

## Новые методы расчета проходимости колесных машин на стадии проектирования

# 12, декабрь 2016

Вольская Н. С.<sup>1,\*</sup>, Левенков Я. Ю.<sup>1</sup>, Чичекин И. В.<sup>1</sup>, Захаров А. Ю.<sup>1</sup>

УДК: 629.33

<sup>1</sup>Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

\*[volskaja52@mail.ru](mailto:volskaja52@mail.ru)

### Введение

При разработке концепции транспортного средства высокой проходимости (ТСВП) существует необходимость прогнозирования дорожно-грунтовых условий (ДГУ) предполагаемого района эксплуатации. Известно, что деформативные и сцепные свойства опорной поверхности во многом определяют выбор типа движителя, колесную формулу, и, следовательно, тип трансмиссии, формулу управления, характеристики подвески, обеспечивающие необходимую проходимость при движении на местности. Специалистами в области проходимости проведено большое количество исследований, в том числе и экспериментальных, цель которых – прогнозирование эффективности вновь разрабатываемых транспортных средств (ТС), в том числе колесных машин (КМ), на стадии проектирования. В России широко известны работы по решению проблемы прогнозирования взаимовлияния ДГУ и технических характеристик КМ с оценкой показателей эффективности вновь создаваемых ТСВП [1].

Можно отметить, что развитие исследований в области проходимости имеет свою историю, есть систематизированная база решенных задач, но главная проблема – прогнозирование уровня проходимости вновь создаваемой КМ с помощью надежного расчетного метода еще далеко не полностью решена. Опыт создания макетных образцов ТСВП и их испытание в различных ДГУ лишь частично решает проблему. Представляется, что последовательное решение отдельных взаимосвязанных задач, поставленных внутри одной проблемы, с общей методологией наиболее перспективно. Необходимо отметить, что основой этого направления являются широко известные работы профессора Я.С. Агейкина [1]. На базе этих работ появилась возможность разработать современную систему оценки прогнозирования физико-механического состояния различных типов грунтов, физические и математические модели механических систем КМ, модели взаимодействия «шина-грунт», вероятностные расчетные маршруты для оценки эффективности движения ТС и т.д. На наш взгляд, сейчас разработано и есть на рынке математического обеспечения много готового программного продукта, с помощью которого можно существенно сокра-

тить сроки проведения моделирования технических систем с проведением расчетов по оптимизации процесса выбора концепции ТС. Это программное обеспечение позволяет выйти на новый этап развития направления науки - проходимость ТС. Это этап моделирования сложных процессов, описывающих движение ТСВП в различных ДГУ с помощью новых пакетов прикладных программ. При этом конкретизируются отдельные модули системы «грунт-колесо (шина)-подвеска-кузов», разрабатываются их компьютерные модели, моделируется взаимодействие и определяется взаимовлияние параметров внутри этих модулей и их элементов.

Целью статьи является анализ основных результатов таких исследований и постановка новых, еще нерешенных задач по оценке проходимости КМ. Решение этих задач основывается на едином подходе к оценке физико-механического состояния грунта и его деформативных свойств.

В рассматриваемых работах [1 - 4] моделирование движения КМ и ее взаимодействие с опорной поверхностью базируется на основах механики грунтов, прикладной теории автомобиля, теории колебаний, теории вероятностей, теории случайных процессов и статистической динамики, математическом и физическом моделировании, методах решения систем линейных и нелинейных уравнений, инженерном эксперименте.

## **1. Метод расчета опорно-тяговых характеристик КМ в заданных дорожно-грунтовых условиях предполагаемого района эксплуатации**

Для решения рассматриваемой проблемы была разработана методика моделирования ДГУ в предполагаемом районе эксплуатации КМ. С основными материалами, на которых базируются результаты исследования представляемого метода можно ознакомиться в [1,2]. В основе метода лежат следующие основные положения:

1. Физико-механическое состояние грунта оценивается с помощью механических параметров, зависящих от типа грунта и его влажности [2]. Эти параметры характеризуют только грунт и не зависят от движителя автомобиля. В качестве таких характеристик выбраны: влажность  $W$ , объемная плотность грунта  $\rho$ , модуль деформации  $E$ , угол внутреннего трения  $\varphi_0$ , внутреннее сцепление в грунте  $c_0$ , толщина мягкого слоя  $H_{\Gamma}$ .

2. Оценка механических свойств грунтовой поверхности предполагаемого района эксплуатации ТС, основана на использовании физических характеристик грунтов, представленных в вероятностной форме; в качестве источников информации используются многолетние наблюдения на метеостанциях, топографические и почвенные карты, результаты натурных экспериментов.

3. Предложен метод вероятностной оценки эффективности движения многоосной КМ по эталонному расчетному маршруту, отражающему специфические ДГУ предполагаемого района эксплуатации ТС.

На первом этапе задача моделирования взаимодействия пневматического колеса с грунтом в системе «КМ-грунт» решается на базе модели проф. Я.С. Агейкина [1]. Была

разработана методика оценки взаимодействия колеса с грунтом, учитывающая скорость движения, действие нормальной, продольной и боковой сил, пригодная для колес со всеми известными типами шин. Предложен метод оценки взаимодействия многоосного колесного движителя с грунтовой поверхностью с учетом изменения физико-механических свойств грунта в результате прохода колес. Необходимо отметить, что глубина колеи и соответствующие ей потери определялись с учетом неровности опорной поверхности и изменяющейся нормальной нагрузки на колесо, что свидетельствует о переходе к оценке проходимости в динамической постановке решения рассматриваемой проблемы.

В качестве отдельной задачи необходимо выделить разработанную методику расчета параметров и критериев эффективности криволинейного движения многоосной КМ по деформируемому грунту, позволяющей оценивать ее поворотливость с возможностью изменения основных конструктивных решений: числа ведущих осей и их расстановку по базе, формулу управления, линейных и нелинейных характеристик распределительных механизмов в механической трансмиссии. Методика решения задачи о движении КМ по криволинейной траектории на деформируемом грунте была использована при оценке эффективности движения КМ на заданном маршруте.

Основные этапы, алгоритмы и методики решения задач вышеизложенного метода представлены в [2]. Результаты исследования можно сформулировать следующим образом – разработанные математические модели прямолинейного и криволинейного движения колесной машины по неровной грунтовой поверхности и полученные количественные значения влияния основных конструктивных параметров шасси на эффективность ТС позволяют определять оптимальные параметры ходовой части рассматриваемого ТС при проектировании и выбирать целесообразные рыночные модели колесных машин для использования в конкретных дорожно-грунтовых условиях. Таким образом существует метод, позволяющий проводить расчет опорно-тяговой проходимости многоосных колесных машин при их движении по естественным грунтовым поверхностям, отличающимся неоднородностью физико-механических свойств и неровностью поверхности, изменяющейся траекторией движения.

Выделим главные результаты глобального исследования [2], на базе которого проводится развитие научного направления «Проходимость колесной машины»:

1. Разработан новый вероятностный метод формирования баз данных по физико-механическим характеристикам грунтов конкретных регионов РФ.
2. Предложен новый вероятностный метод определения механических характеристик грунтов в зависимости от их влажности и плотности.
3. Разработана методика оценки деформации грунта при суммарном действии нормальной, продольной и боковой нагрузок, учитывающая влияние времени их действия и цикличности нагружения. Представлена зависимость изменения плотности грунта от количества нагружений.
4. Разработан метод оценки взаимодействия многоосного колесного движителя с ровным деформируемым грунтом, с использованием универсальной методики оценки взаи-

модействия колеса с грунтом с учетом скорости движения КМ, изменения инвариант грунта под колесом в зависимости от номера оси.

5. Экспериментально (проведением натурных испытаний в полевых условиях) проверена адекватность расчетных моделей оценки деформативных свойств грунта с помощью физико-механических характеристик совместно с оценкой проходимости полноприводных КМ. Разница расчетных и экспериментальных значений для четырех типов КМ по глубине колеи с учетом номера оси не превышает 10% , а по максимально возможной скорости движения 20% .

6. Разработана методика оценки проходимости многоосной КМ по неровной грунтовой поверхности, деформативные свойства которой заданы независимыми физико-механическими характеристиками. Эта методика может стать базовой при выборе оптимальных параметров КМ для конкретного региона использования.

7. Разработана методика, позволяющая на стадии проектирования, проводить оценку статической поворотливости многоосной колесной машины при криволинейном движении на грунте с учетом: типа механической трансмиссии с любыми линейными и нелинейными характеристиками механизмов в узловых точках; затрат энергии на боковой сдвиг шины относительно грунта, на боковое смятие грунта, на трение боковин шины о грунт, на дополнительное увеличение глубины колеи и на боковую деформацию шины.

8. Установлено влияние типа грунта и его физического состояния на показатели эффективности при криволинейном движении многоосной колесной машины [2].

9. Предложено оценивать эффективность КМ в районе предполагаемой эксплуатации с помощью расчетного эталонного маршрута. Разработана соответствующая методика. Участки маршрута с определенной относительной протяженностью подразделяются в зависимости от типа дорожно-грунтовой поверхности, степени неровности, пересеченности, параметров грунта. Каждый участок представляется статистическими характеристиками. Критерием эффективности КМ является средняя вероятностная скорость движения на каждом участке и вероятностная скорость движения на маршруте.

По результатам исследований [2] были выделены в отдельные, первостепенные - задачи, решение которых позволило бы существенно повысить уровень адекватности моделирования процессов взаимодействия модулей в системе «КМ-ДГУ». Результаты этих исследований представлены в п.п. 2 и 3.

Это исследования двух молодых ученых Чичекина И.В. [3] и Левенкова Я.Ю. [4], учеников профессоров Агейкина Я.С. и Вольской Н.С.

Слабым звеном в системном подходе решения рассматриваемой проблемы являлось отсутствие специального грунтового стенда для работы с активным колесом. Поэтому во МГИУ был спроектирован и построен стенд для проведения тонких экспериментов по оценке взаимодействия шины и грунта. Некоторые результаты этих практических исследований представлены в материалах статьи [5].

## **2. Разработка пространственной динамической модели процесса взаимодействия шин КМ с грунтовой поверхностью**

Как уже упоминалось выше - современные автомобили проектируются с помощью компьютерных систем автоматизированного проектирования. Важнейшим элементом этого процесса является разработка программных средств анализа нагружения элементов конструкции КМ связанных с динамикой. Таким образом в основе реализации всех этапов компьютерного проектирования лежит разработка динамических моделей, задача которых - отражать реальные процессы, протекающие в этих элементах конструкции. Анализ большого числа исследований показывает, что в области проектирования, изучения процессов движения и взаимодействия механической системы – «КМ – ДГУ» уже существует модели и разработаны аналитические методы оценки их эффективности и применимости для частного случая движения: движения по неровным, твердым поверхностям. Если эту задачу расширить и рассматривать в реальной полной постановке, необходимо дополнительно провести моделирование процесса деформируемости грунта с учетом нелинейности его характеристик и динамики его нагружения. Поставленная задача разработки пространственной динамической модели движения КМ существенно усложняется и требует серьезных исследований. Таким образом, роль расчетных методов, связанных с моделированием реальных процессов взаимодействия, в данном случае с учетом взаимовлияния двух систем «колесная машина – деформируемый грунт», обладающих существенно нелинейными характеристиками, является определяющей при подготовке производства современных образцов внедорожных КМ. Разработка таких методов может оказать большое влияние на выбор основных параметров конструкции и обеспечить высокую эффективность применения ТСВП в целом [3].

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.

Поэтому решение новой задачи - создание, выбор и исследование 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 было крайне актуально.

Для реализации возможности адекватного моделирования механической системы «КМ-ДГУ» в условиях движения по неровной деформируемой поверхности, задаваемой физико-механическими нелинейными характеристиками, были разработаны [3]:

1. Пространственные динамические модели полноприводных КМ, движущихся по неровному деформируемому грунту.

2. Методика выбора расчетной динамической модели полноприводной КМ, структура которой определяется ДГУ предполагаемого района эксплуатации.

3. Методика расчёта основных показателей проходимости и плавности хода КМ с учётом динамических нагрузок и деформации грунта.

Для решения задач, поставленных перед исследованием, были выбраны:

1. Математическая модель грунта как упруго-вязкопластичного или вязкопластичного тела (схемы Шведова и Бингама). Рассматривались связные и несвязные типы грунтов.

2. Пространственная динамическая модель КМ, состоящая из колеблющихся подрессоренных –  $M$  и непрорессоренных –  $m$  масс, связанных упругими  $c_p$  и  $c_{ш}$  и демпфирующими  $k_A$  и  $k_{ш}$  элементами (рис.1).

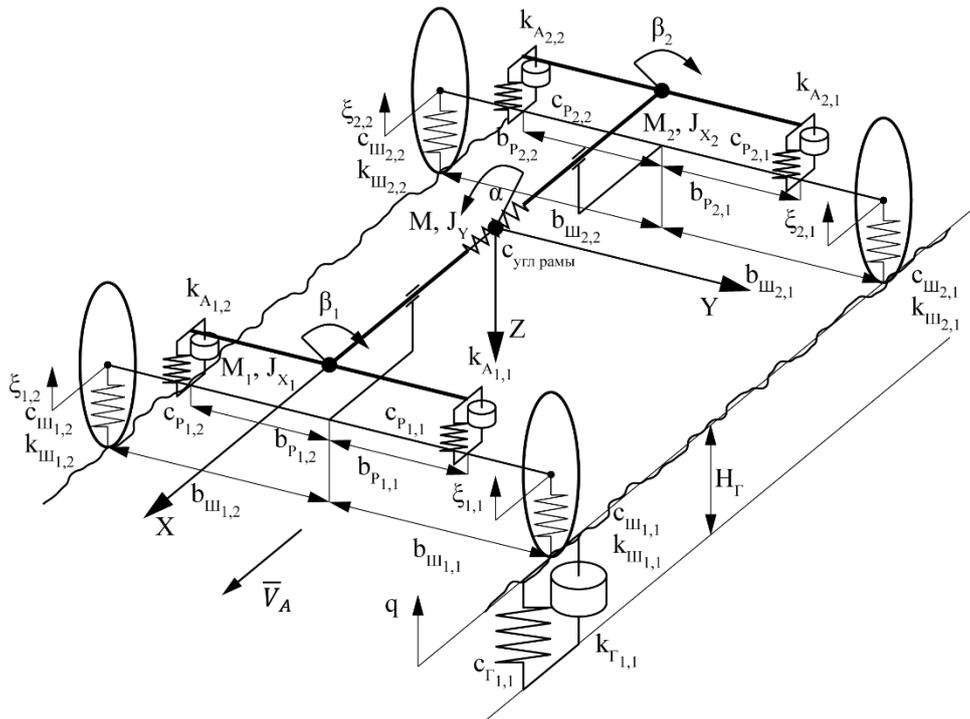


Рис. 1. Динамическая модель

3. Статистический микропрофиль дороги – оценивается спектральной плотностью  $S_q(\theta)$ . Задаётся зависимостью:  $S_q(\theta) = A \cdot \theta^{-b}(1)$ , где  $A$  и  $b$  - коэффициенты спектральной плотности, определяющие тип микропрофиля,  $\theta$  - путевая частота, рад/м.

Разработанная модель КМ (модель, представленная на рис.1 была обоснованно выбрана из рассмотренных) позволяет:

1) определять влияние на показатели проходимости КМ соотношения масс подрессоренных и непрорессоренных частей ( $M$  и  $m$ ); жесткости подвески, шины и коэффициента сопротивления амортизатора ( $c_p, c_{ш}, k_A$ ); типа подвески и направляющего устройства; типа и размеров шин; давления воздуха в шинах ( $p_w$ ); размеров - базы, шинной и рессорной колеи;

2) рассчитывать количественные значения параметров проходимости КМ: дополнительных динамических нагрузок, от колебаний КМ, действующих через шины на грунт ( $\Delta P$ ); глубины колеи и деформации шин ( $z$  и  $h$ ); уплотнение грунта, после прохода каждого

колеса ( $\rho_{Ci}$ ); коэффициенты сопротивления качению от деформации грунта и шины ( $f$ ); коэффициент свободной силы тяги ( $\Psi_T$ ); вероятность отрыва колес от грунта; вероятность задевания корпуса (моста) за грунт и т.д.;

3) рассчитывать количественные значения критериев плавности хода и прочности элементов КМ: среднеквадратические виброускорения и перемещения любой точки кузова ( $\ddot{z}_{A_i,j}$  и  $z_{A_i,j}$ ); 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 ( $\Delta P_{дин}$ ); перекрещивание передней и задней осей; угол закручивания рамы и перекос лонжеронов ( $\beta_{P_m}$  и  $\alpha_L$ ).

По вышеупомянутой методике проведены расчёты и определены взаимные деформации шины и грунта с учётом дополнительной динамической нагрузки. В основу определения дополнительной динамической нагрузки  $\Delta P_C$  была положена зависимость:

$\Delta P_C = \ddot{z}_C \cdot M + \ddot{\xi}_C \cdot m$ , где  $\ddot{z}_C$  и  $\ddot{\xi}_C$  – среднеквадратические виброускорения подрессоренной  $M$  и неподрессоренной  $m$  масс каждого из колёс КМ.

Проведённые расчёты по определению опорно-тяговых характеристик единичного колеса, колёс передней, задней осей двухосной КМ, движущихся по грунту различной ровности и физико-механического состояния, показали существенное влияние параметров колебаний КМ на получаемые результаты.

Для оценки адекватности разработанной математической модели движения КМ и подтверждения метода оценки демпфирующих свойств грунта были проведены серии экспериментов в грунтовом канале (рис. 2, а) и на автомобиле (рис. 2, б) в естественных ДГУ [3, 5].



Рис. 2. Экспериментальные исследования: а) в грунтовом канале; б) на автомобиле

Решение поставленной задачи по оценке проходимости (в динамической постановке), на основе пространственной модели КМ, взаимодействующей с грунтом, дало следующие основные результаты:

Колебательные процессы подрессоренных и неподрессоренных масс КМ взаимосвязаны с деформациями неровного мягкого грунта, механические характеристики которого нелинейны и зависят от его физического состояния.

Обобщенное математическое описание колебаний многомассовых динамических систем на деформируемом неровном грунте, позволяет проводить расчет по определению дополнительных динамических нагрузок, действующих на каждое колесо КМ. Адекватность пространственной динамической модели подтверждена экспериментальными исследованиями как для одиночного активного колеса, так и для двухосного полноприводного автомобиля. Количественное расхождение теоретических и экспериментальных данных находится в диапазоне ~ 10 %.

Существенное влияние на параметры колебаний подрессоренных и неподрессоренных масс КМ оказывают жесткостные и демпфирующие свойства деформируемой опорной поверхности. Расчеты по определению дополнительных динамических нагрузок при моделировании движения по твердому и деформируемому неровному грунту ( $A = 10^{-3}$ ) дают расхождение до 100 %. Увеличение влажности грунта от базовой  $W=70$  % на 30% приводит к снижению дополнительных динамических нагрузок на 10 %.

Определены области применения разработанных динамических моделей. При соотношении подрессоренной массы с неподрессоренной  $\frac{M}{m} > 10$  для упрощения расчетов неподрессоренную массу можно не учитывать и рассматривать колебательные процессы с помощью упрощенной динамической системы [3]. 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. При расчетах по пространственной динамической модели (рис. 1) динамические нагрузки увеличиваются на 25 % относительно плоской модели.

Для пространственной динамической модели при математическом описании неровностей недеформируемой поверхности, рекомендуется выбирать зависимости для спектральных плотностей микронеровностей, описывающие полусумму и полуразность высот неровностей под левыми и правыми колесами. При движении по деформируемой поверхности рекомендуется использовать зависимость:  $S_q = \frac{A \cdot V_a}{v^2}$  и время запаздывания прохождения неровностей колесами второй оси относительно соответствующего переднего колеса.

Выявлено влияние числа проходов колес на изменение высот микронеровностей. Для колес второй и последующих осей спектральную плотность микронеровностей необходимо пересчитывать. Эксперименты показали, что среднеквадратическая высота микронеровностей  $q_s$  в среднем уменьшается на 50 %, после прохода предыдущего колеса при движении «след в след» [3].

### **3. Сглаживающая способность пневматической шины при взаимодействии колеса с твердой неровной опорной поверхностью**

Возмущающее воздействие от неровностей дороги на поддрессоренные массы ТС существенно зависит от сглаживающей способности пневматической шины, т.е. от свойства шины уменьшать подъем оси колеса по сравнению с высотой преодолеваемой неровности и увеличивать зону действия неровности на колесо. Шина в ходовой системе является одним из наиболее сложных объектов для моделирования. Для исследования ее механических свойств необходимо привлечение методов нелинейной механики, одновременно учитывающих совокупность нелинейных факторов (физическая, геометрическая нелинейности, гиперупругие свойства материалов, контактное взаимодействие).

До настоящего времени задача моделирования пневматической шины (как технического объекта при статических и динамических воздействиях) решалась весьма приближенно, на основе значительных упрощений, что нередко приводило к серьезным погрешностям в расчетах. Как уже упоминалось ранее на первом этапе рассматриваемого метода оценки проходимости моделирование взаимодействия (в общей системе «грунт-КМ») подсистемы «шина-грунт» основано на упрощенной модели профессора Я.С. Агейкина и представлено в п.п. 1 и 2 данной статьи. Современный уровень развития вычислительной техники позволяет рассматривать эту научно-исследовательскую задачу в более точной постановке, использовать более сложные расчетные схемы (учитывающие перечисленные нелинейные факторы), полнее отражать в моделях особенности сложной армированной конструкции шины, учитывать взаимодействие шины с неровной опорной поверхностью.

Поэтому перед нашими исследованиями была поставлена новая задача: разработка возможности моделирования процесса взаимодействия пневматической шины с твердой неровной и деформируемой поверхностью на основе новых, более точных по сравнению с известными, экспериментально подтвержденными способами моделирования автомобильных пневматических шин, взаимодействующих с твердой неровной опорной поверхностью, учитывающей все основные особенности конструкции шины, механические свойства материалов, характер силового нагружения автомобильного колеса, геометрические параметры неровностей опорной поверхности.

Задача моделирования взаимодействия «шина-грунт» вынесена в качестве самостоятельной. Ее решение будет рассматриваться отдельно.

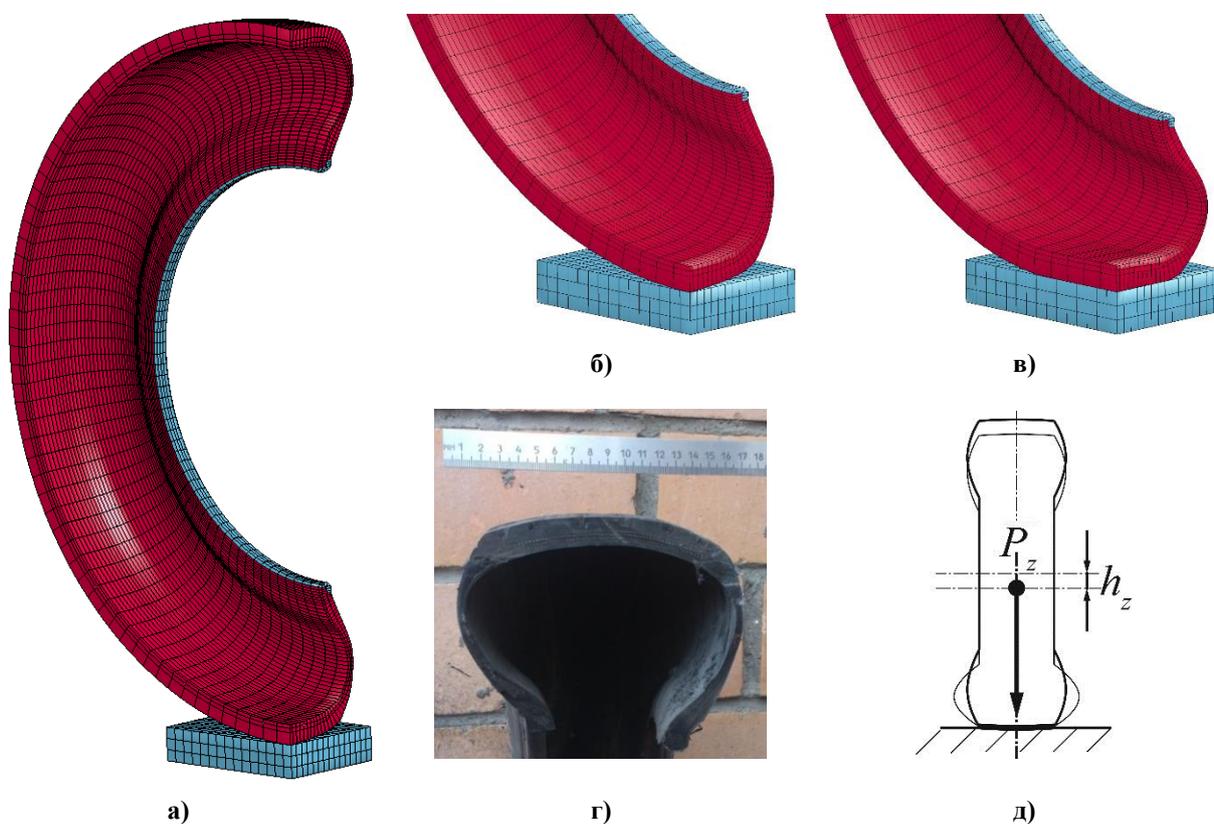
В исследовании [4] было проведено моделирование процесса взаимодействия автомобильной пневматической бескамерной шины с радиально расположенным каркасом и твердой опорной поверхности с неровностями, имеющими различные размеры и форму (рис. 3) [5].

Поставленная задача решалась с привлечением методов: сопротивления материалов, нелинейной теории упругости, метода конечных элементов (МКЭ), математической статистики, геометрического моделирования, компьютерной графики, математического моделирования деформирования пневматической шины при статических и динамических воздействиях в пятне контакта с неровной твердой поверхностью, экспериментальной ме-

ханики для проведения натурных испытаний шины (на стенде "Грунтовой канал" кафедры автомобилей и двигателей ФГБОУ ВПО МГИУ) и для получения механических характеристик резины (на испытательной машине ИР 5081–20).

В результате исследования были разработаны:

1. Новая уточненная трехмерная расчетная модель автомобильной пневматической шины (рис.3), учитывающая основные особенности ее объемной конструкции (боковины и части протектора из резины, армирование каркасом, бортовой проволокой, опоясывающим кольцом), отражающая нелинейные свойства (несжимаемость и гиперупругость резины, геометрически нелинейное деформирование корда шины, контактное взаимодействие шины с твердой неровной опорной поверхностью), использующая эквивалентную схему моделирования армирования кордом, позволяющая в статике и динамике оценить жесткостные свойства шины (при различных значениях вертикальной нагрузки на колесо, значениях давления в шине, различной форме неровностей опорной поверхности), подтвержденная экспериментальными исследованиями.



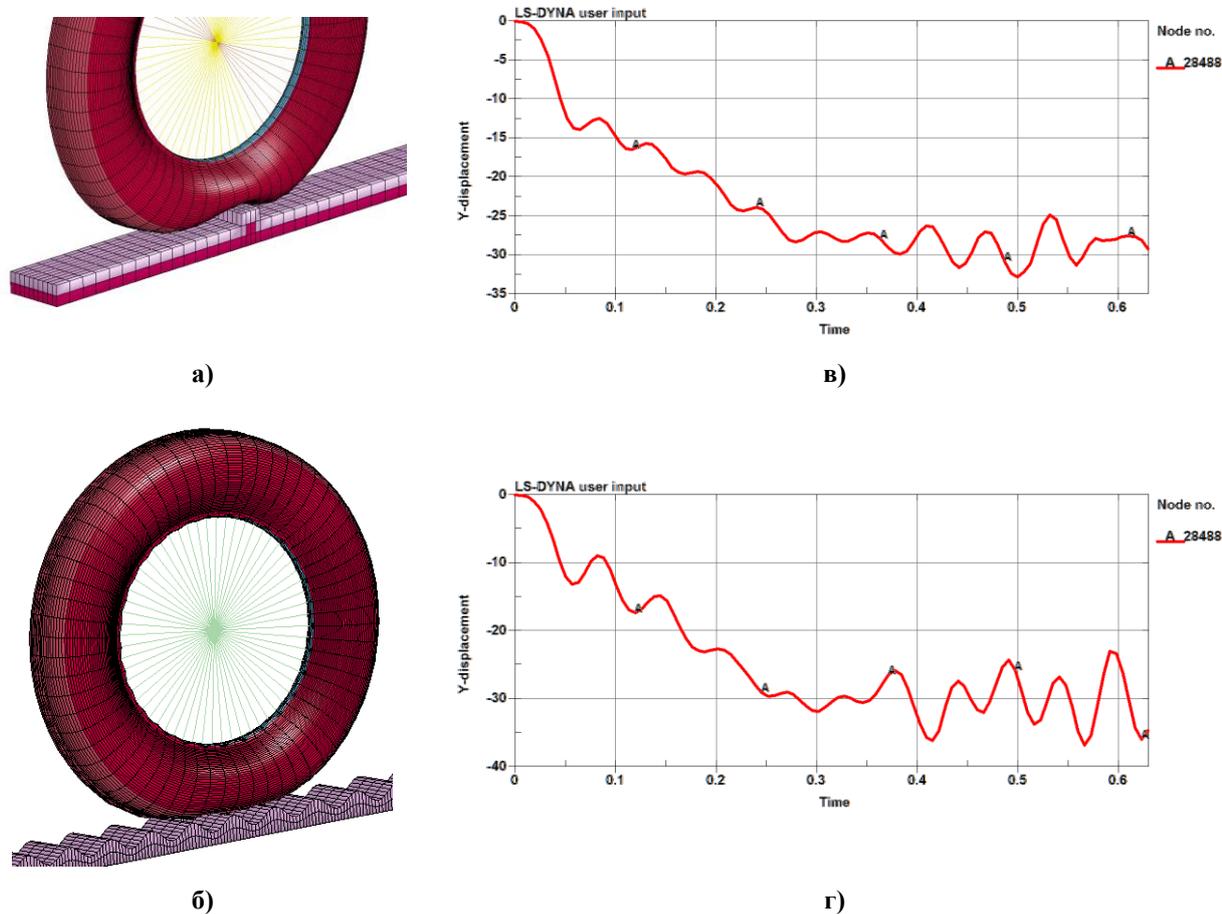
**Рис. 3.** Основные этапы разработки конечно-элементной модели шины: **а)** общий вид; **б)** зона контактного взаимодействия до приложения нагрузки; **в)** зона контактного взаимодействия после приложения нагрузки; **г)** сечение шины ВЛИ 5; **д)** схема тестовой задачи

2. Расчетно-экспериментальный метод определения жесткостной и демпфирующей характеристик автомобильной пневматической шины и оценки ее сглаживающей способности при статическом взаимодействии автомобильного колеса с твердой неровной опорной поверхностью и при движении колеса по неровностям различных размеров и формы на основе подтвержденного экспериментально трехмерного физически и геометрически

нелинейного моделирования шины с учетом контактного взаимодействия шины с опорной поверхностью.

3. Предложена методика определения характеристик гиперупругого материала Муни-Ривлина (для моделирования резины в методе оценки сглаживающей способности автомобильных пневматических шин) на основе сравнения результатов расчетов и испытаний образцов, вырезанных из боковины шины, а также на основе сравнения результатов расчетов и натуральных испытаний деформирования шины на плоской твердой поверхности при вертикальном нагружении.

4. Впервые расчетным путем получены результаты по деформированию автомобильной пневматической шины при ее взаимодействии с твердой неровной опорной поверхностью, позволившие выявить нелинейные зависимости жесткости шины и коэффициента демпфирования от характеристик ее нагружения, формы и размеров неровностей опорной поверхности [4].



**Рис. 4.** Результаты моделирования движения шины по неровной опорной поверхности:

- а) деформированное состояние шины, вертикальное перемещение оси центра колеса;
- б) деформированное состояние шины, движение по переиодическим неровностям;
- в) приложена линейная скорость; г) приложена угловая скорость

В результате для практического использования создана методика решения задачи взаимодействия шины с неровной опорной поверхностью, учитывающая конструктивные особенности шины, условия нагружения, размеры и форму неровностей. Методика позво-

ляет оценить изменение жесткостных параметров шины при взаимодействии с различными неровностями и при различных параметрах нагрузок с целью уточнения динамической модели движения в общей системе "дорога – шина – автомобиль – водитель".

Созданная нелинейная (физически и геометрически) трехмерная модель автомобильной пневматической шины (рис.4) учитывает основные особенности конструкции, гиперупругие несжимаемые свойства резины, эквивалентным образом отражает армирование шины (каркас, опоясывающее кольцо, бортовую проволоку), позволяет исследовать контактное взаимодействие шины с твердой опорной поверхностью, имеющей неровности произвольной формы.

С помощью разработанной методики экспериментального определения характеристик несжимаемого материала (резины) из состава конструкции шины получены константы материала Муни-Ривлина для задач по моделированию взаимодействия автомобильного колеса с опорной поверхностью:  $a_{10} = 1,285 \text{ МПа}$ ,  $a_{01} = -0,0004 \text{ МПа}$ .

Установлено, что на сглаживающую способность шины, наряду с условиями нагружения (вертикальная нагрузка и внутреннее давление воздуха в шине), существенное влияние оказывает форма неровности.

Расчеты показали, что на коэффициент демпфирования значительно влияют давление воздуха в шине и форма неровности. Например, снижение давления в два раза от номинального (0,2 МПа) на неровности в виде впадины привело к уменьшению коэффициента на 18%.

## Заключение

Современный этап развития исследований в области оценки проходимости КМ можно сформулировать как не до конца решенную проблему моделирования движения пространственной многоосной модели ТС в изменяющихся дорожно-грунтовых условиях.

Моделируется механическая система – «дорога (грунт)- колесо (шина)-машина».

Разработаны:

математическая модель оценки дорожно-грунтовых условий района эксплуатации КМ в вероятностной постановке (предложены модели прямолинейного и криволинейного движения по ровной и неровной поверхностям);

- пространственная динамическая модель движения КМ;
- модель взаимодействия шина-грунт на базе модели Я.С. Агейкина;
- модель взаимодействия шина-недеформируемый неровный грунт (прямолинейное движение) на базе метода конечных элементов;
- создан вариант стенда «грунтовой канал-активное колесо»;
- проведена серия испытаний, подтвердивших адекватность принятых моделей взаимодействия шины с грунтом.

Следующей задачей, требующей решения на ближайшую перспективу, является разработка метода, уточняющего и позволяющего реально моделировать движение пневматического колеса по деформируемому грунту на базе метода конечных элементов. Реше-

ние поставленной задачи позволит визуализировать процесс взаимодействия шины с грунтом на фоне виртуальных экспериментов на искусственных грунтах, которые имеют физико-механические свойства реальных грунтов.

Необходимо разработать концепцию и конструкцию базового стенда «грунтовой канал-активное колесо» [6] для проведения научных исследований в области оценки эффективности движения пневматического колеса при полномасштабном моделировании условий и режимов движения.

### Список литературы

- [1]. Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. М.: Машиностроение. 1972. 184 с.
- [2]. Вольская Н.С. Разработка методов расчета опорно-тяговых характеристик колесных машин по заданным дорожно-грунтовым условиям в районах эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. 377 с.
- [3]. Чичекин И.В. Разработка пространственных динамических моделей колесных машин для анализа проходимости при движении по неровным грунтовым поверхностям: диссертация кандидата технических наук: дис. ... кан. техн. наук. М.: МГИУ. 2010. 258 с.
- [4]. Левенков Я.Ю. Сглаживающая способность пневматической шины при статическом и динамическом взаимодействии автомобильного колеса с твердой неровной опорной поверхностью: диссертация кандидата технических наук: дис. ... кан. техн. наук. М.: МГИУ. 2013. 131 с.
- [5]. Вольская Н.С., Кузнецов А.В., Левенков Я.Ю., Палагута К.А., Ширяев К.Н. Автоматизированный стенд для определения деформации грунта в условиях циклического взаимодействия с эластичным колесом. // Труды ФГУП "НПЦАП" Системы и приборы управления. 2016. №3. С. 19-27.
- [6]. Захаров А.Ю. Технология экспериментальных исследований колесных транспортных средств на стендах с имитацией качения движителей по опорной поверхности: автореферат дис. ... кан. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. 16 с.