасности разных шинных компаний отличаются по жёсткости в широком диапазоне, до настоящего времени не рассматривались как элементы системы под-

рессоривания автомобиля, а известные методики их расчёта и проектирования не содержат каких либо рекомендаций по обоснованному выбору параметров, влияющих на колебания и плавность хода автотранспортного средства.

Поэтому одной из задач при проектировании внутренних дополнительных опор является обоснование их параметров как элементов системы поддресоривания автомобиля путём моделирования, расчёта и исследования его колебаний при движении по неровным дорогам без избыточного воздуха в одной или нескольких пневматических шинах.

### 3. Математическая модель колебательной системы, эквивалентной подвеске автомобиля с колёсами повышенной безопасности

Универсальность разработанных ранее стереометрических моделей колебательных систем, эквивалентных автомобилю с колёсами повышенной безопасности [19-22], позволяет оценивать влияние интенсивности колебаний на показатели основных эксплуатационных свойств автотранспортных средств при движении по неровным дорогам в рамках долгосрочных научно-исследовательских работ и проектов. Однако для инженерных расчётов из-за сложности и громоздкости численных, а тем более аналитических решений их применение весьма затруднительно. В теории автомобиля для расчёта основных оценочных показателей плавности хода широко применяются более простые математические модели колебательных систем, эквивалентных подвеске автомобиля.

Для обоснования параметров внутренних дополнительных опор, влияющих на плавность хода автомобиля, была разработана математическая модель колебательной системы, эквивалентной подвеске автомобиля с колёсами повышенной безопасности. При построении математической модели были приняты известные в теории автомобиля условия и ограничения.

Для разных технических состояний колёс повышенной безопасности, характеризующихся степенью повреждений и наличием избыточ-

ного давления воздуха, применяются соответствующие схемы колебательных систем.

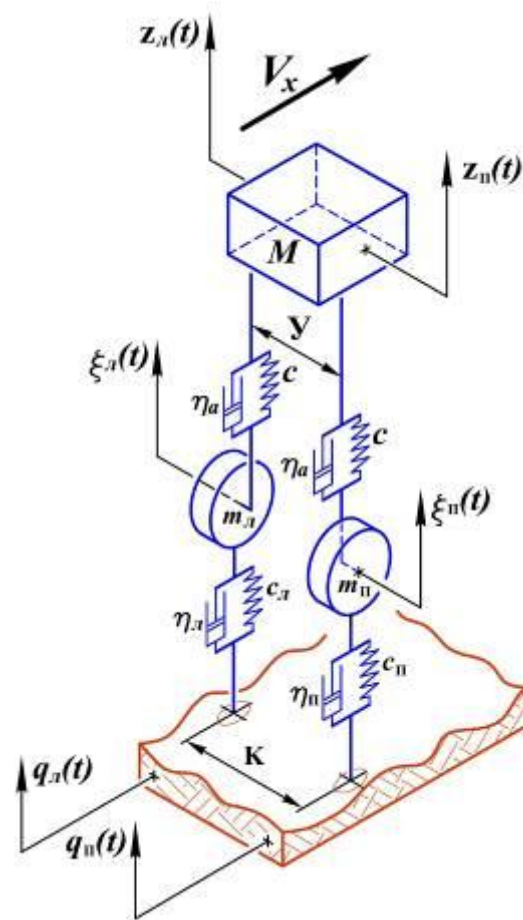


Рис. 1. Схема колебательной системы, эквивалентной подвеске автомобиля с колёсами повышенной безопасности при избыточном давлении воздуха в пневматических шинах

На рис. 1 изображена схема колебательной системы при избыточном давлении воздуха в пневматических шинах. На схеме приняты следующие обозначения:  $M$  – подпрессоренная масса;  $m_{п}$  и  $m_{л}$  – неподдресоренные массы, сосредоточенные на правом и левом колёсах автомобиля;  $c$  – коэффициент жёсткости упругого элемента подвески;  $\eta_a$  – коэффициент неупругого сопротивления гидравлического амортизатора;  $c_{п}$  и  $c_{л}$  – коэффициенты нормальной жёсткости правого и левого колёс;  $\eta_{п}$  и  $\eta_{л}$  – коэффициенты неупругого сопротивления правого и левого колёс;  $K$  – колея;  $U$  – расстояние между упругими элементами подвески;  $z_{п}(t)$  и  $z_{л}(t)$  –

вертикальные перемещения правой и левой частей подрессоренной массы;  $\xi_{\text{п}}(t)$  и  $\xi_{\text{л}}(t)$  – вертикальные перемещения правой и левой неподдресоренных масс;  $q_{\text{п}}(t)$  и  $q_{\text{л}}(t)$  – ординаты микропрофиля дорожной поверхности;  $V_x$  – скорость движения автомобиля.

При симметричности подрессоренной массы относительно продольной плоскости и отсутствии инерционной связи между вертикальными колебаниями левого и правого бортов автотранспортного средства справедливы равенства:

$$M = M_{\text{п}} + M_{\text{л}} \text{ и } M_{\text{п}} = M_{\text{л}} = \frac{M}{2}, \quad (1)$$

где  $M_{\text{п}}$  – правая подрессоренная масса;  $M_{\text{л}}$  – левая подрессоренная масса.

При симметричном воздействии неровностей дорожной поверхности на левые и правые колёса автомобиля можно принять:

$$q_{\text{п}}(t) = q_{\text{л}}(t) = q(t). \quad (2)$$

Принимая коэффициенты нормальной жёсткости колёс повышенной безопасности равными коэффициенту нормальной жёсткости пневматической шины при номинальном избыточном давлении воздуха:

$$c_{\text{п}} = c_{\text{л}} = c_{\text{ш}}, \quad (3)$$

а коэффициенты неупругого сопротивления – коэффициенту неупругого сопротивления пневматической шины при этом же давлении:

$$\eta_{\text{п}} = \eta_{\text{л}} = \eta_{\text{ш}}, \quad (4)$$

систему дифференциальных уравнений, описывающую вертикальные колебания подрессоренной и неподдресоренных масс, можно записать как

$$\begin{cases} Mz_{\text{л}} + 2\eta_{\text{а}}(\dot{z}_{\text{л}} - \dot{\xi}_{\text{л}}) + 2c(z_{\text{л}} - \xi_{\text{л}}) = 0; \\ Mz_{\text{п}} + 2\eta_{\text{а}}(\dot{z}_{\text{п}} - \dot{\xi}_{\text{п}}) + 2c(z_{\text{п}} - \xi_{\text{п}}) = 0; \\ m_{\text{л}}\ddot{\xi}_{\text{л}} + \eta_{\text{ш}}(\dot{\xi}_{\text{л}} - \dot{q}) - \eta_{\text{а}}(\dot{z}_{\text{л}} - \dot{\xi}_{\text{л}}) + \\ + c_{\text{ш}}(\xi_{\text{л}} - q) - c(z_{\text{л}} - \xi_{\text{л}}) = 0; \\ m_{\text{п}}\ddot{\xi}_{\text{п}} + \eta_{\text{ш}}(\dot{\xi}_{\text{п}} - \dot{q}) - \eta_{\text{а}}(\dot{z}_{\text{п}} - \dot{\xi}_{\text{п}}) + \\ + c_{\text{ш}}(\xi_{\text{п}} - q) - c(z_{\text{п}} - \xi_{\text{п}}) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Очевидно, что приведённая на рис.1 схема принципиально ничем не отличается от известных в теории автомобиля схем колебательных систем, эквивалентных подвеске автомобиля с колёсами традиционной конструкции.

На рис. 2 изображена схема колебательной системы, эквивалентной подвеске автомобиля с колёсами повышенной безопасности без избыточного давления воздуха в одной из пневматических шин, что для гражданских автомобилей является наиболее вероятным событием. На схеме без избыточного давления воздуха представлена пневматическая шина правого безопасного колеса, коэффициенты нормальной жёсткости и неупругого сопротивления которой обозначены как  $c_o$  и  $\eta_o$ .

При атмосферном давлении воздуха в пневматической шине качение правого колеса будет осуществляться с опорой на внутренний дополнительный элемент, коэффициенты нормальной жёсткости и неупругого сопротивления которого обозначены на схеме как  $c_{\text{д}}$  и  $\eta_{\text{д}}$ .

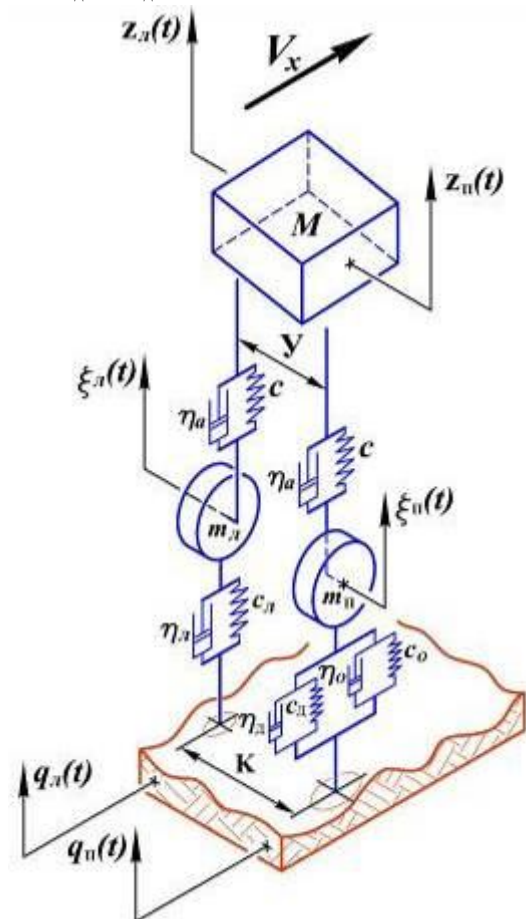


Рис. 2. Схема колебательной системы, эквивалентной подвеске автомобиля с колёсами повышенной безопасности без избыточного давления воздуха в правой пневматической шине

Иначе говоря, при потере герметичности пневматической шины вследствие механических повреждений параметры правого колеса, влияющие на плавность хода, – коэффициент нормальной жёсткости  $c_{\text{п}}$  и коэффициент неупругого сопротивления  $\eta_{\text{п}}$  в соответствии со схемой, приведённой на рис.2, будут определяться как

$$c_{\text{п}} = c_o + c_{\text{д}} \text{ и } \eta_{\text{п}} = \eta_o + \eta_{\text{д}}, \quad (6)$$

а система дифференциальных уравнений будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} Mz_{\text{л}} + 2\eta_a(z_{\text{л}} - \dot{\xi}_{\text{л}}) + 2c(z_{\text{л}} - \xi_{\text{л}}) = 0; \\ Mz_{\text{п}} + 2\eta_a(z_{\text{п}} - \dot{\xi}_{\text{п}}) + 2c(z_{\text{п}} - \xi_{\text{п}}) = 0; \\ m_{\text{л}}\ddot{\xi}_{\text{л}} + \eta_{\text{ш}}(\dot{\xi}_{\text{л}} - \dot{q}) - \eta_a(z_{\text{л}} - \dot{\xi}_{\text{л}}) + \\ + c_{\text{ш}}(\xi_{\text{л}} - q) - c(z_{\text{л}} - \xi_{\text{л}}) = 0; \\ m_{\text{п}}\ddot{\xi}_{\text{п}} + (\eta_o + \eta_{\text{д}})(\dot{\xi}_{\text{п}} - \dot{q}) - \eta_a(z_{\text{п}} - \dot{\xi}_{\text{п}}) + \\ + (c_o + c_{\text{д}})(\xi_{\text{п}} - q) - c(z_{\text{п}} - \xi_{\text{п}}) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Отсутствие несущей способности пневматической шины при атмосферном давлении воздуха делает невозможным получить экспериментальные кривые затухающих колебаний методом сбрасывания или подтягивания [23], обработка которых позволяет оценивать демпфирующие свойства элементов колебательных систем. Поэтому для определения коэффициентов неупругого сопротивления конструктивных элементов колёс повышенной безопасности была применена эллиптическо-степенная модель [24, 25], позволяющая оценивать демпфирующие свойства по аппроксимированным характеристикам нормальной жёсткости [26].

В соответствии с упрощённой эллиптическо-степенной моделью для инженерных расчётов эквивалентные коэффициенты вязкостного трения могут быть определены как

$$\eta_o = \frac{2H}{n+1} \frac{1}{h_{\text{зст}}^{1-n} \omega}, \quad (8)$$

где  $H$  и  $n$  – параметры эллиптическо-степенной модели;  $h_{\text{зст}}$  – статический прогиб конструктивного элемента колеса повышенной безопасности;  $\omega$  – циклическая частота колебаний.

В свою очередь, коэффициент пропорциональности  $H$  и показатель степени  $n$  не имеют какого-либо физического смысла, но являются константами для конкретного уп-

руго-демпфирующего элемента колебательной системы.

Из мирового опыта эксплуатации известно, что при длительном движении автомобиля без избыточного давления воздуха в пневматической шине из-за повышенного теплообразования, вызванного внутренним и внешним трениями в процессе качения, весьма вероятно полное разрушение покрышки. На скорость теплового разрушения разгерметизированной шины, прежде всего, будут влиять наличие и антифрикционные свойства специального смазочного материала и способ крепления опорного кольца, которое в зависимости от конструкции колеса повышенной безопасности может вращаться или быть неподвижным относительно обода. В этом случае дальнейшее движение автомобиля будет осуществляться только с опорой на внутренний дополнительный элемент колеса повышенной безопасности.

При движении автомобиля с опорой на внутренний дополнительный элемент правого колеса с полностью разрушенной пневматической шиной справедлива схема колебательной системы, изображённая на рис.3. При этом параметры правого колеса, влияющие на плавность хода, будут определяться как

$$c_{\text{п}} = c_{\text{д}} \text{ и } \eta_{\text{п}} = \eta_{\text{д}}. \quad (9)$$

В свою очередь, система дифференциальных уравнений будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} Mz_{\text{л}} + 2\eta_a(z_{\text{л}} - \dot{\xi}_{\text{л}}) + 2c(z_{\text{л}} - \xi_{\text{л}}) = 0; \\ Mz_{\text{п}} + 2\eta_a(z_{\text{п}} - \dot{\xi}_{\text{п}}) + 2c(z_{\text{п}} - \xi_{\text{п}}) = 0; \\ m_{\text{л}}\ddot{\xi}_{\text{л}} + \eta_{\text{ш}}(\dot{\xi}_{\text{л}} - \dot{q}) - \eta_a(z_{\text{л}} - \dot{\xi}_{\text{л}}) + \\ + c_{\text{ш}}(\xi_{\text{л}} - q) - c(z_{\text{л}} - \xi_{\text{л}}) = 0; \\ m_{\text{п}}\ddot{\xi}_{\text{п}} + \eta_{\text{д}}(\dot{\xi}_{\text{п}} - \dot{q}) - \eta_a(z_{\text{п}} - \dot{\xi}_{\text{п}}) + \\ + c_{\text{д}}(\xi_{\text{п}} - q) - c(z_{\text{п}} - \xi_{\text{п}}) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Для решения полученных систем дифференциальных уравнений был применён метод операционного исчисления, а именно – прямое преобразование Лапласа, которое позволяет получить передаточные функции разработанной колебательной системы, амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и характеристики спектральной плотности вертикальных колебаний.

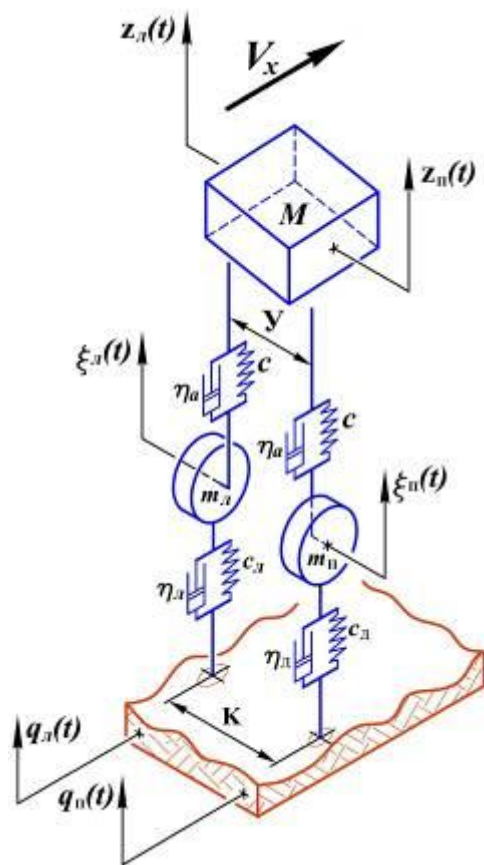


Рис. 3. Схема колебательной системы, эквивалентной подвеске автомобиля при движении с опорой на упругий дополнительный элемент правого колеса повышенной безопасности с полностью разрушенной пневматической шиной

Интегральным преобразованием Лапласа функции вещественной переменной  $z(t)$  называется функция комплексной переменной  $Z(p)$ :

$$Z(p) = \int_0^{\infty} z(t)e^{-pt} dt, \quad (11)$$

где  $t$  – вещественная переменная;  $p$  – комплексная переменная;  $z(t)$  – оригинал функции;  $Z(p)$  – изображение функции.

Комплексная переменная определяется как

$$p = i\omega, \quad (12)$$

где  $i = \sqrt{-1}$ .

Соответствие оригинала функции своему изображению символически записывается как

$$z(t) \rightarrow Z(p). \quad (13)$$

Производные функций изображаются следующим образом:

$$\dot{z}(t) \rightarrow pZ(p) - z(0), \quad (14)$$

$$z(t) \rightarrow p^2Z(p) - pz(0) - \dot{z}(0),$$

где  $z(0)$  и  $\dot{z}(0)$  – оригинал и производная оригинала функции при начальных условиях.

Учитывая, что параметры установившихся вынужденных колебаний не зависят от начальных условий, для удобства вычислений принимаем:

$$\begin{aligned} z_n(0) = \dot{z}_n(0) = 0, \quad z_d(0) = \dot{z}_d(0) = 0, \\ \xi_n(0) = \dot{\xi}_n(0) = 0 \quad \text{и} \quad \xi_d(0) = \dot{\xi}_d(0) = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

С помощью преобразований Лапласа система дифференциальных уравнений (5) обращается в систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} Z_d \left( \frac{Mp^2}{2} + \eta_a p + c \right) - \xi_d (\eta_a p + c) = 0; \\ Z_n \left( \frac{Mp^2}{2} + \eta_a p + c \right) - \xi_n (\eta_a p + c) = 0; \\ \xi_d (m_d p^2 + (\eta_a + \eta_n) p + c + c_w) - \\ - Z_d (\eta_a p + c) - Q(\eta_n p + c_w) = 0; \\ \xi_n (m_n p^2 + (\eta_a + \eta_n) p + c + c_w) - \\ - Z_n (\eta_a p + c) - Q(\eta_n p + c_w) = 0, \end{cases} \quad (16)$$

где  $Z_n = Z_n(p)$ ,  $Z_d = Z_d(p)$ ,  $\xi_n = \xi_n(p)$ ,  $\xi_d = \xi_d(p)$  и  $Q = Q(p)$  – изображения функций вертикальных колебаний подрессоренной и нерессоренных масс и микропрофиля дорожной поверхности.

Аналогичным образом применяем преобразования Лапласа для систем (7) и (10):

$$\begin{cases} Z_d \left( \frac{Mp^2}{2} + \eta_a p + c \right) - \xi_d (\eta_a p + c) = 0; \\ Z_n \left( \frac{Mp^2}{2} + \eta_a p + c \right) - \xi_n (\eta_a p + c) = 0; \\ \xi_d (m_d p^2 + (\eta_a + \eta_n) p + c + c_w) - \\ - Z_d (\eta_a p + c) - Q(\eta_n p + c_w) = 0; \\ \xi_n (m_n p^2 + (\eta_a + \eta_o + \eta_n) p + c + c_o + c_d) - \\ - Z_n (\eta_a p + c) - Q((\eta_o + \eta_n) p + c_o + c_d) = 0, \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} Z_n \left( \frac{Mp^2}{2} + \eta_a p + c \right) - \xi_n (\eta_a p + c) = 0; \\ Z_n \left( \frac{Mp^2}{2} + \eta_a p + c \right) - \xi_n (\eta_a p + c) = 0; \\ \xi_n (m_n p^2 + (\eta_a + \eta_n) p + c + c_n) - \\ - Z_n (\eta_a p + c) - Q(\eta_n p + c_n) = 0; \\ \xi_n (m_n p^2 + (\eta_a + \eta_n) p + c + c_n) - \\ - Z_n (\eta_a p + c) - Q(\eta_n p + c_n) = 0, \end{cases} \quad (18)$$

Модуль отношения изображения функции (13), описывающей движение масс колебательной системы, к изображению возмущающей функции называется модулем передаточной функции и численно равен отношению амплитуд соответствующих оригиналов:

$$|W_z(p)| = \frac{|Z(p)|}{|Q(p)|} = \frac{z_a(\omega)}{q_a}, \quad (19)$$

где  $z_a$  – амплитуда вертикальных колебаний;  $q_a$  – амплитуда микропрофиля дорожной поверхности.

В свою очередь, одним из основных оценочных параметров плавности хода автомобиля является ускорение [27], функция которого имеет следующее изображение:

$$z(t) \rightarrow p^2 Z(p). \quad (20)$$

Решение систем уравнений (16-18) позволяет получить передаточные функции ускорений подрессоренной и неподрессоренных масс.

Модуль передаточной функции ускорений вертикальных колебаний, учитывая (19) и (20), определяется как АЧХ колебательной системы:

$$|W_z(i\omega)| = \frac{z_a(\omega)}{q_a}. \quad (21)$$

Из теории автомобиля известно, что для описания микропрофиля поверхности реальной дороги используют спектральную плотность  $S_q(l)$  – непрерывную функцию, характеризующую распределение дисперсий высот неровностей  $D_q$  по длине пути автомобиля  $l$ . При постоянной скорости движения автомобиля  $V_x$  функция спектральной плотности микропрофиля может быть преобразована в функцию от циклической частоты

$$\int_0^{\infty} S_q(\omega) d\omega = D_q = \sigma_q^2, \quad (22)$$

где  $\sigma_q$  – среднее квадратичное значение высот неровностей дороги.

В этом случае циклическая частота определяется как

$$\omega = \frac{2\pi V_x}{l_n}, \quad (23)$$

где  $l_n$  – длина периодической неровности.

Спектральная плотность колебаний, как реакция динамической системы на входное воздействие, определяется с помощью уравнения Винера-Хинчина:

$$S_z(\omega) = |W_z(i\omega)|^2 S_q(\omega). \quad (24)$$

В конечном итоге плавность хода оценивается величиной среднего квадратичного ускорения колебаний следующим образом:

$$\sigma_z^2 = D_z = \int_0^{\infty} S_z(\omega) d\omega, \quad (25)$$

где  $D_z$  – дисперсия ускорений вертикальных колебаний.

#### 4. Теоретические исследования колебаний автомобиля с колёсами повышенной безопасности

Для теоретических исследований и оценки вибронегруженности автотранспортного средства с колёсами повышенной безопасности в качестве исходных данных для расчёта были взяты параметры задней подвески легкового автомобиля малого класса ВАЗ-2115, которые приведены в табл. 1.

Параметры неупругого сопротивления  $H_n$  и  $n_n$  являются константами для конкретной марки, модели и технического состояния пневматической шины и не зависят от величины внутреннего давления воздуха [24, 25].

Параметры колебательной системы, эквивалентной задней подвеске автомобиля ВАЗ-2115 в снаряжённом состоянии, были определены в лабораторных условиях и приняты для расчётов по следующим основаниям. В соответствии с [28] плавность хода автомобиля оценивают с помощью вертикальных и горизонтальных виброускорений.

Табл.1

Исходные данные для расчёта передаточных функций  
 задней подвески легкового автомобиля ВАЗ-2115

Параметр колебательной системы, эквивалентной подвеске автомобиля	Обозначение	Размерность	Значение
1. Поддрессоренная снаряжённая масса	$M$	кг	375
2. Правая (левая) неподрессоренная масса с безопасным колесом в сборе	$m_{\Pi} (m_{л})$		35
3. Правая (левая) неподрессоренная масса с традиционным колесом в сборе			30
4. Правая (левая) неподрессоренная масса при качении колеса на внутренней дополнительной опоре с полностью разрушенной пневматической шиной			
5. Коэффициент жёсткости упругого элемента подвески	$c$	кН/м	11
6. Коэффициент нормальной жёсткости пневматической шины при избыточном давлении воздуха $p_w = 0,2$ МПа	$c_{\text{ш}}$		140
7. Коэффициент нормальной жёсткости пневматической шины при атмосферном давлении воздуха	$c_o$		24
8. Коэффициент нормальной жёсткости внутренней дополнительной опоры	$c_d$		740
			375
9. Коэффициент неупругого (вязкого) сопротивления амортизатора	$\eta_a$	Нс/м	500
10. Параметры поглощающей способности пневматической шины	$H_{\text{ш}}$	кН/м <sup><math>n_{\text{ш}}</math></sup>	58,59
	$n_{\text{ш}}$	-	0,34
11. Параметры поглощающей способности внутренней дополнительной опоры	$H_d$	кН/м <sup><math>n_d</math></sup>	117,42
	$n_d$		0,67
			124,50
			0,57

При этом измерения виброускорений должны проводиться в характерных точках автотранспортного средства. В частности, у легковых автомобилей – на заднем сидении с правой стороны. При движении автомобиля по неровной дороге с постоянной скоростью наибольшую интенсивность имеют вертикальные колебания его поддрессоренной и неподрессоренных масс.

Также известно, что при уменьшении поддрессоренной массы плавность хода автомобиля, оцениваемая величиной среднего

квадратичного виброускорения, ухудшается. Кроме этого, при испытаниях автомобиля в снаряжённом состоянии с частичной весовой нагрузкой [22], состоящей из водителя и экспериментатора, задняя поддрессоренная масса имеет гораздо меньшее значение, чем передняя и, как следствие, влияние параметров колёс повышенной безопасности, зависящих от степени повреждения пневматических шин и величины избыточного давления воздуха, более заметно.



Микропрофиль дороги в расчётах плавности хода автомобиля аппроксимирован корреляционной функцией [24]:

$$R_q(\Delta l) = D_q \left( A_1 e^{-\alpha_1 |\Delta l|} + A_2 e^{-\alpha_2 |\Delta l|} \cos \beta |\Delta l| \right), \quad (26)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – коэффициенты, характеризующие распределение дисперсии ординат микропрофиля ( $A_1 + A_2 = 1$ );  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – параметры, характеризующие быстроту затухания корреляционной связи ординат микропрофиля;  $\beta$  – волновая частота гармонической составляющей микропрофиля.

При принятой корреляционной функции спектральная плотность микропрофиля дороги определяется как

$$S_q(\omega) = \frac{D_q}{\pi} \left( \frac{A_1 \alpha_1'}{\omega^2 + \alpha_1'^2} + \frac{0,5 A_2 \alpha_2'}{(\omega - \beta')^2 + \alpha_2'^2} + \frac{0,5 A_2 \alpha_2'}{(\omega + \beta')^2 + \alpha_2'^2} \right), \quad (27)$$

где  $\alpha_1' = \alpha_1 V_x$ ,  $\alpha_2' = \alpha_2 V_x$ ,  $\beta_1' = \beta_1 V_x$  и  $\beta_2' = \beta_2 V_x$ .

Параметры корреляционных функций микропрофиля автомобильных дорог приведены в табл. 2.

Табл. 2

Параметры корреляционной функции микропрофиля автомобильных дорог

Тип дороги	$D_q, \text{мм}^2$	$A_1$	$A_2$	$\alpha_1, \text{м}^{-1}$	$\alpha_2, \text{м}^{-1}$	$\beta, \text{м}^{-1}$
1. Дорога с асфальтобетонным покрытием	64	0,65	0,35	0,250	0,06	0,393
2. Дорога грунтовая разбитая	4706	0,55	0,45	0,085	0,08	0,285

На рис. 4 приведены АЧХ ускорений поддресоренной массы автомобиля ВАЗ-2115 с колёсами повышенной безопасности при избыточном и атмосферном давлениях воздуха в пневматических шинах, внутренние дополнительные опоры которых отличаются значениями параметров, характеризующих упругие и демпфирующие свойства.

Потеря избыточного давления воздуха в пневматической шине приводит к резкому ухудшению плавности хода – резонансная амплитуда поддресоренной массы над повреждённым колесом возрастает в 2,59 раза (с  $786,39 \text{ с}^{-2}$  при  $v = 10,7 \text{ Гц}$  до  $2040,8 \text{ с}^{-2}$  при  $v = 17,243 \text{ Гц}$ ) при применении опоры I и в 4,93 раза (с  $786,39 \text{ с}^{-2}$  при  $v = 10,7 \text{ Гц}$  до  $3876,2 \text{ с}^{-2}$  при  $v = 23,71 \text{ Гц}$ ) при применении опоры II.

Известно, что неупругое сопротивление автомобильной шины, создаваемое в основном внутренним гистерезисным трением, оказывает влияние в первую очередь на тягово-скоростные свойства и топливную экономичность автомобиля. Увеличение гистерезисных потерь приводит к повышению сопротивления качению колёс, расхода топлива автомобиля и тепловой заметности колёсной техники.

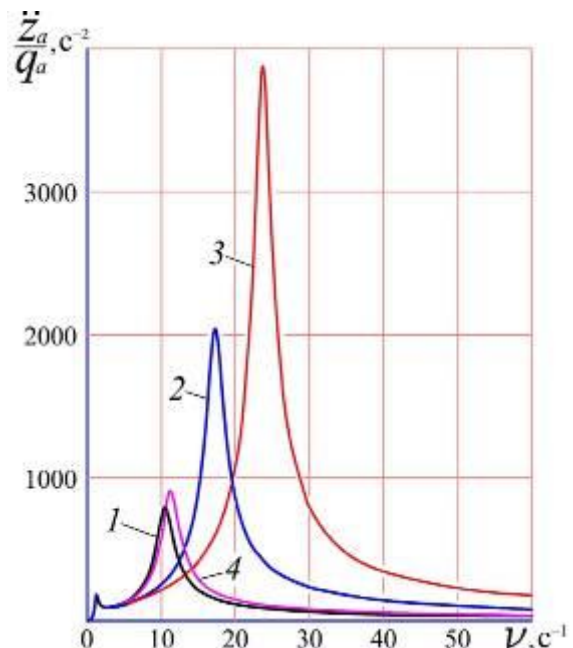


Рис. 4. АЧХ ускорений колебаний поддресоренной массы автомобиля ВАЗ-2115 над задним колесом повышенной безопасности:

- I – при  $p_w = 0,2 \text{ МПа}$ ; 2 – при  $p_w = 0 \text{ МПа}$ ,  
 $c_d = 375 \text{ кН/м}$ ,  $H_d = 124,50 \text{ кН/м}^{n_d}$ ,  $n_d = 0,57$ ;  
 3 – при  $p_w = 0 \text{ МПа}$ ,  $c_d = 740 \text{ кН/м}$ ,  
 $H_d = 117,42 \text{ кН/м}^{n_d}$ ,  $n_d = 0,67$ ; 4 – при  
 $p_w = 0 \text{ МПа}$ ,  $c_d = 140 \text{ кН/м}$ ,  $\eta_d = 0 \text{ Нс/м}$

В свою очередь, при потере избыточного давления воздуха резко возрастающие амплитуды деформации, гистерезисное и механическое трения приводят к ускоренному разрушению пневматических шин колёс повышенной безопасности. Поэтому усилия учёных и инженеров направлены на снижение неупругого сопротивления колёсных движителей.

Уменьшение неупругого сопротивления внутренних дополнительных опор представляет сложную задачу, так как в большинстве случаев упругая опора представляет собой массивный элемент и при радиальном прогибе, близком по значению к прогибу тонкостенной оболочки пневматической шины, имеет гораздо большую величину гистерезисных потерь. Но даже применение опоры с условными параметрами (рис. 4), такими как отсутствие гистерезисных потерь ( $\eta_d = 0$  Нс/м) и равенство коэффициентов нормальной жёсткости опоры и пневматической шины при избыточном давлении воздуха ( $c_d = c_{ш} = 140$  кН/м) не позволяет сохранить первоначальный уровень плавности хода – резонансная амплитуда поддрессоренной массы над повреждённым колесом возрастает на 15,54 % (с  $786,39 \text{ с}^{-2}$  при  $\nu = 10,7$  Гц до  $908,58 \text{ с}^{-2}$  при  $\nu = 11,28$  Гц).

На рис. 5 приведены АЧХ ускорений поддрессоренной массы автомобиля ВАЗ-2115 с колёсами повышенной безопасности с разрушенной и неразрушенной пневматическими шинами без избыточного давления воздуха. Сравнение АЧХ позволяет оценить влияние на плавность хода неупругого сопротивления неразрушенной пневматической шины при атмосферном давлении воздуха. Так, при разрушении пневматической шины и качении на опоре II резонансная амплитуда поддрессоренной массы над повреждённым колесом в сравнении с амплитудой с неразрушенной шиной при атмосферном давлении воздуха увеличивается всего на 2,24 % (до  $3963,1 \text{ с}^{-2}$  при  $\nu = 25,2$  Гц), а при качении на опоре I – уменьшается на 1,43 % (до  $2012 \text{ с}^{-2}$  при  $\nu = 18,08$  Гц), однако на всём послерезонансном диапазоне возмущающих частот увеличивается.

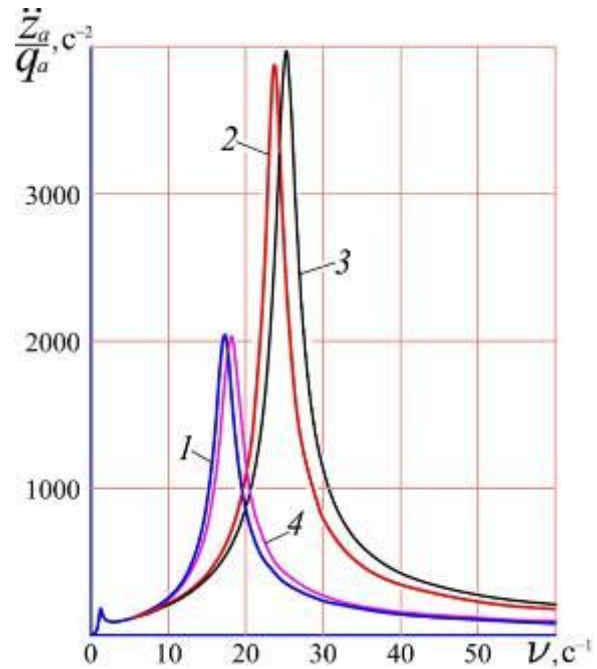


Рис. 5. АЧХ ускорений колебаний поддрессоренной массы автомобиля ВАЗ-2115 над задним колесом повышенной безопасности:

- 1 – с внутренней опорой I при  $p_w = 0$  МПа;
- 2 – с внутренней опорой II при  $p_w = 0$  МПа;
- 3 – с разрушенной пневматической шиной при качении на внутренней опоре II;
- 4 – с разрушенной пневматической шиной при качении на внутренней опоре I

Анализ АЧХ позволяет сделать вывод о том, что из рассмотренных технических состояний колёс повышенной безопасности плавность хода автомобиля ухудшается больше всего при неразрушенных пневматических шинах без избыточного давления воздуха.

На рис. 6 и 7 приведены полученные в результате расчёта спектральные плотности ускорений колебаний поддрессоренной массы автомобиля ВАЗ-2115 над задним колесом повышенной безопасности при избыточном и атмосферном давлении воздуха в неразрушенной пневматической шине при движении по грунтовой разбитой дороге и дороге с асфальтобетонным покрытием.

В табл. 3 приведены средние квадратичные ускорения поддрессоренной массы над задним колесом автомобиля ВАЗ-2115, полученные путём интегрирования функций спектральной плотности.

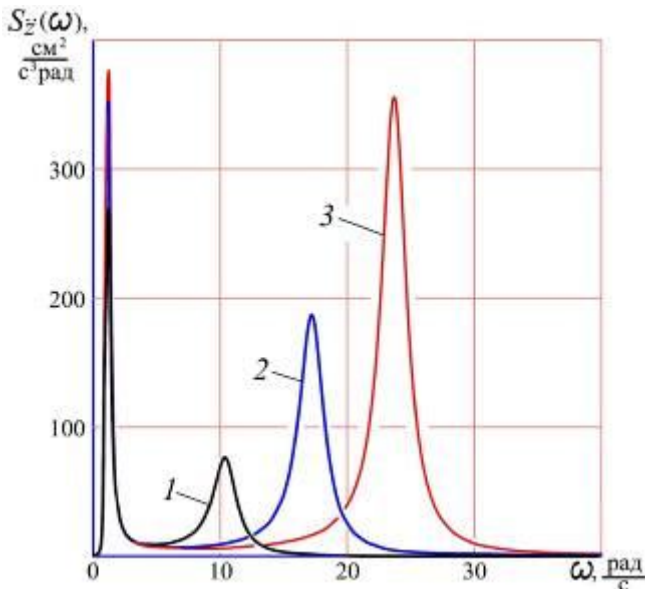


Рис. 6. Спектральная плотность ускорений колебаний поддрессоренной массы над задним колесом автомобиля ВАЗ-2115 при движении по дороге с асфальтобетонным покрытием со скоростью  $V_x = 14$  м/с: 1 – при  $p_w = 0,2$  МПа; 2 – с внутренней опорой I при  $p_w = 0$  МПа; 3 – с внутренней опорой II при  $p_w = 0$  МПа

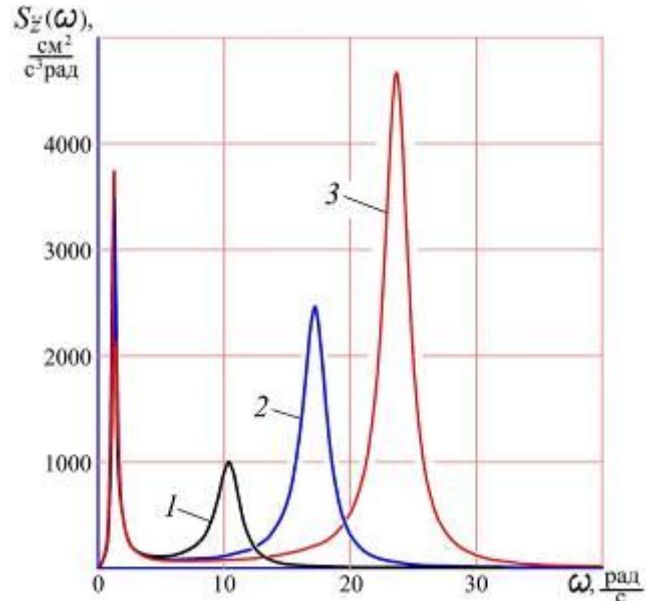


Рис. 7. Спектральная плотность ускорений колебаний поддрессоренной массы над задним колесом автомобиля ВАЗ-2115 при движении по разбитой грунтовой дороге со скоростью  $V_x = 5,5$  м/с: 1 – при  $p_w = 0,2$  МПа; 2 – с внутренней опорой I при  $p_w = 0$  МПа; 3 – с внутренней опорой II при  $p_w = 0$  МПа

Табл. 3

Оценка плавности хода автомобиля ВАЗ-2115 с колёсами повышенной безопасности по величине среднего квадратичного ускорения поддрессоренной массы

Тип дороги	Скорость движения автомобиля, м/с	Среднее квадратичное ускорение поддрессоренной массы над задним колесом, м/с <sup>2</sup>		
		$p_w = 0,2$ МПа	$p_w = 0$ МПа	
			Опора I	Опора II
1. Дорога с асфальтобетонным покрытием	14	0,54	0,76	0,99
2. Грунтовая разбитая дорога	5,5	1,82	2,67	3,51

Как и предполагалось, основным конструктивным элементом колеса повышенной безопасности, определяющим вибронгруженность автомобиля при потере пневматической шины избыточного давления воздуха, является внутренняя дополнительная опора, упругие и демпфирующие свойства которой оцениваются коэффициентами нормальной жёсткости и неупругого сопротив-

ления  $c_d$  и  $\eta_d$ . При этом, если неупругое сопротивление опоры необходимо однозначно уменьшать, то оптимальное значение её жёсткости может быть найдено как компромисс между плавностью хода, ресурсом, высокими показателями тягово-скоростных свойств, устойчивостью и управляемостью.

## 5. Экспериментальная проверка адекватности математической модели

Для проверки адекватности разработанной модели были проведены испытания легкового автомобиля ВАЗ-2115 с натурными образцами колёс повышенной безопасности на плавность хода в разных технических состояниях пневматических шин, характеризующихся избыточным или атмосферным давлением воздуха на разбитой грунтовой дороге и дороге с асфальтобетонным покрытием [29].

В соответствии с ГОСТ 12.1.012-90 [30] оценка вибронегруженности водителя, пассажиров, перевозимых автотранспортным средством грузов и характерных элементов шасси и кузова производится по нормируемым средним квадратичным значениям виброускорений или виброскоростей в вертикальном и горизонтальном направлениях для различных частот колебаний, группируемых в октавные полосы. Для более точной оценки зависимости допустимых значений виброускорений и виброскоростей от частот колебаний октавные полосы делятся на 1/3-октавные.

ОСТ 37.001.275–84 [28] также позволяет оценить уровень вибраций, испытываемых водителем и пассажирами автомобиля, с помощью скорректированных значений вертикальных и горизонтальных (продольных и поперечных) виброускорений:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 k_i^2}, \quad (28)$$

где  $\sigma_i$  – среднее квадратичное виброускорение в  $i$ -й октавной или 1/3-октавной полосе частот;  $k_i$  – весовой коэффициент, характеризующий чувствительность человека к вибрациям в  $i$ -й полосе частот;  $n$  – число обобщаемых октавных или 1/3-октавных полос частот.

Скорректированные значения виброускорений определяются в диапазоне средних геометрических частот от 0,8 до 80 Гц и нормируются ОСТ 37.001.291–84 [27] в зависимости от типа автотранспортного средства и номера участка специальной дороги Автополигона НАМИ. Однако сравнительные испытания на плавность хода допускаются про-

водить на участках автомобильных дорог общего пользования.

Измерение и регистрация вертикальных виброускорений поддресоренной массы испытываемого автомобиля осуществлялись с помощью комплекта виброизмерительной аппаратуры, в состав которого входит: переносной анализатор спектра низкочастотного диапазона ZET 017-U2 с программным обеспечением ZETLab, пьезоэлектрический и ёмкостной акселерометры BC 110 и BC 201, предварительный усилитель ZET 410, а также нетбук *Lenovo IdeaPad S10-2* и автомобильный преобразователь напряжения *Ritmix RPI-4001 12/230V 400W*. При этом дублирующие друг друга акселерометры BC 110 и BC 201 были установлены на правый кронштейн крепления сидений заднего ряда без промежуточной опорной плиты, как показано на рис. 8.



Рис. 8. Установка акселерометров BC 110 и BC 210 в салоне автомобиля ВАЗ-2115

Скорость движения автомобиля контролировалась по спидометру и составляла: на разбитой грунтовой дороге – 20 км/ч и на дороге с асфальтобетонным покрытием – 50 км/ч. Испытания на грунтовой дороге осуществлялись с частичной загрузкой автотранспортного средства, состоящей из водителя, экспериментатора и измерительной аппаратуры. Снижение давления воздуха в пневматической шине правого заднего колеса до атмосферного осуществлялось путём удаления золотника из вентиля или механических повреждений боковин сверлом большого диаметра.

На этапе пробных испытаний частично загруженного автомобиля было обнаружено, что скрип, обусловленный механическим трением упругого кольца безопасного колеса о внутреннюю поверхность пневматической шины без избыточного давления воздуха, при движении со скоростями более 20 км/ч пропадает из-за действия возрастающих центробежных сил. Поэтому для обеспечения постоянства опоры безопасного колеса на упругое кольцо при испытаниях на дороге с асфальтобетонным покрытием автомобиль загружался балластным грузом до полной массы.

На рис. 9 и 10 в качестве примера приведены 1/3-октавные спектры средних квадратичных виброускорений на правом кронштейне крепления сидений заднего ряда автомобиля ВАЗ-2115 при атмосферном давлении воздуха в пневматической шине заднего правого безопасного колеса и движении по разбитой грунтовой дороге со скоростью 20 км/ч и дороге с асфальтобетонным покрытием со скоростью 50 км/ч. При этом ■ – экспериментальные спектры, а □ – расчётные.

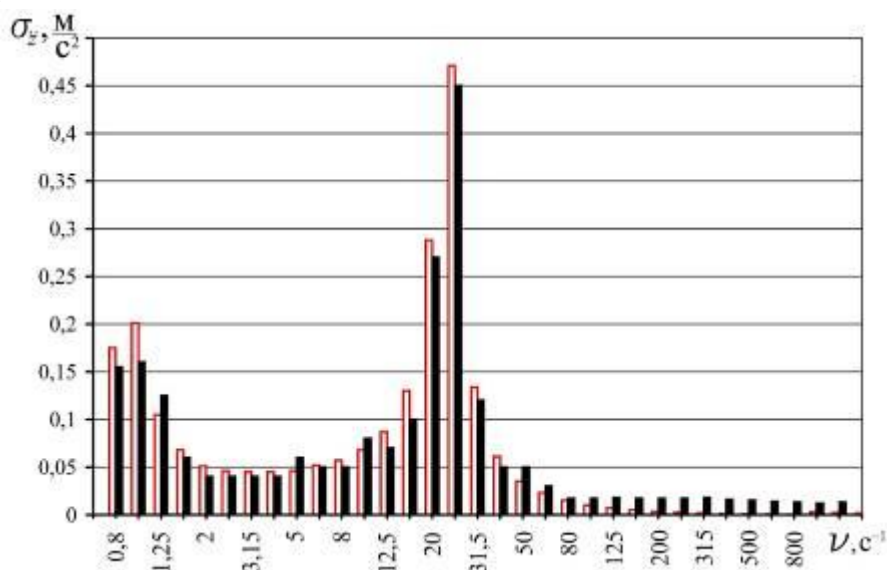


Рис. 9. 1/3-октавный спектр средних квадратичных виброускорений автомобиля ВАЗ-2115 при атмосферном давлении воздуха в пневматической шине заднего правого колеса и движении по дороге с асфальтобетонным покрытием со скоростью 50 км/ч

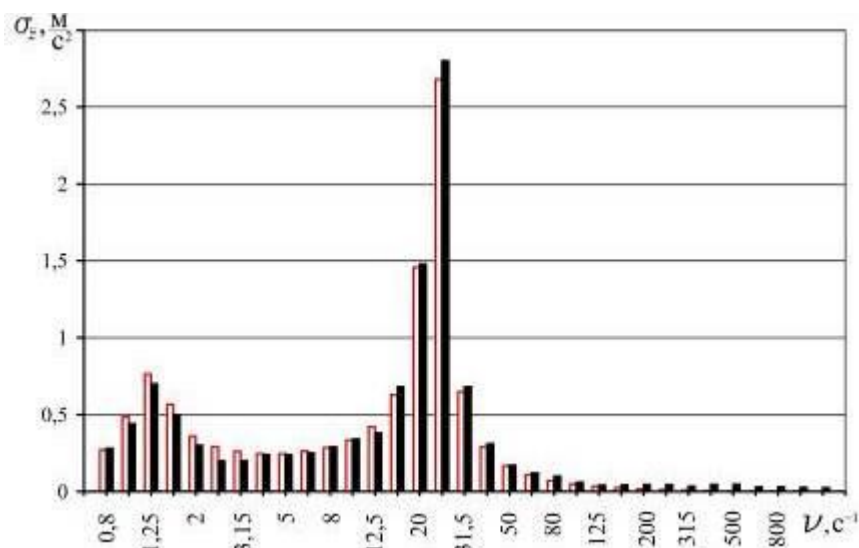


Рис. 10. 1/3-октавный спектр средних квадратичных виброускорений автомобиля ВАЗ-2115 при атмосферном давлении воздуха в пневматической шине заднего правого колеса и движении по разбитой грунтовой дороге со скоростью 20 км/ч

Расчётные 1/3-октавные спектры средних квадратичных виброускорений были получены с использованием формулы

$$\sigma_z = \sqrt{\int_{\omega_H}^{\omega_B} S_z(\omega) d\omega}, \quad (29)$$

где  $\omega_H$  – нижняя граница частоты 1/3-октавной полосы, рад/с;  $\omega_B$  – верхняя граница частоты 1/3-октавной полосы, рад/с.

Результаты испытаний автомобиля ВАЗ-2115 с колёсами повышенной безопасности на плавность хода приведены в табл. 4.

Табл. 4

Результаты испытаний автомобиля ВАЗ-2115  
с колёсами повышенной безопасности на плавность хода

Оценочные показатели	Избыточное давление воздуха в пневматической шине правого заднего колеса, МПа	
	0,2	0
1. Корректированное значение вертикального виброускорения поддрессоренной массы, м/с <sup>2</sup> :		
- на разбитой грунтовой дороге	1,450	1,597
- на дороге с асфальтобетонным покрытием	0,307	0,325
2. Расчётное корректированное значение вертикального виброускорения поддрессоренной массы, м/с <sup>2</sup> :		
- на разбитой грунтовой дороге	1,389	1,467
- на дороге с асфальтобетонным покрытием	0,258	0,288

Потеря избыточного давления воздуха в пневматической шине испытуемого автомобиля при его движении по дороге с асфальтобетонным покрытием со скоростью 50 км/ч приводит к увеличению корректированных значений виброускорения на 5,54 %, а при движении по разбитой грунтовой дороге со скоростью 20 км/ч – на 9,20 %.

Процентная разница между расчётными и экспериментальными корректированными значениями вертикального виброускорения на правом сидении заднего ряда автомобиля ВАЗ-2115 при номинальном давлении воздуха в пневматических шинах составляет: 4,21 % – на разбитой грунтовой дороге и 15,96 % – на дороге с асфальтобетонным покрытием. При атмосферном давлении воздуха в пневматической шине правого заднего колеса: 8,14 % – на грунтовой и 11,38 % – на асфальтобетонной дороге.

## 6. Результаты и выводы

1. Разработана новая математическая модель колебательной системы, эквивалентной подвеске автомобиля, отличающаяся тем, что внутренние дополнительные опоры ко-

лёс повышенной безопасности представлены как упруго-демпфирующие элементы системы поддрессоривания транспортного средства. Математическая модель позволяет на этапе проектирования обосновать параметры внутренних дополнительных опор путём оценки их влияния на интенсивность колебаний и плавность хода колёсной машины в разных технических состояниях пневматических шин, характеризующихся степенью повреждений и наличием избыточного давления воздуха.

2. По результатам теоретических исследований установлено, что потеря избыточного давления воздуха в пневматической шине приводит к возрастанию интенсивности колебаний поддрессоренной массы над повреждённым колесом автомобиля, при этом из рассмотренных технических состояний колеса повышенной безопасности наибольшее ухудшение показателей плавности хода автомобиля наблюдается при неразрушенной покрышке без избыточного давления воздуха. Например, при потере избыточного давления воздуха в пневматической шине заднего колеса легкового автомобиля малого класса ВАЗ-2115 значения среднего квадра-

тичного ускорения его подрессоренной массы при принятых параметрах внутренних дополнительных опор и движении со скоростью 50 км/ч по дороге с асфальтобетонным покрытием увеличиваются в 1,83 раза, а по разбитой грунтовой дороге со скоростью 20 км/ч – в 1,93 раза.

3. Колёса повышенной безопасности с внутренними дополнительными опорами из эластичных полимерных материалов с научно обоснованными параметрами упругих и демпфирующих свойств позволяют если не сохранить, то значительно снизить уровни вибронгруженности автомобильной техни-

ки, вынужденной продолжать движение без избыточного давления воздуха в пневматических шинах.

При этом невозможность сохранения первоначального уровня плавности хода связана с отсутствием возможности применения внутренних дополнительных опор с параметрами, близкими к параметрам пневматической шины с избыточным давлением воздуха.

4. Результаты исследования могут быть востребованы изготовителями колесных автомобилей и спецавтотранспорта.

### Список литературы

1. Pat. US 5104. *Carriage wheel* / Thomson R.W. – 08.05.1847.
2. Pat. US 1227108. *Inner tube for pneumatic tires* / Boggs H.C. – № 107423; filed 03.07.1916; publ. date 22.05.1917.
3. Pat. US 1636779. *Tire construction* / Krone F.W. – № 127104; filed 04.08.1926; publ. date 26.07.1927.
4. Pat. US 1860362. *Pneumatic tire* / Jones L.L. – № 416001; filed 23.12.1929; publ. date 31.05.1932.
5. Pat. US 2242788. *Safety inner tube* / Marks A. – № 304339; filed 14.11.1939; publ. date 20.05.1941.
6. Pat. US 2169041. *Pneumatic tire* / Gammeter J.R. – № 62090; filed 03.02.1936; publ. date 08.08.1939.
7. Pat. US 2224066. *Inner buffer for tires* / Shore R.B. – № 259953; filed 06.03.1939; publ. date 03.12.1940.
8. Кнороз, В.И. Работа автомобильной шины / В.И. Кнороз, Е.Б. Кленников, И.П. Петров, А.С. Шелухин, Ю.М. Юрьев / под ред. В.И. Кнороза. – М.: Транспорт, 1976. – 238 с.
9. Pat. EP 0860304, Int. Cl. B60C 17/06, B60C 17/04. *Luftbereiftes Fahrzeugrad* / Glinz M., Sergel H., Hellweg H.-B., Huinink H.; Continental Aktiengesellschaft. – № 98102979.6; anmeldetag 20.02.1998; veröffentlichungstag 26.08.1998, Blatt № 35. – 11 s.
10. Pat. US 6463976, Int. Cl. B60C 17/00, B60C 3/00. *Vehicle wheel with emergency running support body* / Glinz M., Hellweg

### References

1. Patent US 5104. *Carriage wheel*. Thomson R.W. Published 08.05.1847.
2. Patent US 1227108. *Inner tube for pneumatic tires*. Boggs H.C. Published 22.05.1917.
3. Patent US 1636779. *Tire construction*. Krone F.W. Published 26.07.1927.
4. Patent US 1860362. *Pneumatic tire*. Jones L.L. Published 31.05.1932.
5. Patent US 2242788. *Safety inner tube*. Marks A. Published 20.05.1941.
6. Patent US 2169041. *Pneumatic tire*. Gammeter J.R. Published 08.08.1939.
7. Patent US 2224066. *Inner buffer for tires*. Shore R.B. Published 03.12.1940.
8. Knoroz V.I., Klennikov E.B., Petrov I.P., Shelukhin A.S., Yuriev Y.M. *Rabota avtomobilnoy shiny* [Functioning of car tire]. Moscow, Transport, 1976. 238 p. (In Russian).
9. Patent EP 0860304. *Luftbereiftes Fahrzeugrad*. Glinz M., Sergel H., Hellweg H.-B., Huinink H. Declared 20.02.1998. Published 26.08.1998.
10. Patent US 6463976. *Vehicle wheel with emergency running support body*. Glinz M., Hellweg H.B. Declared 15.10.1998. Published 15.10.2002.
11. Patent RU 2261180 *Zashchitnaya opornaya podushka i konstruktziya iz podushki i oboda dlya pnevmaticheskoy shiny, sodershashchaya balansirovochnye sredstva i obespechivayushchaya oblegchyonnyy montazh* [Protecting bearing for air tire]. Pompe Z.-P.,

Н.В.; Continental Aktiengesellschaft. – № 09/509557; filed 15.10.1998; publ. date 15.10.2002.

11. Пат. 2261180 Рос. Федерация, МПК В60С 17/06. Защитная опорная подушка и конструкция из подушки и обода для пневматической шины, содержащая балансирующие средства и обеспечивающая облегченный монтаж / Помпе Ж.-П., Лакур Ж.-Ж., Дрие Ж.-Ж.; заявитель и патентообладатель Сосьете де Текноложии Мишлен, Мишлен Решерш э Текник С.А. – № 2002114550/11; заявл. 02.11.2000; опубл. 27.09.2005, Бюл. № 27.

12. Pat. US 2008/0295938, Int. Cl. B60C 17/10, B60C 17/04. *Tire/wheel assembly* / Naito M.; The Yokohama Rubber Co., Ltd. – № 10/567093; filed 08.01.2004; publ. date 04.12.2008.

13. Пат. 2461468 Рос. Федерация, МПК В60С 17/06. Внутренняя опора пневматической шины безопасного колеса / Чистов М.П., Абрамов В.Н., Веселов И.В., Стариков А.Ф., Усов А.Т., Сдобнов К.С., Колтуков А.А., Бабакин А.Н.; заявитель и патентообладатель Федер. гос. каз. учреждение «3-й Центр. науч.-исслед. ин-т» Минобороны России. – № 2009124863/11; заявл. 29.06.2009; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.

14. Чистов, М.П. Некоторые результаты испытаний отечественных боестойких колёс / М.П. Чистов, В.Н. Абрамов, Т.А. Аипов // Проблемы шин и резинокордных композитов. – 2005. – № 3. – С. 53-63.

15. Чистов, М.П. Актуальность комплектации АМН и СКШ колёсами с повышенной боестойкостью и обобщённый анализ конструктивных решений таких колёс / М.П. Чистов, А.Ф. Стариков, Т.А. Аипов // Проблемы шин и резинокордных композитов. Сб. докл. 20 симп. (междунар. конф.). – Т.2. – М.: НТЦ «НИИШП», 2009. – С. 194-201.

16. Абрамов, В.Н. Перспективы создания боестойких шин для армейских АТС / В.Н. Абрамов, М.П. Чистов // Автомобильная промышленность. – 2008. – № 8. – С. 16-19.

17. Веселов, И.В. Тенденция создания безопасных шин / И.В. Веселов, Г.П. Майо-

Лакур З.-З., Дрие З.-З. Declared 02.11.2000. Published 27.09.2005. (In Russian).

12. Patent US 295938. *Tire/wheel assembly*. Naito M. Declared 08.01.2004. Published 04.12.2008.

13. Patent RU 2461468 *Vnutrennyaya opora pnevmaticheskoy shiny bezopasnogo koleasa* [Safe wheel air tire internal support]. Chistov M.P., Abramov V.N., Veselov I.V., Starikov A.F., Usov A.T., Sdobnov K.S., Koltukov A.A., Babakin A.N. Declared 29.06.2009. Published 10.01.2011. (In Russian).

14. Chistov MP, Abramov V.N., Aipov T.A. Some test results of domestic fighting resistance wheels. *Problemy shin i rezinokordnykh kompozitov*, 2005, No. 3, pp. 53-63. (In Russian).

15. Chistov MP, Starikov AF, Aipov T.A. The relevance of a complete set of AMN and SKSH wheels with high fighting resistance and a generalized analysis of the design solutions of such wheels. *Problemy shin i rezinokordnykh kompozitov. Sbornik dokladov 20 simpoziuma (mezhdunarodnoj konferencii)* [Problems of tires and rubber-composites. Collection of reports 20 symposiums (international conference)]. Vol.2. Moscow, NIISHP, 2009, pp. 194-201. (In Russian).

16. Abramov V.N., Chistov M.P. Prospects for the creation of armor tires for military vehicles. *Avtomobilnaya promyshlennost'*, 2008, No. 8, pp. 16-19. (In Russian).

17. Veselov I.V., Mayorov G.P., Chistov M.P. The trend to create high-safety tires. *Problemy shin i rezinokordnykh kompozitov. Sbornik dokladov 18 simpoziuma (mezhdunarodnoy konferentsii)* [Problems of tires and rubber-composites. Collection of reports 18 symposiums (international conference)]. Vol.1. Moscow, NIISHP, 2007, pp. 96-121. (In Russian).

18. Belkin A.E., Boltyrov A.A., Veselov I.V., Sdobnov K.S. Analysis of the stress state of the petal-type inner supports for high-safety tires. *Problemy shin i rezinokordnykh kompozitov. Sbornik dokladov 20 simpoziuma (mezhdunarodnoj konferentsii)* [Problems of tires and rubber-composites. Collection of reports 20 symposiums (international conference)]. Vol.2. Moscow, NIISHP, 2009, pp. 194-201. (In Russian).



ров, М.П. Чистов // Проблемы шин и резинокордных композитов. Сб. докл. 18 симп. (международ. конф.). – Т.1. – М.: НТЦ «НИИШП», 2007. – С. 96-121.

18. Белкин, А.Е. Анализ напряжённого состояния внутренних опор лепесткового типа для безопасных шин / А.Е. Белкин, А.А. Болтыров, И.В. Веселов, К.С. Сдобнов // Проблемы шин и резинокордных композитов. Сб. докл. 20 симп. (международ. конф.). – Т.1. – М.: НТЦ «НИИШП», 2009. – С. 104-111.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010611131. Расчёт колебаний автомобиля с безопасными пневматическими шинами с упругими опорами при движении по неровной дороге (SafeTyre v.1.0) / Мазур В.В., рег. 08.02.2010.

20. Мазур, В.В. Динамическая модель колебательной системы эквивалентной машине с боестойкими колёсами при движении по дорогам с неровными поверхностями / В.В. Мазур // Вестник Академии военных наук. – 2013. – № 4. – С. 105-110.

21. Мазур, В.В. Колебания колёсной машины с боестойкими колёсами при её движении по дорогам с неровными поверхностями / В.В. Мазур, М.А. Мазур // Автомобильная промышленность. – 2014. – № 6. – С. 13-17.

22. Мазур, В.В. Математическая модель колебательной системы подвески транспортного средства с поврежденной пневматической шиной / В.В. Мазур // Автотранспортное предприятие. – 2009. – № 1. – С. 44-47.

23. ОСТ 37.001.252–82 Автотранспортные средства. Методы определения основных параметров, влияющих на плавность хода. – М.: НАМИ, 1984. – 60 с.

24. Рыков, С.П. Основы теории неупругого сопротивления в пневматических шинах с приложениями / С.П. Рыков. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Лань», 2017. – 440 с.

25. Рыков, С.П. Исследования выходных характеристик пневматических шин. Поглощающая способность / С.П. Рыков, В.Н. Тарасюк // Системы. Методы. Технологии.

*narodnoj konferentsii) [Problems of tires and rubber-composites. Collection of reports 20 symposiums (international conference)]. Vol.1. Moscow, NIISHP, 2009, pp. 104-111. (In Russian).*

19. Mazur V.V. *Raschyot kolebaniy avtomobilya s bezopasnymi pnevmaticheskimi shinami s uprugimi oporami pri dvizhenii po nerovnoy doroge SafeTyre v.1.0. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM [Calculation of vehicle vibrations with high-safety pneumatic tires with spring supports when driving on an uneven road SafeTyre v.1.0. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2010611131, 2010. (In Russian).*

20. Mazur V.V. Dynamic model of a vibration system equivalent to a car with fighting resistant wheels when driving on roads with uneven surfaces. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2013, No. 4, pp. 105-110. (In Russian).

21. Mazur V.V., Mazur M.A. Vibrations of a wheeled vehicle with fighting resistant wheels when driving on roads with uneven surfaces. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2014, No. 6, pp. 13-17. (In Russian).

22. Mazur V.V. Mathematical model of the vibration system of the vehicle suspension with a damaged pneumatic tire. *Avtotransportnoe predpriyatie*, 2009, No 1, pp. 44-47. (In Russian).

23. OST 37.001.252-82 *Motor vehicles. Methods for determining the basic parameters affecting smooth running.* Moscow, NAMI, 1984. 60 p. (In Russian).

24. Rykov S.P. *Osnovy teorii neuprugogo soprotivleniya v pnevmaticheskikh shinah s prilozheniyami [Fundamentals of the theory of non-spring resistance in pneumatic tires with applications].* St. Petersburg, Lan, 2017. 488 p. (In Russian).

25. Rykov S.P., Tarasyuk V.N. Studies of the output characteristics of pneumatic tires. Absorption capacity. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2010, No. 2 (6), pp. 19-30. (In Russian).

26. Mazur V.V. Experimental evaluation of

– 2010. – № 2 (6). – С. 19-30.

26. Мазур, В.В. Экспериментальная оценка упругих и демпфирующих свойств колёс повышенной безопасности / В.В. Мазур // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. - 2019. – № 1. - С. 95-104.

27. ОСТ 37.001.291–84. Автотранспортные средства. Технические нормы плавности хода. - М.: НАМИ, 1985. – 7 с.

28. ОСТ 37.001.275–84. Автотранспортные средства. Методы испытаний на плавность хода. - М.: НАМИ, 1985. – 12 с.

29. Мазур, В.В. Экспериментальная оценка плавности хода легкового автомобиля с колёсами повышенной безопасности без избыточного давления воздуха в одной из пневматических шин / В.В. Мазур // Транспорт: наука, техника, управление. – 2015. – № 4. – С. 40-43.

30. ГОСТ 12.1.012–90. Система стандартов безопасности труда. Вибрационная безопасность. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2006. – 30 с.

† the spring and damping properties of the high-  
† safety wheels. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik*  
† *Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*,  
† 2019, No. 1, pp. 95-104. (In Russian).

† 27. OST 37.001.291–84 *Motor vehicles.*  
† *Technical norms of smooth running.* Moscow,  
† NAMI, 1985. 7 p. (In Russian).

† 28. OST 37.001.275–84 *Motor vehicles.*  
† *Test methods for smooth running.* Moscow,  
† NAMI, 1985. 12 p. (In Russian).

† 29. Mazur V.V. Experimental evaluation of  
† the smooth running of the car with high-safety  
† wheels without excessive air pressure in one of  
† the pneumatic tires. *Transport: nauka.*  
† *tekhnika. upravleniye*, 2015, No. 4, pp. 40-43.  
† (In Russian).

† 30. GOST 12.1.012–90 *Occupational*  
† *safety standards system. Vibration safety. Gen-*  
† *eral requirements.* Moscow, Standardinform,  
† 2006. 30 p. (In Russian).