

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ «КУЗОВ-ПОДВЕСКА-КОЛЕСО-ГРУНТ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Курдюк В.А.¹, д.т.н. Вольская Н.С.¹, д.т.н. Русанов О.А.²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, ² Университет машиностроения
volskaja52@mail.ru, newmalina@yandex.ru

Представлена методика расчетного исследования системы «кузов-подвеска-шина-грунт» в практических задачах оценки проходимости и плавности хода колесных машин. Использование методики позволяет учитывать особенности взаимодействия колеса и деформируемой опорной поверхности при моделировании движения колесной машины по грунтам с различными физико-механическими свойствами в предполагаемых районах эксплуатации. Расчетное моделирование базируется на методе конечных элементов в нелинейной динамической постановке.

Ключевые слова: колесная машина, пневматическая шина, взаимодействие колеса с грунтом, метод конечных элементов, системы «кузов-подвеска-шина-грунт».

Введение

При проектировании колесной машины актуальными являются задачи определения параметров взаимодействия элементов в системе «кузов-подвеска-шина-грунт». Задачи возникают при анализе проходимости транспортного средства, оценке плавности его хода, исследовании эффективности движения и воздействия на окружающую среду, определении сил сопротивления движению.

Решение этих задач позволяет выбирать оптимальные значения параметров агрегатов и узлов для различных транспортных средств, движущихся вне дорог.

Комплексное представление системы «автомобиль-подвеска-шина-грунт» требует рассмотрения ряда самостоятельных вопросов, связанных с моделированием автомобильной пневматической шины, способами описания свойств грунта, отражением особенностей взаимодействия колеса и грунта, учетом нелинейной реакции элементов системы поддрессовывания, а также с другими факторами, влияющими на динамику автомобиля. Некоторые из этих вопросов в настоящее время изучены и проработаны не в полной мере, что создает трудности при разработке адекватных моделей движения колесной машины по деформируемому грунту. Можно констатировать, что на сегодняшний день отсутствуют общепри-

знанные, достоверные и апробированные методики комплексного моделирования системы «автомобиль-подвеска-шина-грунт», обеспечивающие гарантированное решение стоящих перед проектировщиком задач.

Так, широко применяемые аналитические методы моделирования рассматриваемой системы [2] исходно используют существенные упрощающие предположения, не позволяющие с достаточной точностью (соответствующей современным требованиям) выполнить оценку параметров взаимодействия колеса и грунта. Известные расчетные способы прогнозирования глубины колеи [1], создаваемой колесным движителем в различных грунтах, тоже дают весьма приблизительные результаты.

Работы [4, 5] являются определенным развитием расчетных методов прогнозирования деформаций автомобильной пневматической шины на неровной, но абсолютно твердой опорной поверхности. К основным результатам работ следует отнести тщательно проработанную методику конечно-элементного моделирования колеса с эластичной шиной. Особенности конструкции шины отражены в расчетной схеме с высокой степенью детализации. Полученные данные об интегральных механических характеристиках шины при статическом и динамическом нагружении, предназначены для

использования в динамических моделях автомобиля.

В последующих работах [6, 7] изложены усовершенствованные способы моделирования деформируемой шины, позволяющие точнее описать взаимодействие колеса с несущей поверхностью, которая уже может не быть абсолютно твердой. Появилась практическая возможность моделирования процессов образования колеи движущейся колесной машиной.

Целью исследования, результаты которого приведены в данной статье, является разработка обобщенной методики конечно-элементного моделирования системы «кузов-подвеска-шина-грунт» с одновременным отражением основных физико-механических свойств грунта, деформационных и диссипативных свойств автомобильной шины, нелинейной динамической реакции системы подпрессоривания.

Поэтому основная задача общего исследования: разработка алгоритма расчета глубины колеи при взаимодействии пневматического колеса с грунтом в динамической постановке.

Описание свойств грунта базируется на результатах исследования [8]. Моделирование шины выполнено в соответствии с [7].

Общие положения

Предлагаемая модель системы «автомобиль-подвеска-шина-грунт» может быть условно разделена на взаимодействующие между собой составные части, к которым отнесены: кузов автомобиля; детали и узлы системы подпрессоривания; колесо с пневматической шиной; массив грунта, на который опирается колесо.

В качестве объекта, иллюстрирующего применение предложенной методики, выбран автомобиль (ВАЗ-2123 Нива). Его кузов представлен абсолютно жесткой конструкцией, хотя в рамках разработанной методики это не является принципиальным ограничением. Методика допускает возможность учета податливости кузова (рамы, каркаса) транспортного средства. Метод конечных элементов, используемый в расчетах, в случае необходимости позволяет достаточно точно отразить упругие свойства несущей системы.

На кузове выделены характерные точки, в которых крепятся опоры узлов подвески, размещаются сосредоточенные массы, имитирующие агрегаты автомобиля (двигатель, коробка

передач и др.), производятся замеры расчетных перемещений и виброускорений (кресло водителя и др.).

В модели автомобиля обеспечено соответствие реальному объекту значений его массы и координат центра тяжести.

Из всех колес автомобиля максимально подробно смоделировано только одно. На нем предварительно определяют параметры взаимодействия с грунтом, которые затем переносят в модели остальных колес, представленные по эквивалентным упрощенным схемам с уменьшенным числом степеней свободы (порядка 30–40 вместо ~70 тысяч). За счет экономии количества степеней свободы в упрощенных моделях обеспечивается возможность высокой детализации конструкции одной из пневматических шин (группирования в ее модели основного количества неизвестных), что способствует наилучшим условиям сходимости решения, достижению максимальной точности результатов, сокращению вычислительных затрат.

Подвеска автомобиля моделируется в соответствии со схемой геометрически и физически нелинейного динамического анализа. Элементы, имитирующие детали подвески (рычаги, шарнирные опоры, амортизаторы), имеют возможность совершать в пространстве перемещения и повороты конечной величины. Амортизаторы могут иметь нелинейные силовые характеристики.

Действующий на колесо автомобиля во время его движения крутящий момент в разработанной модели приложен непосредственно к оси колеса. Жесткостные характеристики трансмиссии и динамические характеристики двигателя при этом не учитываются. Для рассматриваемых задач такое допущение существенным образом на результаты не влияет.

Общий вид модели показан на рис. 1. Рассмотрено прямолинейное движение автомобиля по неровной деформируемой опорной поверхности. Скорость движения, свойства грунта, размеры и форма неровностей могут варьироваться в широких пределах. Расчетom определяются: перемещения в системе подпрессоривания, вертикальные ускорения в установленных точках кузова, глубина формируемой колеи, силы сопротивления движению.

Расчеты выполнены в программном комплексе Ansys / LS-Dyna [10], реализующем

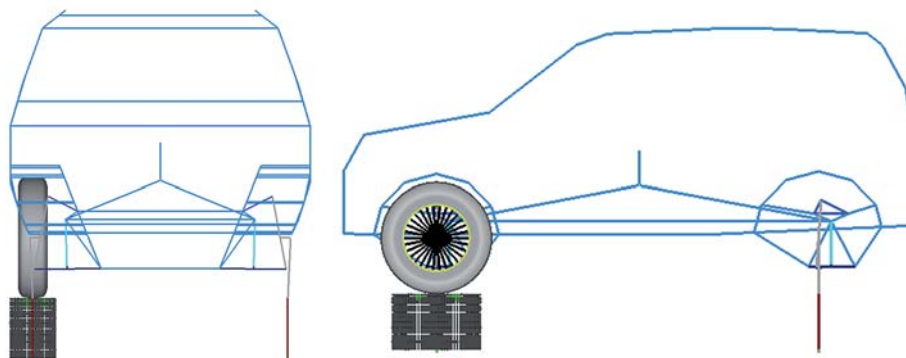


Рис. 1. Динамическая модель системы «кузов-подвеска-шина-грунт»

метод конечных элементов в нелинейной динамической постановке. Далее отдельные элементы системы «автомобиль-подвеска-шина-грунт» рассмотрены подробнее.

Кузов автомобиля

В задачах оценки проходимости автомобиля в первом приближении допустимо не учитывать жесткость его несущей системы. Однако при решении других задач динамики автомобиля, в частности при оценке показателей плавности хода, модель кузова (рамы, каркаса) целесообразно разрабатывать с учетом реальных жесткостных характеристик, по возможности точнее отражать конструкцию несущей системы, свойства материалов. Учет жесткости может быть важен и в других случаях, например, при моделировании диагонального вывешивания автомобиля. Настоящее исследование ставит целью, в первую очередь, комплексное изучение взаимодействия автомобиля с грунтом. Поэтому на данном этапе разработанные модели системы «кузов-подвеска-шина-грунт» ограничены представлением кузова в виде абсолютно жесткой конструкции.

Подвеска

Механизм подвески смоделирован как геометрически нелинейная система абсолютно твердых элементов, имитирующих рычаги, имеющих возможность совершать большие перемещения и повороты в пространстве. На перемещения элементов наложены связи, отражающие шарнирные соединения между отдельными деталями подвески, а также упругие и диссипативные свойства амортизаторов (рис. 2).

Подвеска уточненной модели колеса не содержит элемента 6, а само колесо крепится к узлам 5 так, чтобы координаты узлов на оси вращения были одинаковы (coincident nodes).

При создании модели автомобиля обеспечено соответствие характеристик деталей подвески и элементов, их имитирующих, по значениям массы, моментов инерции и положению центра тяжести.

В модели подвески отражена ступица. Она представлена жесткими элементами, соединяющими характерные точки: центры шарниров на рычагах подвески, центр пятна контакта колеса с грунтом (самый нижний узел на рис. 2 для упрощенной модели колеса), а также две точки на оси вращения колеса. Узлы связанных элементов ступицы и рычагов допускают возможность поворота друг относительно друга, имитируют вращение колеса.

При прямолинейном движении автомобиля моделировать рулевую систему не требуется. В шарнирах верхнего и нижнего рычагов

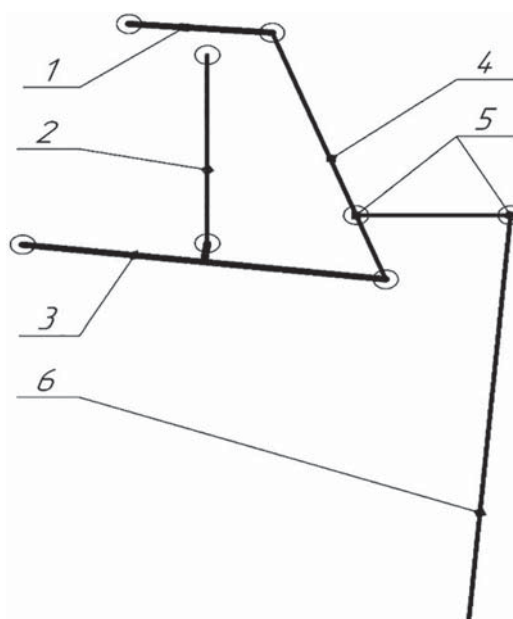


Рис. 2. Подвеска:

- 1 – верхний рычаг, 2 – демпфер и упругий элемент,
- 3 – нижний рычаг, 4 – ступица, 5 – узлы на оси колеса, 6 – модель упрощенного колеса

установлены специальные упругие элементы с заданной крутильной жесткостью, позволившие исключить проворот ступицы в данном режиме.

Трение в шарнирах подвески учтено специальными элементами (с заданными свойствами трения), связывающими сопряженные узлы на рычагах подвески и в точках крепления системы подвески на кузове.

Подвеска смоделирована упругим и демпфирующим элементами с заданными нелинейными характеристиками жесткости (в виде кривой зависимости усилия на пружине P_y от ее линейного сжатия z : $P_y = f(z)$) и свойствами демпфирования (в виде кривой зависимости усилия на демпфере P_d от скорости сжатия \dot{z} : $P_d = f(\dot{z})$).

Шина

Методика построения модели шины подробно изложена в [4, 5, 7, 9]. В модели (рис. 3) отражены ее составные части: брекер 1, корд 2, резиновая часть конструкции шины 3, бортовое кольцо 4, обод колесного диска 5, диск 6.

Брекер и корд смоделированы оболочечными элементами с характеристиками, эквивалентными натурному объекту.

Часть шины, выполненная из резины, представлена объемными элементами из гиперупругого материала типа Муни-Ривлина. Константы материала определены при испытаниях образцов [4].

Бортовое кольцо смоделировано объемными элементами, а обод колесного диска – оболочечными элементами из изотропного материала со свойствами углеродистой стали.

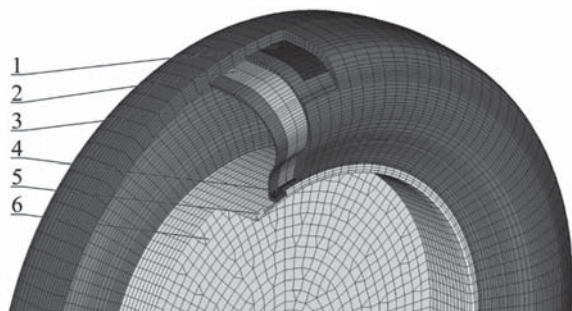


Рис. 3. Конечно-элементная модель колеса:

- 1 – брекер; 2 – корд; 3 – резиновая часть шины;
- 4 – бортовое кольцо; 5 – обод колесного диска;
- 6 – диск

Грунт

Оригинальная методика моделирования грунта подробно изложена в [6]. Грунт рассмотрен в рамках модели в виде сплошной среды с нелинейными физическими зависимостями между напряжениями и деформациями. Его конечно-элементное моделирование существенно осложнено необходимостью учета возможности значительных смещений соседних слоев грунта относительно друг друга при воздействии на грунт автомобильного колеса.

В зависимости от свойств грунта могут быть применены различные способы моделирования его нелинейных характеристик. Для связных и несвязных типов грунта предложены отличающиеся конечно-элементные аппроксимации. В общем случае грунт представлен набором упруго-вязко-пластичных тел, соединенных между собой одноосными элементами (рис. 4). Между телами установлен небольшой зазор, а на их сопряженных поверхностях заданы условия контактного взаимодействия.

Одноосные элементы, соединяющие крайние узлы объемных тел, моделирующих грунт, нужны для отражения связности грунта. В сплошном теле связность обеспечивается тем, что оно работает и на сжатие, и на растяжение. При сжатии нескольких тел включаются условия их совместного контактного взаимодействия.

Для объемных элементов тела грунта использована модель материала Honeycomb Foam Model [10], предназначенная для упруго-

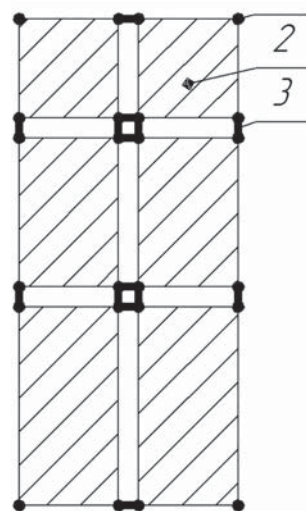


Рис. 4. Схема построения сетки конечных элементов, моделирующих механические свойства грунта:

- 1 – узлы сетки, 2 – единичные тела,
- 3 – одноосные элементы связности

вязко-пластичных материалов с ярко выраженной анизотропией механических свойств.

Параметры грунта для использования в модели системы «автомобиль-подвеска-шина-грунт» определяют экспериментально при проведении испытаний по деформированию грунта. Данные для моделирования задают в виде диаграмм деформирования по различным направлениям сжатия. Значения необходимых параметров определены при проведении натурных экспериментов по задавливанию штампов в грунт вертикально и под углом 45° , а также испытаний грунта на срез. Вид диаграммы деформирования соответствует линейно возрастающей зависимости удлинения от напряжений до значения, соответствующего разрушению образца при эксперименте. Далее жесткость резко падает и становится близкой к нулю.

Эксперименты показали, что напряжения распространяются в грунте на расстояние порядка одного-двух характерных размеров пятна контакта шины по горизонтали и приблизительно на такую же глубину по вертикали. Таким образом, достаточно смоделировать объем грунта в виде параллелепипеда с шириной, равной двум – четырем длинам пятна контакта, и глубиной, равной глубине деформируемого слоя. Грунт как бы помещается в ящик, на наружных стенках которого заданы ограничения по горизонтальным смещениям, а на дне ящика – по вертикальным смещениям.

Для грунтов с низкой несущей способностью создают модель отдельного тела по форме ящика, зафиксированного по наружным стенкам и дну от любых смещений. При этом для объема, моделирующего грунт, устанавливают условия контактного взаимодействия с этим ящиком.

Если наряду с вертикальным задается еще и горизонтальное перемещение штампа, моделируется так называемый грунтовой канал. Его длина оценивается отдельно. Для более точного моделирования уплотняемых грунтов ко всем узлам модели прикладывается ускорение свободного падения.

В ряде случаев для уменьшения размерности модели грунта возможно некоторое упрощение сетки конечных элементов. Для несвязного грунта возможны два варианта моделирования.

В первом из них в модель не включают одноосные элементы, реализующие связность,

не формируют зазор между элементарными телами. Задают только контактное взаимодействие между отдельными телами грунта с коэффициентом трения, равным тангенсу угла внутреннего трения грунта.

Во втором варианте одноосные элементы остаются, но кривая деформируемости задается так, чтобы жесткость на сжатие была отличной от нуля, а на растяжение — равной нулю. Эти элементы будут работать так же, как элементы контакта. Такой вариант работает при малых вертикальных перемещениях.

Если на штамп действует только вертикальное усилие, то грунт можно моделировать столбиками — объединить все простые тела по вертикали в одно тело.

Если деформации грунта невелики, напряжения в грунте не достигают предела несущей способности (нет разрушения или сдвига участков грунта относительно друг друга), давящий объект не имеет острых кромок и деформирует грунт неглубоко (как, например, шина низкого давления без протектора), то грунт можно моделировать сплошным телом. Это значительно уменьшает время расчета, однако при увеличении нагрузки модель может потерять сходимость. Такую упрощенную модель целесообразно использовать в качестве первого приближения для оценки порядков величин заглубления и напряжений, оценки формы и размеров пятна контакта, чтобы можно было скорректировать сетку конечных элементов для более точного расчета.

Для определения характеристик грунта в лаборатории ФГБОУ ВПО МГИУ была спроектирована и изготовлена мобильная экспериментальная установка (пневматический пенетромметр) для исследований деформируемости грунтов как в полевых, так и в лабораторных условиях, устанавливаемая на носитель. Применение данной установки позволило оценить механические свойства грунтовых поверхностей путем снятия характеристики деформируемости при воздействии на грунт нагрузки под различными углами и проведения испытания на срез подвижной плитой [3].

Упрощенная модель колесо-грунт

Для подготовки упрощенной модели колеса проводят или эксперимент по задавливанию шины в грунт, или моделирование данного процесса по методике [6]. В результате определя-

ют жесткость и демпфирующие свойства эквивалентной системы «колесо-грунт» для ввода параметров в упрощенную модель колеса.

Упрощенная модель системы «колесо-грунт» представляет собой два двумерных элемента, имеющих общие узлы (один в точке пересечения вертикальной оси колеса и наружной поверхности шины, второй расположен ниже первого на величину H_r) и одного одномерного элемента массы.

Один элемент типа spring, второй damper с характеристиками, соответствующими, полученными в эксперименте.

Элемент массы имеет значение, равное массе колеса.

Грунтовой канал

В работе [6] показано, что более высокая точность отражения грунта достигается при использовании предложенной модели грунтового канала, чем при самостоятельном моделировании массива грунта с непосредственным наложением граничных условий по перемещениям в узлах объемных элементов грунта. Грунтовой канал (рис. 5) представляет в модели конфигурацию в виде «ящика» из жестких оболочечных элементов, внутри которого располагаются элементарные тела грунта. Между телами грунта и стенками ящика установлены условия контактного взаимодействия.

Параметры расчета

На базе приведенной выше методики были выполнены расчеты и конкретное моделирование взаимодействия шины и грунта. Расчетные технические характеристики колесной

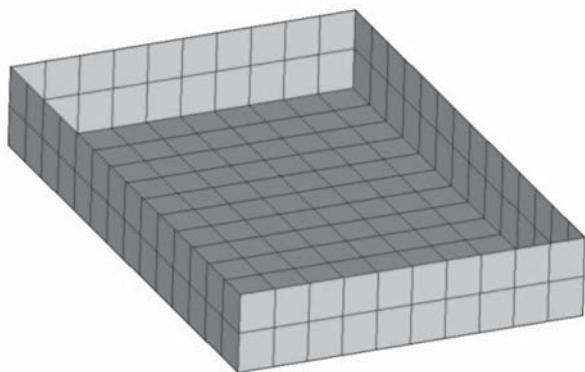


Рис. 5. Грунтовой канал

машины и исследуемого грунта заданы следующими характеристиками:

- полная масса автомобиля составляет 1700 кг. В этом случае нагрузка, приходящаяся на одно переднее колесо, составляет ~400 кг (4000 Н);
- шина 195/70 R15;
- давление воздуха в шине 250 кПа (столь высокое давление выбрано для того, чтобы получить более выраженную картину деформации грунта);
- к системе приложено ускорение свободного падения g (9,81 м/с²).

Узлы грунтового канала закреплены от перемещений по трем осям. Других закреплений в модели нет.

В качестве грунта выбран песок (плотность $\rho = 1660$ кг/м³, влажность $W = 2\%$, глубина мягкого слоя $H_r = 0,3$ м).

Задан контакт между резиновой частью шины и грунтом, грунтом и грунтовым каналом.

Дополнительно увеличен штраф для всех контактных взаимодействий до 10 единиц.

Время расчета равно 0,5 с. Это связано с тем, что шаг по времени составляет $0,7 \cdot 10^{-7}$ с, число узлов в модели превышает 300 000. Для снижения ресурсоемкости задачи время расчета уменьшено. Из-за этого следует иметь в виду возможность проявления эффектов, связанных с ударным взаимодействием частей модели.

Результаты моделирования

В результате моделирования эксперимента по статическому нагружению колеса автомобиля на грунте получены следующие результаты [11]:

- форма колеи соответствует ожидаемой и показана на рис. 6. На рис. 7 видно, что наблюдается выпор грунта рядом с зоной контакта;
- глубина колеи составляет 43 мм. Погрешность относительно натурного эксперимента составляет 14%.

Видеозапись результатов расчета представлена в источнике [11].

Выводы

Разработана методика моделирования движения по грунту колесной машины с помощью расчетной системы «кузов-подвеска-шина-грунт» на основе метода конечных элементов.

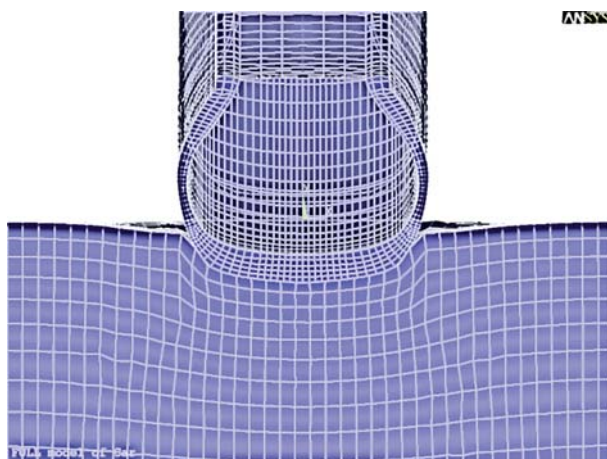


Рис. 6. Сечение системы вертикальной плоскостью, проходящей через ось колеса. Показана форма колеи

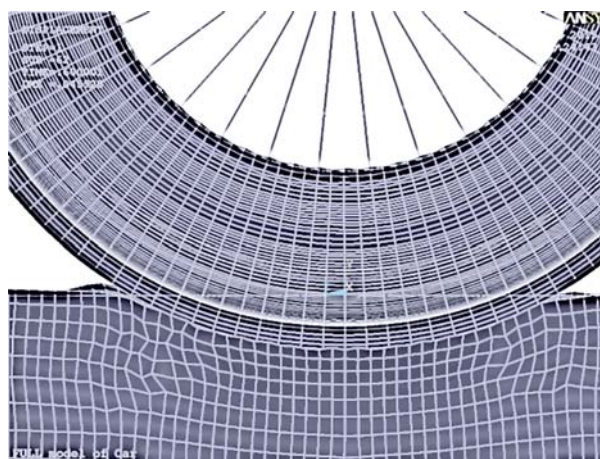


Рис. 7. Сечение системы в вертикальной плоскости, перпендикулярной оси колеса

Задача решена в нелинейной динамической постановке. Методика может быть использована для прогнозирования глубины образующейся при движении автомобиля колеи в зависимости от физико-механических свойств грунта, а также для оценки проходимости и плавности хода проектируемого автомобиля, определения воздействия на окружающую среду, например степени уплотнения грунта после прохода колес автомобиля, вычисления сил сопротивления движению колесной машины.

Представленная методика была использована при расчетах по оценке глубины колеи после проходов колесной машины по суглинистым грунтам. Результаты натурного и расчетного экспериментов дали расхождение не более 14% относительно натурного эксперимента.

Таким образом, достигнута достаточная для практических целей сходимости расчетных результатов с экспериментальными данными, что позволит использовать данную методику при выборе параметров агрегатов транспортных средств (трансмиссии, подвески и колесного движителя) на стадии проектирования.

Литература

1. Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. – М.: Машиностроение, 1972, – 184 с.
2. Агейкин Я.С., Вольская Н.С., Чичекин И.В. Проходимость автомобиля: учебник. – М.: МГИУ, 2010. – 275 с.
3. Вольская Н.С. Выбор основных параметров колесного движителя транспортных средств высокой проходимости: Дисс...д-ра техн. наук. – М., МГИУ, 1989.
4. Левенков Я.Ю., Вольская Н.С. Сглаживающая способность пневматической шины автомо-

бильного колеса при взаимодействии с твердой неровной опорной поверхностью // Технология колесных и гусеничных машин. – 2015. – № 1. – С. 20–26.

5. Вольская Н.С., Левенков Я.Ю., Русанов О.А. Моделирование взаимодействия автомобильного колеса с неровной опорной поверхностью // Машиностроение и инженерное образование. – 2011. – № 4. – С. 40–46.
6. Вольская Н.С., Левенков Я.Ю., Русанов О.А. Моделирование автомобильной пневматической шины, взаимодействующей с твердой неровной опорной поверхностью // Наука и образование: электронное научно-техническое издание Эл № ФС 77-48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408. (МГТУ им. Н.Э. Баумана), № 05, май 2013, DOI: 10.7463/0513.0571409
7. Курдюк В.А., Вольская Н.С., Русанов О.А. Расчетный метод моделирования деформативных свойств грунтов в задачах прогнозирования взаимодействия колесного движителя с опорной поверхностью // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 2. – С. 12–16.
8. Kurdyuk V.A., Volskaja N.S. Contact interaction between the wheel and the bearing surface. Advanced Engineering, 7 (2013). Croatia, Revelin d.o.o. – pp. 43–50.
9. Купреянов А.А. Исследование динамического потенциала шины на поверхностях, покрытых слоем льда // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 12(24).
10. Hallquist J.Q. "LS-DYNA Keyword User's Manual," Volumes I & II, Version 971, Livermore Software Technology Company, Livermore, CA, August, 2006.
11. Статическое нагружение модели автомобиля ВАЗ-2123 на песке. [Видеозапись]. – <http://www.youtube.com/watch?v=pf86MRobSeA>