

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОЛЕСНЫХ МАШИН ДЛЯ АНАЛИЗА ИХ ПРОХОДИМОСТИ

И. В. Чичекин, Я. Ю. Левенков

Представлены разработанные динамические модели двухосного автомобиля и модель нелинейно деформируемого грунта. Приведены результаты расчетов по оценке показателей проходимости колесной машины в зависимости от физического состояния грунта и его поверхности.

Ключевые слова: динамическая модель, колесная машина, модель деформируемости грунта, оценка и показатели проходимости, динамические нагрузки, ровный и неровный грунт, влажность грунта, среднеквадратические виброускорения.

Введение

Современные автомобили проектируются с помощью компьютерных систем автоматизированного проектирования, важнейшим элементом которых является разработка программных средств анализа нагружения элементов конструкции колесных машин (КМ), связанных с динамикой. Таким образом, в основе реализации всех этапов компьютерного проектирования лежит разработка динамических моделей, задача которых – отражать реальные процессы, происходящие в этих элементах конструкции. Анализ многочисленных исследований показывает, что в области проектирования и изучения процессов движения и взаимодействия механической системы «колесная машина – дорожно-грунтовые условия» уже существует много моделей и подробно разработаны аналитические методы оценки их эффективности и применимости для частных случаев движения – по неровным твердым поверхностям. Если эту задачу решать в общем виде, то необходимо дополнительно провести моделирование деформируемости грунта с учетом нелинейности его характеристик.

Также необходимо отметить, что современное производство требует сокращения сроков проектирования и доводки новой техники и включает высокие затраты на проведение экспериментальных исследований. В результате роль расчетных методов, связанных с моделированием реальных процессов взаимодействия, является определяющей при подготовке производства современных образцов внедорожных колесных машин. В данном случае учитывается взаимовлияние двух систем «колесная машина – деформируемый грунт», обладающих существенно нелинейными характеристиками. Разработка таких методов может оказать большое влияние на выбор основных параметров конструкции КМ и обеспечить высокую эффективность применения транспортных средств высокой проходимости в целом.

В то же время практика показывает, что за счет динамического нагружения от неровности дороги и изменяющихся во времени деформативных свойств грунта, дополнительные нагрузки могут превышать статические более чем на 100%. Методик, алгоритмов и программного

обеспечения, позволяющих проводить анализ в условиях динамического нагружения системы «колесная машина – деформируемый неровный грунт», не существует.

Таким образом, рассматриваемая задача создания, выбора и исследования расчетных динамических схем, позволяющих моделировать реальные условия нагружения деталей и узлов поддрессоренных и неподдрессоренных масс колесных полноприводных машин с учетом условий движения по неровным деформируемым поверхностям актуальна.

Основные принципы моделирования взаимодействия системы «колесная машина – деформируемый грунт»

Поставленная задача разработки пространственной динамической модели движения колесной машины существенно усложняет проблему оценки взаимодействия рассматриваемых систем и требует серьезных исследований.

По результатам проведенного анализа [1] для решения задач, поставленных перед исследованием, выбираются следующие основные положения.

Деформативные свойства мягких грунтов оцениваются с помощью метода, разработанного проф. Агейкиным Я.С. Вертикальные и сдвиговые деформации грунта определяются его физико-механическим состоянием и зависят от типа, влажности W и плотности ρ_c . В зависимости от физического состояния грунта рассчитываются модуль деформации E , угол внутреннего трения φ_0 , внутренне сцепление в грунте c_0 , задается толщина мягкого слоя H_r [1].

Для проведения анализа взаимодействия шины с грунтом разрабатывается математическая модель грунта в виде упруго-вязкопластичного или вязкопластичного тела (схемы Шведова или Бингама) [2].

Рассматриваются опорно-временные и тягово-сцепные свойства КМ, определяющие ее проходимость.

Колесная машина рассматривается как динамическая модель, состоящая из колеблющихся поддрессоренных M и неподдрессоренных m масс, связанных упругими (c_{II} и c_{III}) и демпфирующими (k_{II} и k_{III}) элементами [1, 3, 4]. В этих моделях c_{II} и c_{III} – жесткость рессоры и шины, k_{II} и k_{III} – коэффициенты демпфирования амортизатора и шины соответственно.

Статистический микропрофиль дороги оценивается спектральной плотностью $S_q(\theta)$ [4]. Это случайная функция, которая получена при следующих допущениях: стационарна и эргодична; ординаты микропрофиля q подчиняются нормальному закону распределения; длины неровностей ограничены по верхнему и нижнему пределам; микропрофиль меняется случайным образом только в вертикальной, продольной и поперечной плоскостях дороги. Спектральная плотность задается зависимостью

$$S_q(\theta) = A \theta^{-b},$$

где A , b – коэффициенты спектральной плотности, определяющие тип микропрофиля; θ – путевая частота, рад/м.

При выборе принципиальных конструкторских решений концепции подвески критерий «плавность хода» предлагается оценивать по эквивалентным среднеквадратическим виброускорениям в точках кузова над осями колес [4].

Динамические модели колебательных систем двухосных колесных машин с учетом деформируемости неровного грунта

Разработаны структурные схемы пяти динамических моделей колебательных систем двухосных колесных машин (рис. 1), движущихся по неровному деформируемому грунту [5, 6].

Основным отличием этих комплексных моделей «колесная машина – неровная опорная поверхность» является введение в рассматриваемую колебательную систему модели неровного нелинейного деформируемого грунта. Предлагается учитывать деформативные свойства грунта с помощью не только его механических параметров E , φ_0 , c_0 и H_r , но и с помощью физических характеристик – жесткости c_r и коэффициента демпфирования грунта k_r . Также из механики грунтов известно [2], что грунты обладают релаксационными свойствами. Поэтому в разработанной общей модели деформируемости грунта учитываются релаксационные процессы, протекающие по известным моделям Шведова и Бингама [2]. Деформативные свойства грунта оцениваются с помощью графической зависимости $P_z = f(z)$ (рис. 2), где P_z – нормальная нагрузка, приходящаяся на ось единичного колеса, z – глубина колеи (или нормальная деформация грунта под действием штампа, имитирующего колесо). Релаксационные свойства грунта (для грунтовых

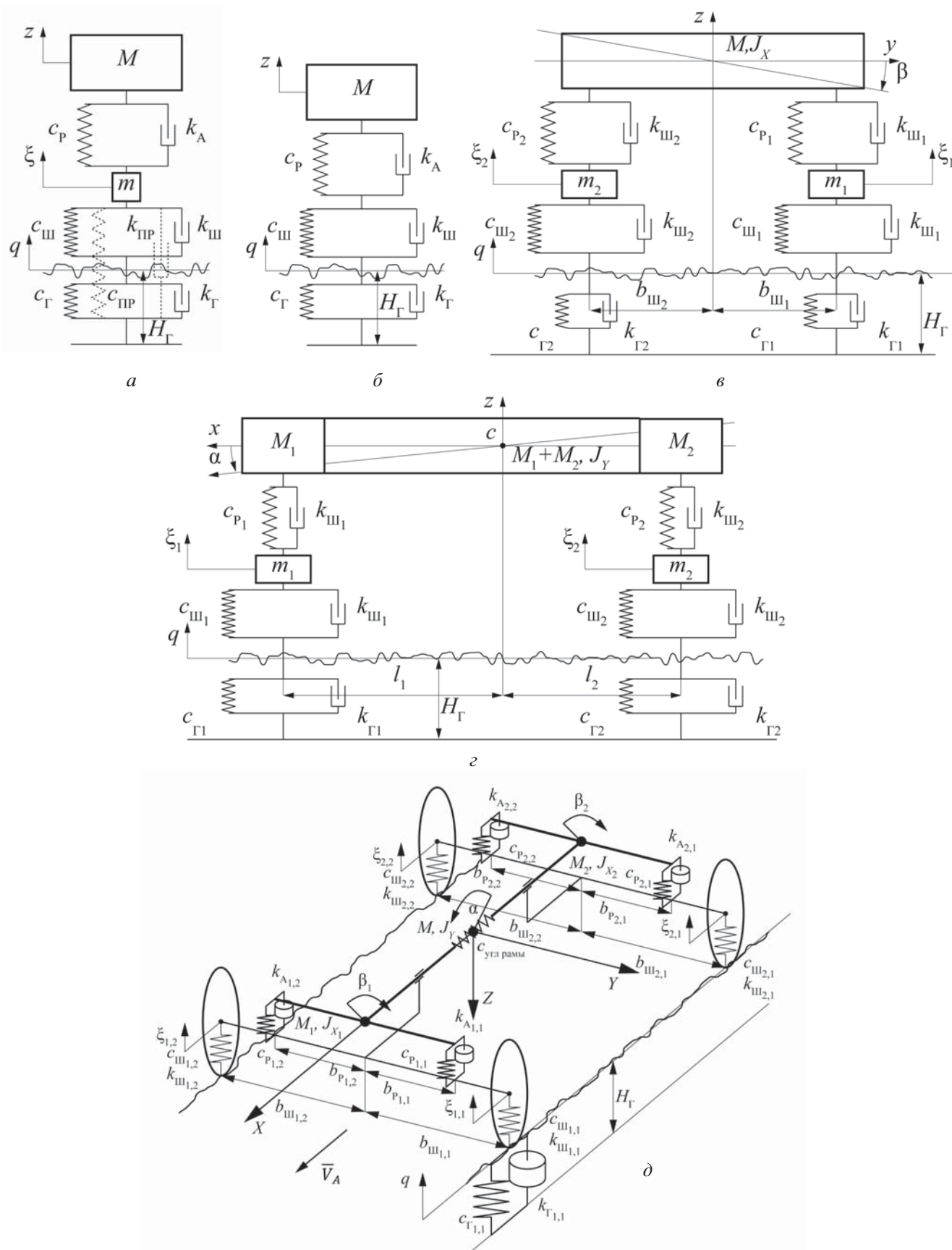


Рис. 1. Варианты динамических моделей:

а – двухмассовая M, t (схема 1); б – одномассовая M (схема 2); в – трехмассовая M, t_p, t_x (схема 3);

г – трехмассовая M, t_p, t_x (схема 4); д – семимассовая $M, M_p, M_x, t_p, t_x, t_y, t_z$ (схема 5)

$J_x, J_y, J_{x^p}, J_{x^l}$ – моменты инерции относительно соответствующих осей

условий России это, как правило, глины, суглинки, илы – рассматривается модель упруговязкопластичного тела) можно учитывать с помощью коэффициента ξ_1 . С помощью этого же коэффициента учитывается остаточная часть упругой деформации грунта, которая влияет на глубину колеи не в момент нагружения и взаимодействия шины с грунтом, а после снятия нагрузки в пятне контакта шины с грунтом, т.е. после прохода колеса. Таким образом, после прохода очередного колеса по схеме «след в след» уточняется глубина мягкого слоя грунта H_r для оценки взаимных деформаций грунта и колес рассматриваемой колесной машины.

Наиболее полно реальность динамической системы колебаний колесной машины представлена в пространственной схеме 5 на рис. 1. Модель имеет восемь степеней свободы. Для каждой динамической модели составлены системы связанных дифференциальных уравнений, решение систем нелинейных уравнений проводится с помощью преобразований Лапласа. В общем виде уравнение колебаний для пространственной схемы (см. рис. 1, д) можно представить в виде:

$$\mathbf{A}(p) \cdot \begin{bmatrix} z_c(p) \\ \alpha(p) \\ \beta_1(p) \\ \beta_2(p) \\ \xi_{1,1}(p) \\ \xi_{1,2}(p) \\ \xi_{2,1}(p) \\ \xi_{2,2}(p) \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{q_0} = \mathbf{B}(p) \cdot \begin{bmatrix} q_{1,1}(p) \\ q_{1,2}(p) \\ q_{2,1}(p) \\ q_{2,2}(p) \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{A}(p)$ – матрица параметров автомобиля; $\mathbf{B}(p)$ – матрица возмущений; p – частота возмущающей силы после преобразования Лапласа; z_c – вертикальные перемещение подрессоренной массы M ; α – угол наклона (дифферента) подрессоренной части автомобиля в продольной плоскости; β_1 и β_2 – угол наклона (крена) подрессоренной части автомобиля в поперечной плоскости, находящейся над передней и задней осями, соответственно; $\xi_{i,j}$ – перемещение неподдресоренных масс m ; q_0 – половина высоты неровности; $q_{i,j}$ – перемещение контактной поверхности колеса i -й оси j -го борта.

Следующим шагом в разработке динамической модели колесной двухосной машины является анализ эффективности рассматри-

ваемой схемы и выбор области ее применения в исследованиях по оценке взаимодействия шина – грунт.

На рисунках 3–9 представлены примеры результатов расчетов для всех пяти моделей. Проведена оценка влияния скорости колесной машины V_a на величину дополнительных динамических нагрузок при движении по неровному ($A=10^{-3}$) деформируемому грунту различной влажности (рис. 3). В одном и том же интервале изменяемых скоростей движения 10–50 км/ч для левого и правого колес автомобиля минимальные и максимальные дополнительные динамические нагрузки отличаются в 4,5 раза для моделей 2 и 5. При этом для модели 2 ΔP увеличивается на 25% и 100% при влажностях грунта $W=70\%$ и $W=90\%$, разность

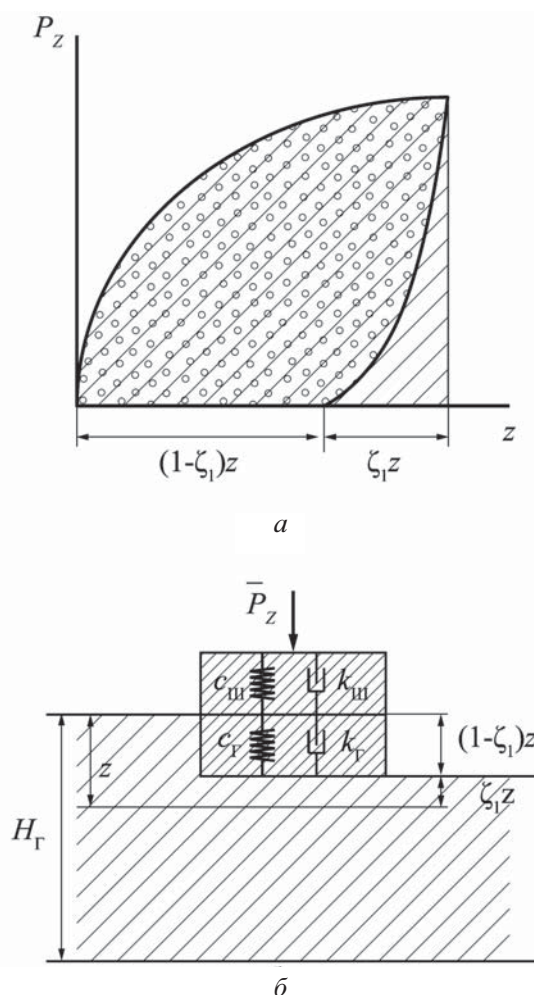


Рис. 2. Влияние обратимых деформаций:

- а – графическая зависимость для оценки деформативных свойств грунта;
б – физическая модель для определения приведенных коэффициентов жесткости $c_{\Gamma_{ш}}$ и демпфирования $k_{\Gamma_{ш}}$ в системе «шина – грунт»

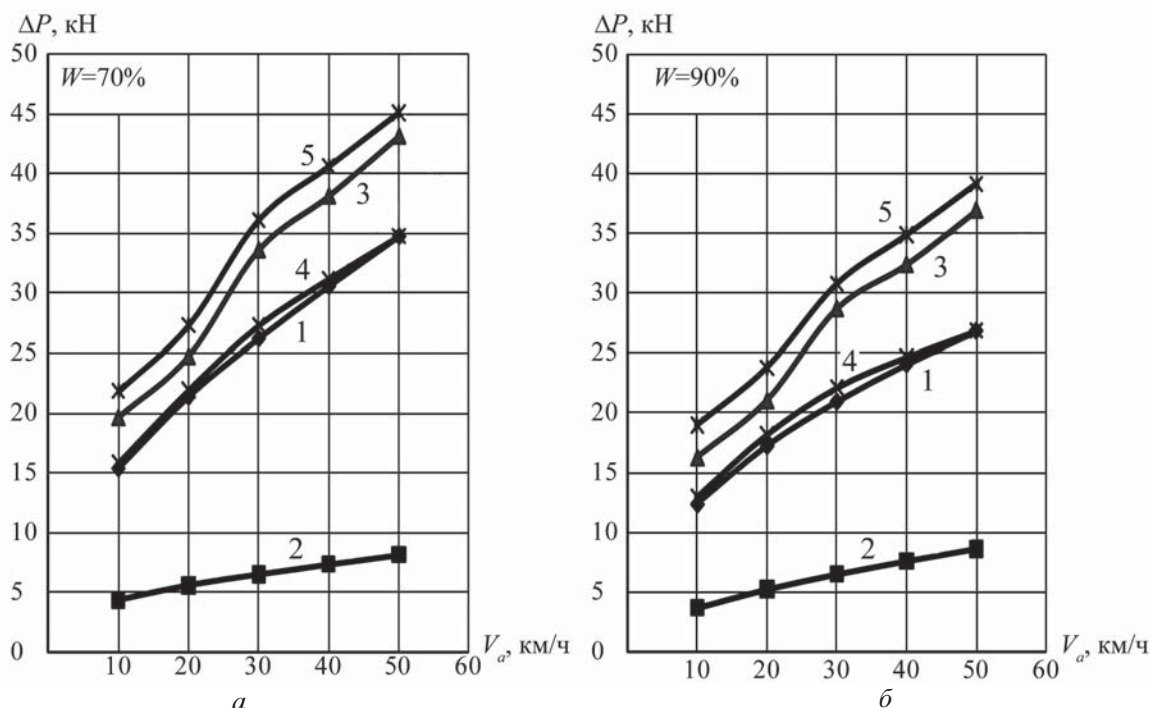


Рис. 3. Влияние скорости колесной машины на величину дополнительных динамических нагрузок при движении по неровному деформируемому грунту различной влажности ($A=10^{-3}$; 1–5 – номера динамических моделей):

а – при относительной влажности грунта $W=70\%$; б – при относительной влажности грунта $W=90\%$.

максимальных значений ΔP при $V_a = 50$ км/ч для одной и той же схемы 5 около 13%.

На рисунке 4 приведено влияние задаваемой неровности грунта $A=10^{-3}$ или $A=10^{-4}$ на величину дополнительных динамических нагрузок в том же интервале изменения скоростей движения колесной машины. В зависимости от выбора динамической модели (см. рис. 4) расчетные значения дополнительных динамических нагрузок для простой модели 2 и сложной пространственной модели 5 могут отличаться в 9 раз при относительном росте на 230% и 100% в рассматриваемом диапазоне скоростей движения по грунту с разной степенью неровности.

С помощью рис. 5 можно оценить, как выбор типа динамической модели влияет на результаты расчетов по оценке глубины колеи z , определяющей сопротивление качению в заданных дорожно-грунтовых условиях с учетом изменения физико-механических характеристик грунта, зависящих от влажности. При влажности грунта $W=70\%$ применение того или иного типа динамических моделей, оценивающих влияние колебательных процессов, приводит к противоречивым результатам: для модели 2 глубина колеи с ростом скорости движения убывает вплоть до нулевого значения. Для модели 5

при малых скоростях движения глубина колеи $z = 15$ см, и она незначительно уменьшается с увеличением скорости (на 10%).

На рисунке 6 представлены графики зависимости глубины колеи z для переднего левого колеса от скорости движения КМ, построенные для тех же дорожно-грунтовых условий, на ровной и неровной грунтовой поверхностях. Наибольшие значения z наблюдаются на переувлажненном грунте $W = 90\%$ при минимальной скорости движения ($z = 0,32$ м). На ровном грунте, при движении без учета колебаний, глубина колеи меньше, чем при учете динамических нагрузок (в среднем $z = 0,2$ м).

На рисунке 7 приведены характеристики плавности хода КМ при движении на неровной твердой поверхности. На рисунке 8 показаны характеристики плавности хода для твердой и грунтовой поверхностей с различной влажностью для варианта 5 динамической модели. По этим характеристикам определяются максимальные допустимые скорости, ограничиваемые плавностью хода. Допустимые среднеквадратические значения виброускорения при кратковременном движении – 4 м/с^2 , тогда допустимые скорости движения для неровностей $A=10^{-3}$ на твердой поверхности – 8 км/ч (см. рис. 8), на мягких

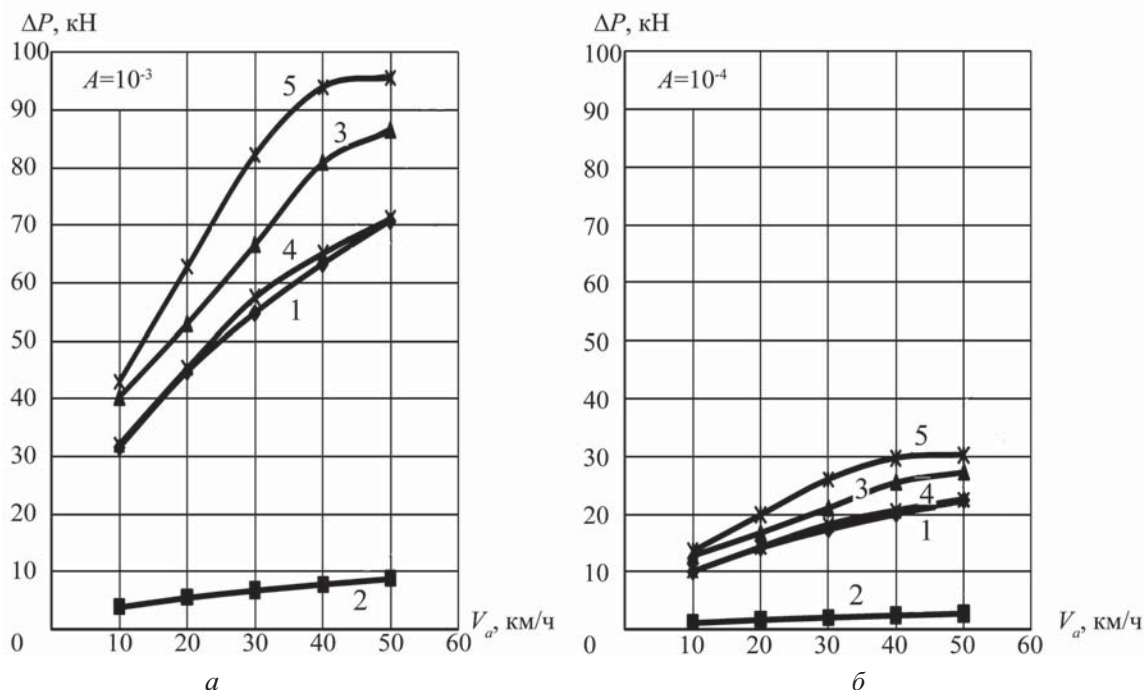


Рис. 4. Влияние степени неровности грунта на величину дополнительных динамических нагрузок: а – при степени неровности грунта $A=10^{-3}$; б – при степени неровности грунта $A=10^{-4}$.

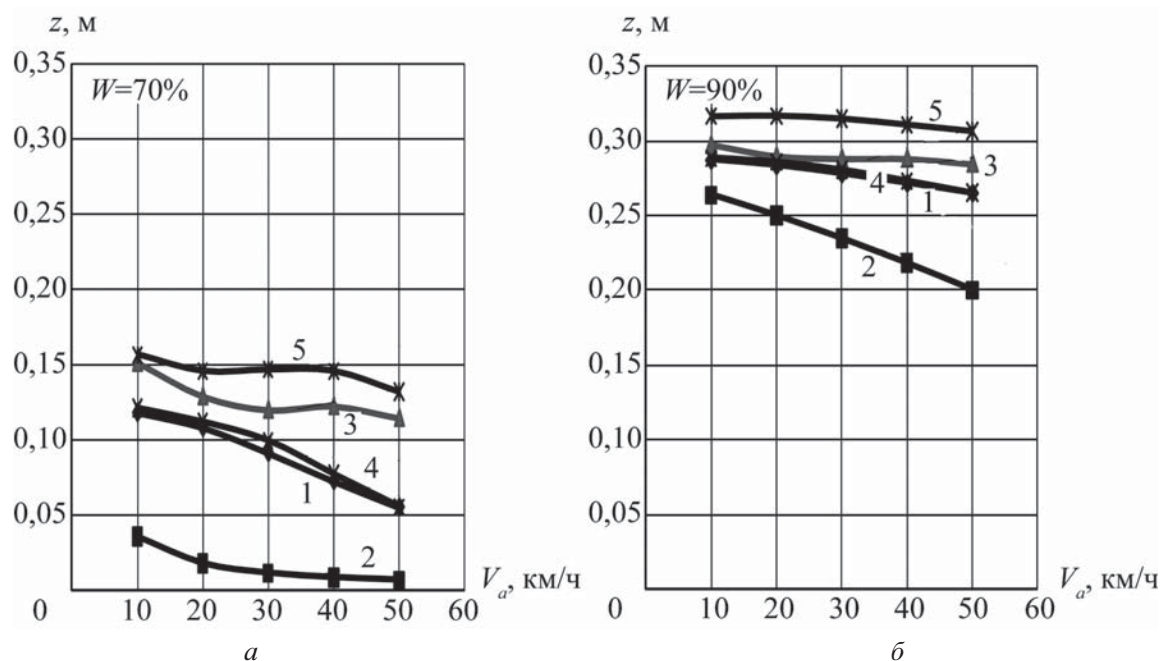


Рис. 5. Влияние влажности грунта на колеобразование при движении по деформируемой поверхности ($A=10^{-3}$):

а – при относительной влажности грунта $W=70\%$;

б – при относительной влажности грунта $W=90\%$.

грунтах – 10–22 км/ч по схеме 1; 17–19 км/ч – по схеме 4; 16–18 км/ч – по схеме 5 (см. рис. 8).

Для оценки проходимости, ограниченной дорожным просветом (задевание корпуса о грунт), на рис. 9 приведены зависимости глубины колеи z от влажности грунта, рассчитан-

ные для четырех моделей. Если вести расчеты по моделям 1–4, КМ движется без задевания корпусом грунта во всем диапазоне рассматриваемых дорожно-грунтовых условий. Если считать по модели 5, то при граничных значениях $W = 90\%$ возможен контакт корпуса КМ и грунта.

Разработанные модели позволяют:

- определять влияние на показатели проходимости колесной машины соотношения масс поддресоренных и неподдресоренных частей (M и m), жесткости подвески, шины и коэффициента сопротивления амортизатора ($c_{\text{п}}, c_{\text{ш}}, k_{\text{а}}$); типа подвески и направляющего устройства; типа и размеров шин; давления воздуха в шинах ($p_{\text{ш}}$); размеров базы, шинной и рессорной колеи;

- рассчитывать количественные значения параметров проходимости КМ [7]: дополнительных динамических нагрузок от колебаний КМ ΔP , действующих через шины на грунт; глубины колеи z и деформации шин h ; уплотнение грунта после прохода каждого колеса $\rho_{\text{с}}$; коэффициенты сопротивления качению от деформации грунта и шины f ; коэффициент свободной силы тяги $\Psi_{\text{т}}$; вероятность отрыва колес от

грунта; вероятность задевания корпуса (моста) за грунт и т.д.;

- рассчитывать количественные значения критериев плавности хода и прочности элементов КМ: среднеквадратические виброускорения $\ddot{z}_{A_{i,j}}$ и перемещения $z_{A_{i,j}}$ любой точки кузова; степени изменения микропрофиля после прохода колес первой оси $S_q(v)_{2,j}$; поперечно- и продольно-угловые ускорения $\ddot{\alpha}$, $\ddot{\beta}_1$ и $\ddot{\beta}_2$; деформации упругих элементов и вероятности пробоя подвески f_p ; динамические нагрузки на несущую систему $\Delta P_{\text{дин}}$; перекрещивание передней и задней осей; угол закручивания рамы $\beta_{\text{рм}}$ и перекос лонжеронов $\alpha_{\text{л}}$.

Анализ результатов расчетов показывает, что наиболее существенное влияние на величину динамических нагрузок оказывают колебания неподдресоренных масс.

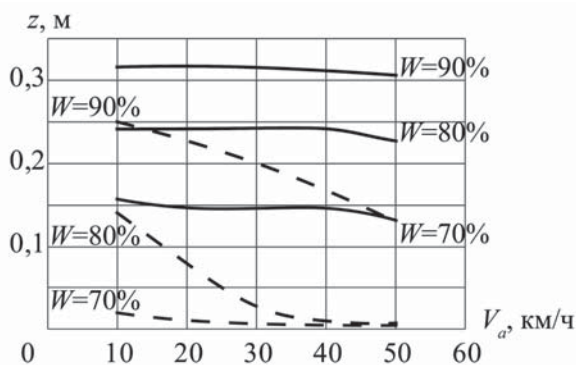


Рис. 6. Зависимость глубины колеи от скорости КМ при движении по ровному и неровному грунтам:

— неровная поверхность
-- -- ровная поверхность

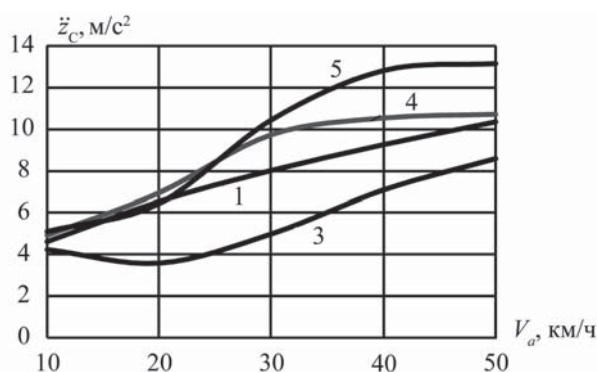


Рис. 7. Характеристики плавности хода на недеформируемой поверхности при $A=10^{-3}$ для динамических моделей:

1 – двухмассовая M, m (схема 1); 3 – трехмассовая M, m, t_2 (схема 3); 4 – трехмассовая M, m, t_2 (схема 4); 5 – семимассовая $M, M_p, M_2, t_p, t_2, t_3, t_4$ (схема 5)

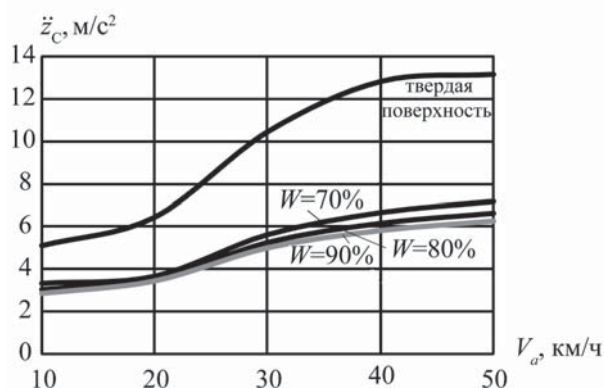


Рис. 8. Характеристики плавности хода на твердой и деформируемой поверхностях при $A=10^{-3}$ (пространственная динамическая модель - 5)

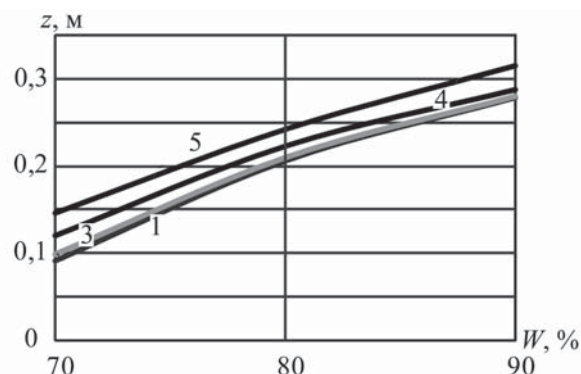


Рис. 9. Зависимость глубины колеи от влажности грунта при $A=10^{-3}$ для динамических моделей: 1 – двухмассовая M, m (схема 1); 2 – одномассовая M (схема 2); 3 – трехмассовая M, m, t_2 (схема 3); 4 – трехмассовая M, m, t_2 (схема 4); 5 – семимассовая $M, M_p, M_2, t_p, t_2, t_3, t_4$ (схема 5)

Поперечно-угловые колебания оказывают большое влияние на значения ΔP и их необходимо учитывать, особенно при движении автомобиля по переувлажненным грунтам.

При движении по поверхности с неровностями больше $A=10^{-3}$ в расчетах следует учитывать поперечно-угловые и продольно-угловые колебания (схемы 3 и 5).

Наибольшее влияние (более 50%) на динамические нагрузки от колес на грунт и глубину колеи оказывает масса неподрессоренных частей.

Заключение

Разработанные динамические модели колесных машин позволяют оценивать колебательные процессы внутри механической системы во взаимосвязи с деформациями неровного мягкого грунта, механические характеристики которого нелинейны и зависят от его физического состояния.

Обобщено математическое описание колебаний многомассовых динамических систем на деформируемом неровном грунте. Появилась возможность проводить расчет по определению дополнительных динамических нагрузок, действующих на каждое колесо колесной машины. Адекватность пространственной динамической модели подтверждена экспериментальными исследованиями как для одиночного активного колеса, так и для двухосного полноприводного автомобиля.

Выявлено существенное влияние на параметры колебаний поддрессоренных и неподрессоренных масс колесной машины жесткостных и демпфирующих свойств деформируемой опорной поверхности.

Определены области применения разработанных динамических моделей. При определении дополнительных динамических нагрузок, возникающих в результате моделирования движения по микронеровностям, высота которых больше 5 см, рекомендуется выбирать динамические системы, учитывающие поперечно-угловые колебания (схемы 3 и 5). При расчетах по пространственной динамической модели (схема 5)

динамические нагрузки увеличиваются на 25% относительно плоской модели (схема 4).

Проведенные исследования позволяют существенно уточнить методику оценки нагруженности деталей шасси автомобиля и повысить эффективность расчетных методов при выборе оптимальных параметров системы поддрессирования и колесного движителя транспортных средств высокой проходимости.

Список литературы

1. Вольская Н.С., Агейкин Я.С. Динамика колесной машины при движении по неровной грунтовой поверхности. – М.: МГИУ, 2003. – 124 с.
2. Орнатский Н.В. Механика грунтов. – М.: Изд-во Московского университета, 1962. – 446 с.
3. Вольская Н.С., Агейкин Я.С. Параметры ходовой части, проходимость и плавность хода // Автомобильная промышленность, 2005. № 9. С. 20–23.
4. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля. – М.: Машиностроение, 1972. – 392 с.
5. Чичекин И.В. Математические модели динамики многоосной колесной машины при движении по неровной твердой дороге // сб. науч. докл. VI Междунар. науч.-практ. конф. ЮНЕСКО. «Участие молодых ученых, инженеров и педагогов, в разработке и реализации инновационных технологий». – М.: МГИУ, 2006. С. 40–45.
6. Чичекин И.В., Агейкин Я.С., Вольская Н.С. Моделирование взаимодействия колесной машины с неровной грунтовой поверхностью. // Матер. конф. «Проектирование колесных машин», докл. на конф. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – С. 121–130.
7. Чичекин И.В., Вольская Н.С. Методика расчета показателей проходимости колесной машины при движении по неровным грунтовым поверхностям // Матер. Междунар. симпозиума, посвященного 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана. Проектирование колесных машин. – М., 2005. С. 38–44.

Материал поступил в редакцию 19.09.2010

**ЧИЧЕКИН
Илья
Викторович**

Е-mail: hiv@mail.ru
Тел. +7 (495) 675-62-42

Доцент кафедры автомобилей и двигателей ГОУ МГИУ. Область научных интересов – пространственные динамические модели колесных машин для анализа их проходимости по различным грунтам. Автор 17 научных и учебно-методических работ.

**ЛЕВЕНКОВ
Ярослав
Юрьевич**

Е-mail: lique87@mail.ru
Тел. +7 (495) 355-76-16

Ассистент кафедры автомобилей и двигателей ГОУ МГИУ. Область научных интересов – создание математических моделей взаимодействия колесного движителя с грунтовой поверхностью для анализа параметров проходимости. Автор 5 научных и учебно-методических работ.