

УДК 004.942:630*31

Ю. И. Мисуно, П. А. Протас, Л. Н. Москальчук

Белорусский государственный технологический университет

**ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН С ЛЕСНЫМИ
ПОЧВОГРУНТАМИ**

Решение задачи по оценке взаимодействия различных типов движителей лесозаготовительных машин с почвогрунтами получило дальнейшее развитие с использованием информационных технологий, которые формируют новые методы и способы проведения научных исследований в данной области. В последние годы широкое применение нашло использование систем автоматизированного проектирования (САПР) как более эффективного и достаточно точного инструмента для изучения сложных процессов качения деформируемого колесного движителя по деформируемому опорному основанию. При этом ключевым методом для определения основных характеристик исследуемого процесса взаимодействия является метод конечных элементов (МКЭ).

В данной работе рассмотрены вопросы применения САПР для проведения научных исследований и вычислительного эксперимента при изучении процесса взаимодействия пневматических шин, устанавливаемых на колесные движители лесозаготовительных машин, с почвогрунтами. Был проведен анализ применяемых систем и продуктов САПР, их технических возможностей для выполнения этапов моделирования и инженерных расчетов. Для решения задачи по определению параметров взаимодействия пневматического колеса с лесным почвогрунтом в работе были описаны особенности, необходимые условия и исходные данные с учетом выбранного программного обеспечения, характеристик исследуемых объектов, моделируемых условий их взаимодействия и определяемых параметров.

В статье дается заключение о роли вычислительного эксперимента в САПР в общей методологии научно-исследовательских работ, а также о целесообразности использования данного инструмента в совокупности с теоретическими и экспериментальными этапами исследований.

Ключевые слова: САПР, моделирование, инженерный анализ, метод конечных элементов, пневматические шины, лесной почвогрунт, деформируемое основание.

Для цитирования: Мисуно Ю. И., Протас П. А., Москальчук Л. Н. Применение систем автоматизированного проектирования для оценки взаимодействия пневматических шин с лесными почвогрунтами // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С. 111–120. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-12.

Yu. I. Misuno, P. A. Protas, L. N. Moskalchuk

Belarusian State Technological University

**APPLICATION OF COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS TO ASSESS
THE INTERACTION OF PNEUMATIC TIRES WITH FOREST SOILS**

The solution of the problem of assessing the interaction of various types of logging machine propellers with soils has been further developed using information technologies that form new methods and ways of conducting scientific research in this area. In recent years, the use of computer-aided design (CAD) systems has found wide application as a more efficient and fairly accurate tool for studying complex processes of rolling a deformable wheel mover on a deformable support base. In this case, the key method for determining the main characteristics of the studied interaction process is the finite element method (FEM).

This paper discusses the issues of using CAD for scientific research and computational experiment in studying the process of interaction of pneumatic tires mounted on wheeled movers of logging machines with soils. An analysis of the applied CAD systems and products, their technical capabilities for performing the stages of modeling and engineering calculations was given. To solve the problem of determining the parameters of the interaction of a pneumatic wheel with forest soil, the paper describes the features, necessary conditions and initial data, taking into account the selected software, the characteristics of the objects under study, the simulated conditions for their interaction and the parameters to be determined.

The article gives a conclusion about the role of a computational experiment in CAD in the general methodology of research work, as well as the feasibility of using this tool in conjunction with the theoretical and experimental stages of research.

Keywords: CAD, modeling, engineering analysis, finite element method, pneumatic tires, forest soil, deformable base.

For citation: Misuno Yu. I., Protas P. A., Moskalchuk L. N. Application of computer-aided design systems to assess the interaction of pneumatic tires with forest soils. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp. 111–120. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-12 (In Russian).

Введение. Исследование процесса взаимодействия различных типов движителей лесных машин с почвогрунтами является важным пунктом в решении проблемы по освоению лесных участков со слабой несущей способностью грунтов. Характеристика данных условий, особенности изучаемого взаимодействия и негативные последствия как для техники, так и для лесного почвогрунта были описаны в научных трудах, в том числе и авторами данной работы.

Одними из ключевых и актуальных вопросов в данной области исследования являются: описание процесса качения пневматических шин повышенной проходимости по лесным слабонесущим почвогрунтам, определение параметров их взаимодействия; математическое описание процесса деформации; прогнозирование эффективности работы колесного движителя и степени повреждения лесного почвогрунта.

В свое время многие ученые отмечали сложность выполнения исследований взаимодействия колесного движителя с почвами ввиду многообразия влияющих факторов, их неоднородности и непостоянства. На сегодняшний день процесс движения деформируемого колеса по недеформируемой поверхности достаточно хорошо изучен. Однако с моделированием взаимодействия деформируемого колеса с деформируемым основанием возникают трудности. Для математического описания данных процессов необходимо составление сложных систем дифференциальных уравнений n -го порядка [1].

Задача упростилась благодаря использованию систем автоматизированного проектирования (САПР), которые позволяют в программной среде моделировать различные объекты, их физико-механические свойства, изменение состояния под действием различных внешних факторов и многое другое. На сегодняшний день программы САПР применяются для проектирования не только пневматических шин, но и в целом всех элементов ходовой системы лесозаготовительных машин. Также проводятся исследования процесса качения колесного движителя по различным поверхностям движения. Ключевыми инструментами для проведения таких исследований являются программные комплексы компьютерного инженерного анализа (computer-aided engineering – CAE), основанные на методе конечных элементов (МКЭ). Они позволяют решать многие задачи, в том числе

из области механики сплошных сред и материалов. В основе МКЭ лежат две главные идеи: дискретизация исследуемого объекта на конечное множество элементов и кусочно-элементная аппроксимация исследуемых функций (например, перемещений, напряжений, скоростей, температур и т. д.) [2, 3].

Использование метода конечных элементов при исследовании взаимодействия колеса с почвенно-грунтовым основанием рассматривалось в работе многих современных ученых [4–9].

В работе [4] представлены некоторые возможности применения МКЭ для исследования деформирования грунта колесом, а именно: создание материалов с конкретными физико-механическими свойствами, задание величины и направления нагрузок, граничные условия процесса взаимодействия пневматического колеса и лесного почвогрунта и др. Кроме того, здесь рассматриваются различные варианты моделей поведения деформируемого основания и подходы к решению задач механики грунтов. Представлен общий алгоритм решения этих задач в САПР. Как показал обзор [4], данный метод позволяет получить достаточно точные данные, сопоставимые с показаниями экспериментальных исследований.

Моделированием взаимодействия деформируемой шины с деформируемой поверхностью движения занимается группа исследователей: С. А. Bekakos, G. Parazafeiropoulos и др. [5–7]. Используя метод конечно-элементного моделирования, авторы проанализировали влияние внутреннего давления воздуха в шинах и вертикальной нагрузки на площадь контакта колеса с опорной поверхностью. Результаты компьютерного моделирования были близки к значениям исследований других авторов. Кроме того, конечно-элементный анализ позволил оценить влияние условий трения колеса с поверхностью движения на площадь контакта, а также расположение нитей корда в радиальных шинах на ее жесткость и вертикальный прогиб [5].

Пример решения конкретной задачи с применением МКЭ представлен в работе [8]. В данном исследовании показана модель пневматического колеса и влияние давления воздуха в шинах на распределение напряжения в почве. При этом были выделены некоторые

участки анализируемой шины, в которых напряжения повышены, а также установлено, что средняя площадь каркаса шины подвергается наибольшим деформациям. В результате была выявлена необходимость изменения параметров пневматических шин для снижения их износа.

Сравнение поведения связных и несвязных грунтов при различных параметрах вертикальной нагрузки и давления воздуха в шинах с применением МКЭ было проведено в работе [9]. Полученные результаты были подтверждены лабораторными испытаниями, что позволило сформулировать ряд рекомендаций по минимизации уплотнения грунта.

На основании вышесказанного можно сделать вывод о том, что применение САПР как инструмента для проведения научных исследований и вычислительных экспериментов для изучения процесса взаимодействия пневматического колеса с почвогрунтом является одним из достоверных методов, а также альтернативой экспериментам, проводимых в полевых условиях с высокими материальными и трудовыми затратами.

Суть представленной работы заключается в изучении возможностей современных систем автоматизированного проектирования и инженерного анализа, а также в определении необходимых условий и данных для компьютерного моделирования исследуемого процесса.

Стоит принять во внимание, что проводимые исследования не направлены на разработку новых типов пневматических шин повышенной проходимости или материалов для их изготовления. Основные результаты проектирования и инженерного анализа изучаемого процесса в программах САПР позволяют сформулировать рекомендации по параметрам шин и задать диапазон их механических характеристик, при которых будут соблюдаться требования по минимизации негативного влияния колесного движителя на лесной почвогрунт и будет обеспечена эффективная работа машин в сложных эксплуатационных условиях [10].

Основная часть. Анализ программного обеспечения САПР. В настоящее время применяется большое количество систем САПР, которые позволяют решать различные задачи во многих областях. Выбор того или иного продукта будет зависеть от следующих факторов:

- целевое назначение (создание геометрических чертежей и 3D-моделей (CAD-системы – computer-aided design), автоматический анализ, расчет и симуляция физических процессов (CAE-системы – computer-aided engineering), автоматизированная подготовка

производства (CAM-системы – computer-aided manufacturing));

- область объекта моделирования (машиностроение, архитектура, радиоэлектроника, геоинформационные объекты и др.);

- сложность и разновидность проектируемого объекта (от простых до очень сложных объектов (свыше 10 000 составных объектов));

- уровень комплексности (одно-, многоэтапные и комплексные САПР) и др. [11].

Кроме того, по своим функциональным возможностям продукты САПР делятся на три класса:

- легкие – служат для выполнения почти всех работ с двумерными чертежами и имеют ограниченный набор функций по трехмерному моделированию;

- средние – это программные комплексы, которые объединяют в себе возможности геометрического моделирования и задания условий для автоматизированной подготовки производства;

- тяжелые – применяются для моделирования поведения сложных механических систем в реальном масштабе времени, оптимизации расчетов с визуализацией результатов и т. д. [12].

Ранее было отмечено, что для автоматизированного инженерного анализа с применением программных комплексов в основном используется метод конечных элементов (МКЭ), в особенности для анализа напряжений и деформаций. Этапы решения задач с применением данного метода включают в себя:

- 1) построение геометрических чертежей и 3D-моделей;
- 2) задание физико-механических свойств материала;
- 3) создание сетки конечных элементов;
- 4) задание нагрузок и граничных условий;
- 5) численное решение системы уравнений;
- 6) визуализация и анализ результатов [13, 14].

Выполнение задачи по исследованию процесса взаимодействия пневматического колеса с почвогрунтом может осуществляться с применением сложных комплексных программ, которые позволяют реализовывать все этапы проектирования и инженерного анализа в одной программной среде. Альтернативным вариантом может стать применение нескольких продуктов САПР, каждый из которых будет использоваться на отдельных стадиях исследовательской работы.

Для создания геометрических чертежей, схем, 3D-моделей отдельных объектов и сборных конструкций широкое применение нашли следующие CAD-системы: Компас 3D, AutoCAD 3D, NanoCAD, T-FLEX CAD, Autodesk Inventor, SolidWorks, PTC Creo, NX Siemens,

Catia и др. Для выполнения остальных этапов применяются более сложные системы инженерного анализа (CAE), которые позволяют осуществлять математический анализ, прочностные расчеты, кинематические исследования поведения разрабатываемого объекта в различных условиях: Ansys Workbench, SIMULIA Abaqus, MSC Software (Nastran, Patran, Marc и др.), LS-DYNA, COSMOS и т. д. Чаще всего в системы CAE интегрированы модули для создания и работы с геометрическими моделями. Однако в большинстве своем данный модуль требуется для упрощения или изменения формы исходной модели. Поэтому инструментарий для создания точной 3D-модели у таких систем ограничен. Основные ресурсы данных программ направлены на увеличение списка решаемых задач, расширение математического обеспечения, библиотеки материалов и конечных элементов.

Поэтому разработка геометрической модели может осуществляться и в отдельном программном пакете, так как между современными системами CAD и CAE существует интеграция и предусмотрено применение единых форматов для импорта и экспорта разрабатываемых объектов (Parasolid, Step).

Примером системы САПР, которая позволяет осуществлять все этапы моделирования и инженерного анализа, является программа **SIMULIA Abaqus**. Это универсальный программный комплекс, имеющий возможность осуществлять расчеты на основе МКЭ. Особенностью интерфейса данной программы является наличие модулей, в которых содержится определенный набор действий и инструментов для выполнения всех этапов компьютерного моделирования (рис. 1).

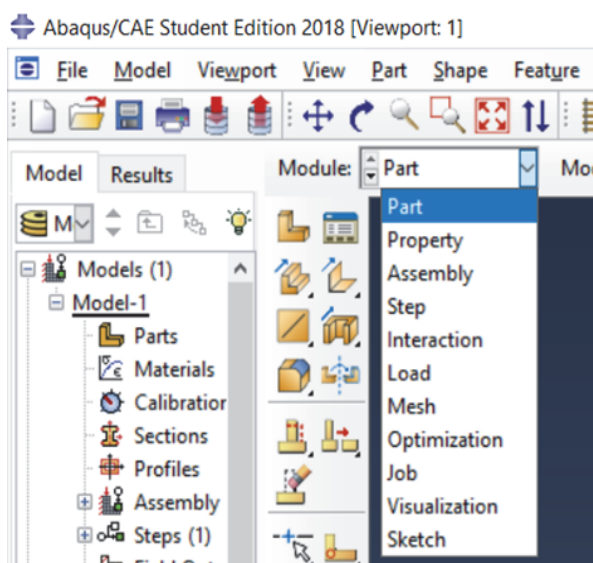


Рис. 1. Набор модулей в SIMULIA Abaqus

Функции модулей состоят в следующем:

PART – для создания деталей, задания их геометрии, опорных точек и систем координат;

PROPERTY – для задания свойств материалов, сечений, применяемых в модели;

ASSEMBLY – для задания взаимного расположения деталей, а также сборки их в единую модель;

STEP – для создания шагов расчета и определения выходных данных по результатам;

INTERACTION – для определения взаимодействий между деталями, контактными участками и их свойств;

LOAD – для создания нагрузок, прикладываемых к модели, а также начальных и граничных условий для нее;

MESH – для построения конечно-элементной сетки;

JOB – для проверки созданной модели, запуска вычислительного процесса и контроля над ним;

VISUALIZATION – для просмотра результатов расчета и обработки полученных данных;

SKETCH – для сохранения эскизов и чертежей полученной модели.

Из главных характеристик программы Abaqus в области проектирования шин можно отметить следующие:

- широкий выбор гиперэластичных моделей состояния для резиновых материалов, используемых в шине;

- возможность переноса геометрии и результатов анализа от осесимметричной модели (используемой в анализе задач посадки на диск, надува шины) к трехмерной модели (применяемой в задаче статического нагружения при контакте с дорогой);

- эффективное вычисление реакции в задаче постоянного качения шины для заданной скорости с использованием смешанного подхода Эйлера – Лагранжа в Abaqus/Standard;

- моделирование нестационарных динамических процессов для больших моделей с помощью Abaqus/Explicit [15].

Программа Abaqus дает возможности создавать пластичные, анизотропные, композитные, слоистые, гиперэластичные материалы и др., задавать их численные характеристики, особенности параметров сечения создаваемых объектов и т. д. Поэтому в данной программе можно создавать материалы и свойства для исследуемых шин и лесного почвогрунта. Причем создавать их можно как из имеющихся данных в программе, так и с использованием результатов экспериментов на нагрузку – деформации.

Для создания геометрических и объемных моделей можно рассматривать программы **КОМПАС 3D** и **NX Siemens**. Данные программы

имеют широкий инструментарий для твердотельного, поверхностного и каркасного моделирования (рис. 2).

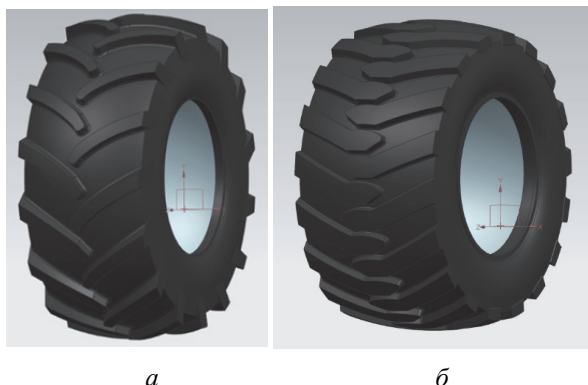


Рис. 2. Модели пневматических шин в NX Siemens:
а – 30,5L–32LS; б – 700/50-26,5

Учебная версия КОМПАС 3D является глубоко системой CAD, которая позволяет создавать сложные 3D-модели и сборочные конструкции. Интерфейс программы на русском языке и наличие большого количества инструментов позволяет быстро ее освоить и создавать достаточно точные модели исследуемых объектов. Использование данной программы для первой стадии исследовательских работ в комплексе с другими продуктами САПР также возможно, так как она позволяет сохранять создаваемые объекты и импортировать их в стандартных форматах Parasolid и Step.

Программа NX Siemens обладает более широкими возможностями по сравнению с КОМПАС 3D. Помимо модуля CAD, данный пакет позволяет создавать конечно-элементную модель (рис. 3), задавать механические свойства материала, используя при этом стандартную библиотеку, или создавать новый материал с определенными параметрами. В данной программе имеется расчетный модуль для решения различных конструкторских задач.



Рис. 3. Конечно-элементная модель пневматического колеса в NX Siemens

К сложным комплексным САПР, которые широко применяются для выполнения инженерного анализа, относится **Ansys Workbench**. В данной программе применяется МКЭ для решения широкого круга задач: линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твердого тела и конструкций, прочих задач механики [16].

В Ansys работа осуществляется с импортируемыми моделями, которые в последующем могут дорабатываться или видоизменяться перед выполнением численного моделирования. В САЕ-системах для выполнения инженерного анализа на основе геометрических моделей разрабатывается расчетная схема без существенных подробностей конструкций, которые могут усложнить расчет или сделать его невыполнимым [17].

Приведенные примеры САПР представляют собой выборку наиболее подходящих для данной области научных исследований, используемых при выполнении проектных, расчетных, технологических и научных задач. В целом анализ и обзор САПР показал, что выбор той или иной системы для выполнения научно-исследовательской работы в первую очередь зависит от области решаемой задачи и имеющихся опций в рассматриваемой системе. Следующим фактором является обеспечение импорта моделей с сохранением точности геометрии, дерева построения, последующего изменения геометрии или формы модели, ее характеристик (физико-механических и других свойств материала) и др.

Также не менее важным при выборе САПР является наличие соответствующих программ или возможности приобретения лицензированных или учебных (академических) версий ПО. Во втором случае это, как правило, бесплатные полностью рабочие продукты, но с ограниченным функционалом, например, при создании конечно-элементных моделей (для студенческой версии SIMULIA Abaqus допускается не более 1000 узлов в одном объекте, в Ansys Workbench – 32 000 узлов или элементов для прочностных задач).

Особенности создания 3D-моделей исследуемых объектов. При изучении процесса взаимодействия колесного движителя с поверхностью движения в качестве объектов исследования выступают пневматическая шина и лесной почвогрунт. Как отмечалось ранее, первым этапом вычислительного эксперимента в системах САПР является построение 3D-модели. Причем для последующих расчетов исследуемого процесса качения колеса

эти объекты необходимо создавать в «сборе», другими словами, задавать условия их взаимного расположения.

Наиболее простой является разработка 3D-модели почвогрунта. Для проводимых исследований достаточно отобразить объемную модель участка поверхности движения, которая будет испытывать на себе воздействие колеса. По периметру размеры рассматриваемого участка опорной поверхности принимаются несколько большими, чем фактический размер образуемой колеи при работе машин на слабонесущих почвах. Толщину слоя почвогрунта рекомендуется принимать равной максимальной глубине распределения напряжений под колесом (минимум 50 см). В последующем, после получения результатов расчетов и их визуализации исходные параметры исследуемого участка могут корректироваться.

Более сложными в объемном проектировании являются пневматические шины. Для последующего сравнения результатов вычислительного эксперимента в САПР с результатами теоретических и экспериментальных исследований [18] в качестве объектов исследования приняты шины передних и задних колес форвардера «Амкодор 2661-01» (см. рис. 2). Здесь представлены достаточно точные модели рассматриваемых шин с необходимой детализацией грунтозацепов. Их наличие в конструкции шин, а также их параметры необходимо учесть при исследовании процесса взаимодействия колеса с деформируемым основанием. В этом случае создание сетки конечно-элементной модели может усложняться, а последующий расчет в программной среде может занять продолжительное время. Поэтому предложено упростить форму представленной модели пневматической шины, принимая во внимание симметричность ее конструкции (рис. 4).

Несмотря на представленный разрез модели колеса, полученные результаты расчетов будут учитывать фактические размеры колеса, но при этом количество расчетов и их продолжительность будут сокращены за счет снижения числа узлов и элементов в расчетной схеме. Однако сразу следует принять допущение, что распределение нагрузки по пятну контакта также будет симметричным.

Материалы и механические свойства проектируемых объектов. Одним из ключевых факторов при выполнении расчетов исследуемых объектов шин является задание материала и его физико-механических свойств.

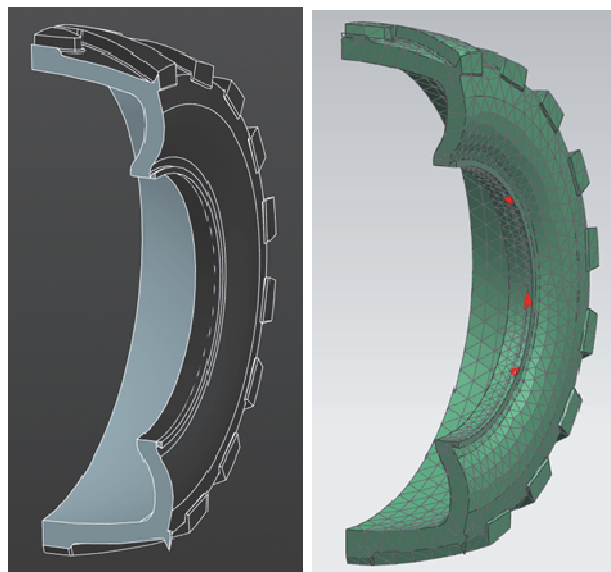


Рис. 4. Разрез пневматической шины 700/50-26.5 и ее конечно-элементная модель

Конструкция пневматических шин повышенной проходимости включает в себя каркас и брекер, армированные слоями корда, протектор, боковина, борт и др. [19]. С точки зрения механики материалов пневматическую шину можно представить в виде эластичной оболочки, состоящей из слоев армированного резино-корда с анизотропными свойствами. Механические свойства компонентов композитного материала, из которого изготовлена пневматическая шина, значительно отличаются друг от друга. Так, модуль упругости нитей корда в 2–4 раза выше, чем резины, так как первые в основном воспринимают нагрузку от внутреннего давления воздуха в шине [20, 21]. В таблице приводятся ориентировочные значения механических характеристик конструктивных элементов пневматической шины [22].

Представленные данные могут быть использованы для уточнения характеристик задаваемого материала пневматической шины. В качестве проверки точности можно провести моделирование взаимодействия проектируемой шины с жестким основанием в САПР, а полученные результаты сравнить с экспериментальными данными [18].

При задании материала лесного почвогрунта необходимо учитывать его фундаментальные свойства, которые были рассмотрены в работах ранее [23]. Так, для описания процесса деформации почвогрунта учитываются его упруго-пластично-вязкие свойства, которые характеризуются такими параметрами, как модуль деформации, коэффициент Пуассона, модуль сдвига, коэффициент вязкости, пластичности и др.

Физико-механические характеристики элементов конструкции пневматической шины [22]

Элемент	Модуль упругости, Па	Коэффициент Пуассона	Плотность материала, кг/м ³
Каркас	$(1,07-1,27) \cdot 10^8$	0,0038–0,451	1351
Брекер с нитями корда	$2,11 \cdot 10^{11}$	0,30	7860
Протектор	$14,0 \cdot 10^6$	0,45	1173
Боковина	$5,05 \cdot 10^6$	0,45	1132
Борта	$5,05 \cdot 10^6$	0,45	7860

Для более точного расчета дополнительно могут быть проведены экспериментальные исследования по определению параметров осадки штампа в зависимости от оказываемой нагрузки. Полученные данные вносятся в табличном виде и позволяют программе определить зависимость, по которой будет осуществляться расчет.

Алгоритм выполнения исследований с применением САПР. Основным преимуществом использования систем САПР является сокращение трудоемкости и времени на проведение исследований по сравнению с экспериментами в производственных условиях с реальной техникой. Но в то же время стоит принять во внимание, что качественное выполнение моделирования и расчетов в программной среде зависит от наличия необходимых данных. Поэтому первоначальная стадия работ для проведения вычислительных экспериментов в САПР должна включать в себя формулировку целей и задач проводимых исследований, сбор и подготовку исходных данных, разработку математического обеспечения, получение результатов аналитических и экспериментальных исследований.

Анализ возможностей различных продуктов САПР позволил определиться с тем, какие программные комплексы могут быть использованы для решения поставленной задачи. Так, для геометрического моделирования может быть использован NX Siemens, а последующие этапы по созданию конечно-элементной сетки, задания нагрузки, граничных условий и непосредственного расчета ведутся в Ansys Workbench.

Необходимый набор исходных данных будет формулироваться на основании объектов исследований, поставленных задач по изучению определенных процессов и получению конкретных данных.

Особенности создания геометрической модели почвогрунта были описаны ранее. Для моделирования исследуемых шин необходимо знать их типоразмер (диаметр, ширину, высоту профиля), геометрические характеристики профиля шины в сечении и параметры грунтозацепов. Создание точной модели шины возможно при наличии параметров пресс-формы соответ-

ствующего типоразмера, которая используется на производстве. При отсутствии таковых трехмерную модель шины можно создать по данным фактического обмера исследуемых шин или с использованием 3D-сканеров.

Следующий набор исходных данных включает в себя характеристики материала. С учетом исследуемых объектов в данный набор будут входить такие параметры:

- для шины: модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность материала;
- для почвогрунта: модуль деформации, коэффициент Пуассона, модуль сдвига, коэффициент вязкости, пластичности и др. Перечень задаваемых параметров будет зависеть от принятой реологической модели лесного почвогрунта.

Ключевым элементом в инженерном анализе исследуемого процесса в системах САПР является математическое обеспечение. Это имеющийся или разрабатываемый математический аппарат, на основании которого ведется расчет, анализ и оптимизация исследуемых процессов.

Проведение инженерного анализа в САПР предусматривает определение основных параметров взаимодействия движителя с опорным основанием: площади контакта, распределения давления по площади контакта и распределения напряжения по глубине почвогрунта. Исследование данных параметров необходимо проводить путем варьирования следующих показателей: вертикальная нагрузка от колеса на почвогрунт, которая будет зависеть от принимаемой массы машины, ее загруженности и распределения нагрузки по осям, физико-механических параметров пневматической шины и почвогрунта.

Оценка точности полученных результатов будет осуществляться путем сравнения их с теоретическими данными при использовании разработанной математической модели деформирования лесного почвогрунта под действием колесного движителя [23] и/или с экспериментальными данными.

Заключение. Ключевые результаты работы, представленные в данной статье, получены путем обзора литературных источников,

изучения программных комплексов САПР и их возможностей путем непосредственного выполнения задач по моделированию и проектированию. В результате был сделан вывод о целесообразности включения в общую методологию проведения научно-исследовательских работ применения современных информационных систем и технологий. Их очевидные преимущества заключаются в том, что они не только позволяют частично или полностью исключить проведение экспериментальных исследований, но и дают возможность проектировать различные конструкции и моделиро-

вать самые сложные процессы, что способствует их углубленному изучению, рассмотрению всех влияющих факторов по отдельности или в комплексе, использованию сложных математических описаний и т. д. Однако несмотря на все вышесказанное при проведении научных исследований обязательно наличие результатов экспериментальных и теоретических исследований, которые являются важной частью проверки точности и адекватности получаемых данных, а также возможности моделирования исследуемых процессов по реальным опытным значениям.

Список литературы

1. Болдовский В. Н. Исследование процессов взаимодействия ходовых систем автомобилей с деформируемой опорной поверхностью // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2012. № 5/4. С. 50–52.
2. Фокин В. Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твердого тела. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. 131 с.
3. Ширвель П. И. Основы метода конечных элементов в мехатронике: в 2 ч. Ч. 1. Минск: БНТУ, 2015. 89 с.
4. Использование метода конечных элементов для решения задач террамеханики / Д. С. Тесленко [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. 2014. № 5. С. 52–58.
5. Pneumatic tyres interacting with deformable terrains / C. A. Bekakos [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 744, no. 1. P. 1–12. DOI: 10.1088/1742-6596/744/1/012213.
6. Development of accurate pneumatic tyre finite element models based on an optimization procedure / C. A. Bekakos [et al.] // VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Crete, June 5–10th 2016. Vol. 1. Crete, 2016. P. 8262–8274.
7. Bekakos C. A., Papazafeiropoulos G. Finite element modeling of a pneumatic tyre interacting with rigid road and deformable terrain // Int. J. Vehicle Performance. 2017. Vol. 3, no. 2. P. 142–166.
8. FEM model to study the influence of tire pressure on agricultural tractor wheel deformations / S.-St. Biris [et al.] // Engineering for Rural Development: Proceedings of the 10th International Scientific Conference. Jelgava, Latvia, 26–27 May 2011. Jelgava, 2011. Ref. 9. P. 223–228.
9. Ungureanu N., Vlăduț V., Biriș S.-Șt. FEM modelling of soil behavior under compressive loads // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 163. P. 1–10. DOI: 10.1088/1757-899X/163/1/012001.
10. Мисуно Ю. И., Протас П. А. Особенности конструкции шин лесозаготовительных машин и пути их совершенствования // Технология и техника лесной промышленности: тез. докл. 82-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 6–7 февр. 2018 г. Минск, 2018. С. 27–28.
11. Бесхлебников И. В. Классификация САПР и их функциональное назначение // Международный студенческий научный вестник. 2019. № 6. URL: <https://s.eduherald.ru/pdf/2019/6/19836.pdf> (дата обращения: 15.10.2022).
12. Общие сведения о САПР. Классификация и состав САПР // ИНФОТЕХ. URL: <http://infotech.h1n.ru/gallery/sl2.pdf> (дата обращения: 20.09.2022).
13. Шимановский А. О., Путятю А. В. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики. Гомель: БелГУТ, 2008. 61 с.
14. Унянин А. Н., Евстигнеев А. Д. Моделирование и инженерный анализ с помощью программного комплекса NX. Ульяновск: УлГУ, 2017. 212 с.
15. Рыжов С. А., Ильин К. А., Варюхин А. Н. Проектирование шин с использованием программного комплекса ABAQUS // САПР и графика. 2006. № 1. URL: <https://sapr.ru/article/> (дата обращения: 05.10.2022).
16. Автоматизированное моделирование и расчет конструкций в ANSYS: одномерные модели / О. А. Саченков [и др.]. Казань: Казан. ун-т, 2019. 140 с.
17. Иванов Д. В., Доль А. В. Введение в Ansys Workbench. Саратов: Амирит, 2016. 56 с.

18. Протас П. А., Мисуно Ю. И. Исследование давления колесного движителя форвардера «АМКОДОР 2661-01» на опорную поверхность // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2017. № 2. С. 251–258.

19. Касперович А. В., Шашок Ж. С., Мозгалев В. В. Технология производства шин. Минск: БГТУ, 2011. 147 с.

20. Яковлев М. Я. Моделирование эффективных механических характеристик резинокорда при конечных деформациях: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18. М., 2014. 126 л.

21. Хотько А. В., Шилько С. В. Применение теории сетчатых оболочек при проектировании автомобильных шин диагональной конструкции // Механика машин, механизмов и материалов. 2020. № 1 (50). С. 5–11.

22. Assessment of Mechanical Properties of Offroad Vehicle Tire: Coupons Testing and FE Model Development / P. Baranowski [et al.] // Acta Mechanica et Automatica. 2012. No. 2. P. 17–22.

23. Мисуно Ю. И., Протас П. А. Решение задачи определения воздействия движителя на почвогрунт с учетом реологических факторов // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы докладов 85-й науч.-техн. конф. (с междунар. участием), Минск, 1–13 февр. 2021 г. Минск, 2021. С. 46–47.

References

1. Boldovskiy V. N. Investigation of the processes of interaction of running systems of cars with a deformable supporting surface. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern European Journal of Advanced Technology], 2012, no. 5/4, pp. 50–52 (In Russian).

2. Fokin V. G. *Metod konechnykh elementov v mekhanike deformiruyemogo tvordogo tela* [Finite element method in solid mechanics]. Samara, Samara State Technical University Publ., 2010. 131 p. (In Russian).

3. Shirvel' P. I. *Osnovy metoda konechnykh elementov v mekhatronike: v 2 chastyakh*. Chast' 1 [Fundamentals of the finite element method in mechatronics: in 2 parts. Part 1]. Minsk, BNTU Publ., 2015. 89 p. (In Russian).

4. Teslenko D. S., Belyakov V. V., Makarov V. S., Zezyulin D. V. Using the Finite Element Method to Solve Terramechanics Problems. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni R. E. Alekseeva* [Proceedings of the R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University], 2014, no. 5, pp. 52–58 (In Russian).

5. Bekakos C. A., Papazafeiropoulos G., O'Boy D. J., Prins J. Pneumatic tyres interacting with deformable terrains. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 744, no. 1, pp. 1–12. DOI: 10.1088/1742-6596/744/1/012213.

6. Bekakos C. A., Papazafeiropoulos G., O'Boy D. J., Prins J. Development of accurate pneumatic tyre finite element models based on an optimization procedure. *VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, Crete, 2016, vol. 1, pp. 8262–8274.

7. Bekakos C. A., Papazafeiropoulos G. Finite element modeling of a pneumatic tyre interacting with rigid road and deformable terrain. *International Journal of Vehicle Performance*, 2017, vol. 3, no. 2, pp. 142–166.

8. Biris S.-St., Ungureanu N., Maican E., Murad E., Vladut V. FEM model to study the influence of tire pressure on agricultural tractor wheel deformations. *Engineering for Rural Development: proceedings of the 10th International Scientific Conference*. Jelgava, Latvia, 2011, ref. 9, pp. 223–228.

9. Ungureanu N., Vlăduț V., Biris S.-Șt. FEM modelling of soil behavior under compressive loads. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 163, pp. 1–10. DOI: 10.1088/1757-899X/163/1/012001.

10. Misuno Yu. I., Protas P. A. Features of the design of forest machine tires and ways to improve them. *Tekhnologiya i tekhnika lesnoy promyshlennosti: tezisy докладов 82-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Technique and technology of the forest industry: abstracts of the 82nd scientific and technical conference of faculty, researchers and graduate students]. Minsk, 2018, pp. 27–28 (In Russian).

11. Beskhlebnikov I. V. Classification of CAD and their functional purpose. *Mezhdunarodnyy studentcheskiy nauchnyy vestnik* [International Student Science Bulletin], 2019, no. 6. Available at: <https://s.eduherald.ru/pdf/2019/6/19836.pdf> (accessed 15.10.2022) (In Russian).

12. General information about CAD. Classification and composition of CAD. Available at: <http://infoteh.h1n.ru/gallery/sl2.pdf> (accessed 20.09.2022) (In Russian).

13. Shimanovskiy A. O., Putyato A. V. *Primeneniye metoda konechnykh elementov v reshenii zadach prikladnoy mekhaniki* [Application of the finite element method in solving problems of applied mechanics]. Gomel, BelGUT Publ., 2008. 61 p. (In Russian).

14. Unyanin A. N., Evstigneev A. D. *Modelirovaniye i inzhenernyy analiz s pomoshch'yu programmnogo kompleksa NX* [Modeling and Engineering Analysis with NX Software]. Ulyanovsk, UIGU Publ., 2017. 212 p. (In Russian).
15. Ryzhov S. A., Il'in K. A., Varyuhin A. N. Tire design using the ABAQUS software package. *SAPR i grafika* [CAD and graphics], 2006, no. 1. Available at: <https://sapr.ru/article/> (accessed 05.10.2022) (In Russian).
16. Sachenkov O. A., Sachenkov A. A., Bol'shakov P. V., Gerasimov O. V. *Avtomatizirovannoye modelirovaniye i raschyot konstruktiv v ANSYS: odnomernyye modeli* [Automated Modeling and Structural Analysis in ANSYS: 1D Models]. Kazan, Kazanskiy University Publ., 2019. 140 p. (In Russian).
17. Ivanov D. V., Dol' A. V. *Vvedeniye v Ansys Workbench* [Introduction to Ansys Workbench]. Saratov, Amirit Publ., 2016. 56 p. (In Russian).
18. Protas P. A., Misuno Yu. I. Investigation of pressure of the forwarder "AMKODOR 2661-01" wheeler on the base surface. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2017, no. 2, pp. 251–258 (In Russian).
19. Kasperovich A. V., Shashok Zh. S., Mozgalev V. V. *Tekhnologiya proizvodstva shin* [Tire production technology]. Minsk, BSTU Publ., 2011. 147 p. (In Russian).
20. Yakovlev M. Ya. *Modelirovaniye effektivnykh mekhanicheskikh kharakteristik rezinokorda pri konechnykh deformatsiyakh. Dissertatsiya kandidata fiziko-matematicheskikh nauk* [Modeling the effective mechanical characteristics of the rubber cord at finite deformations. Dissertation PhD (Physics and Mathematics)]. Moscow, 2014. 126 p. (In Russian).
21. Hot'ko A. V., Shil'ko S. V. Application of the theory of mesh shells in the design of diagonal car tires. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2020, no. 1 (50), pp. 5–11 (In Russian).
22. Baranowski P., Bogusz P., Gotowicki P., Małachowski J. Assessment of Mechanical Properties of Offroad Vehicle Tire: Coupons Testing and FE Model Development. *Acta Mechanica et Automatica*, 2012, no. 2, pp. 17–22.
23. Misuno Yu. I., Protas P. A. Solving the problem of determining the impact of the mover on the soil, taking into account rheological factors. *Lesnaya inzheneriya, materialovedeniye i dizayn: materialy dokladov 85-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Forest engineering, materials science and design: proceedings of the 85th scientific and technical conference]. Minsk, 2021, pp. 46–47 (In Russian).

Информация об авторах

Мисуно Юлия Игоревна – ассистент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: julia.misuno@belstu.by

Протас Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: protas@belstu.by

Москальчук Леонид Николаевич – доктор технических наук, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, профессор кафедры лесоводства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lnm@belstu.by

Information about the authors

Misuno Yuliya Igorevna – assistant, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: julia.misuno@yandex.ru

Protas Pavel Aleksandrovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: protas@belstu.by

Moskalchuk Leonid Nikolaevich – DSc (Engineering), PhD (Agricultural), Associate Professor, Professor, the Department of Forestry. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lnm@belstu.by

Поступила 15.10.2022