

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 539.37:630\*36

**БОРИСЕВИЧ**  
Сергей Анатольевич

**ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СТВОЛА ДЕРЕВА  
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ К ОЦЕНКЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ  
НАГРУЖЕННОСТИ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Минск, 2015

Работа выполнена на кафедре теоретической механики учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

**Научный  
руководитель**

**Немцов Валентин Борисович**, доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные  
оппоненты:**

**Можаровский Валентин Васильевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной математики и программирования УО «Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины»;

**Босяков Сергей Михайлович**, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и прикладной механики Белорусского государственного университета

**Оппонирующая  
организация**

Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится 5 января 2016 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.07 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корп.1, ауд. 202, тел. ученого секретаря 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 1 декабря 2015 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций Д 02.05.07  
кандидат физ.-мат. наук

Ширвель П. И.

© Борисевич С. А., 2015

© Белорусский национальный  
технический университет, 2015

## ВВЕДЕНИЕ

Тонкие квазиодномерные структуры, подверженные большим перемещениям и поворотам, часто встречаются в различных инженерных задачах. В качестве примеров можно упомянуть компоненты высокоскоростных машин, рук манипуляторов, микроэлектронных механических структур, мостов, длинные волокна в жидкостях, стволы деревьев. Ввиду наличия в Беларуси хорошо развитых лесозаготовительной и деревообрабатывающей промышленности, актуальна задача разработки динамических моделей дерева и исследования на их основе динамики дерева и его взаимодействия с лесными машинами. Актуальность рассматриваемой тематики подтверждается включением подраздела «Лесопромышленные технологии» в Приоритетные направления научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденные Указом Президента Республики Беларусь 22.04.2015 № 166. Развитие машиностроения, ориентированного на лесную промышленность, и необходимость усовершенствования динамических расчетов машин требуют дальнейшего развития динамического моделирования сложных механических систем с учетом деформируемости дерева как объекта труда. Остаются недостаточно разработанными учет деформируемости ствола при решении различных прикладных задач, определение характеристик взаимодействия крон деревьев с воздушными потоками, геометрической структуры кроны дерева.

Диссертация посвящена решению указанных задач. Предпринятые в ней исследования представляются необходимыми и актуальными.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Связь работы с научными программами (проектами), темами*

Исследования, проведенные в диссертации, соответствуют научным направлениям кафедр теоретической механики и лесных машин и технологии лесозаготовок БГТУ, и использовались при разработке следующих научных тем:

1. БС 26-213 «Разработать и внедрить технологию применения системы машин в составе валочно-сучкорезно-раскряжевочной (харвестер) и погрузочно-транспортной (форвардер) машин с созданием харвестера для рубок промежуточного пользования на базе лесного шасси 4К4», № ГР 20065294, ГНТП «Управление лесами и рациональное лесопользование», 2006–2009 гг.
- БС 11-209 «Разработать с учетом импортозамещения перспективный типаж лесных машин «Беларус» и создать на его основе погрузочно-транспортную машину грузоподъемностью 7 тонн с улучшенными техническими характеристиками», № ГР 20115295, ГНТП «Леса Беларуси – продуктивность, устойчивость, эффективное использование», 2011–2015 гг.

### ***Цели и задачи исследования***

Целью исследования является разработка модели динамического поведения ствола дерева как упругого стержня переменного сечения при его движении в двух- и трехмерном пространствах с учетом сил сопротивления кроны, составление алгоритма интегрирования полученных уравнений движения, и изучение на основании этой модели динамики дерева в лесозаготовительных технологических процессах и эксплуатационной нагруженности лесозаготовительных машин. При этом решаются следующие задачи:

- разработка конечно-разностных моделей упругого стержня, в том числе с использованием теории стержней Коссера и с учетом свойств симметрии материала стержня;
- разработка алгоритмов компьютерного моделирования динамики полученной модели упругого стержня при его движении в двух- и трехмерном пространствах, и проверка их адекватности;
- применение разработанной модели к исследованию динамики ствола дерева и его взаимодействия с лесными машинами в лесозаготовительных процессах;
- определение силы сопротивления, действующей на крону дерева при ее обтекании воздухом;
- разработка фрактальной модели кроны дерева и определение на основе использования принципа максимума информационной энтропии геометрических характеристик распределения ее массы.

### ***Научная новизна***

Разработаны двух- и трехмерная модели деформирования упругого стержня на основании уравнений теории упругости и свойств симметрии ортотропного материала стержня в предположении равенства упругих свойств в радиальном и тангенциальном направлениях. Разработаны алгоритмы динамического моделирования полученной механической структуры, установлены критерии их сходимости и устойчивости. На основе разработанной модели проведен анализ влияния упругого ствола дерева на динамику его взаимодействия с лесными машинами в лесозаготовительных процессах. Разработана методика и определены коэффициенты сопротивления кроны дерева при ее движении. На основании принципа максимума информационной энтропии получено выражение для плотности распределения вещества кроны и определены ее динамические характеристики.

### ***Положения, выносимые на защиту***

- Механико-математическая модель упругого стержня переменного сечения из ортотропного материала, основанная на учете деформаций изгиба и кручения, позволяющая исследовать динамику движения дерева и его воздействие на рабочие органы лесных машин в технологических процессах

лесозаготовок, а также сформулировать рекомендации по выбору режимов функционирования лесозаготовительного оборудования.

- Алгоритмы динамического моделирования движения упругого стержня, основанные на использовании уравнений теории упругости, не требующие импортного программного обеспечения; критерии, определяющие сходимость и устойчивость алгоритмов при расчетах движения стержня в двух- и трехмерном пространстве, позволившие определить точность вычислений положения упругой линии ствола дерева в зависимости от числа степеней свободы моделирующей системы.

- Метод расчета и анализ взаимодействия ствола дерева с рабочими органами лесозаготовительных машин, позволяющие определить передаваемый им при этом импульс и величину силовых воздействий (возможность уменьшения коэффициента динамичности нагрузки от 2,7 до 1,9 выбором режима движения схвата), которые используются при проектировании машин для повышения их надежности.

- Механико-статистическая модель кроны дерева, основанная на фрактальных представлениях о ее строении, позволившая установить геометрические характеристики распределения ее массы, необходимые для исследования динамики движения дерева.

- Методика определения и численные значения коэффициентов сопротивления крон деревьев при обтекании их воздушной средой (для сосны изменяющихся в пределах от 25 до 85 кг/(м·с) в зависимости от размера дерева), необходимые для исследования как динамики движения дерева, так и воздействия ветровой нагрузки на деревья и прогнозирования повреждения лесных насаждений, разработки мероприятий по их защите.

#### ***Личный вклад соискателя ученой степени***

Все основные результаты, приводимые в диссертационной работе, получены автором лично. Главные направления исследований заданы научным руководителем доктором физико-математических наук, профессором Немцовым В.Б.

Соавторы статей, профессор Немцов В.Б., доцент Камлюк А.Н. участвовали в постановке задач, выборе методов их решения, а также в обсуждении полученных результатов. Соавтор Ребко Д.В. обеспечивал проведение экспериментальных исследований по определению значений коэффициентов сопротивления крон деревьев.

#### ***Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов***

Включенные в диссертацию результаты были представлены на 67-78, 80 ежегодных научно-технических конференциях БГТУ (2003-2013, 2015); VIII, IX Республиканских научно-технических конференциях студентов и

аспирантов «НИРС 2003» (Минск), «НИРС 2004» (Гродно); Международной научно-технической конференции «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов» (Минск, 2003); X Международном семинаре «Nonlinear Phenomena in Complex Systems» (Минск, 2003); Международной научно-технической конференции «Теоретическая и прикладная механика» (Минск, 2007); Международная научно-практическая конференция «Устойчивое управление лесами и рациональное лесопользование» (Минск, 2010); VI Международного симпозиума по трибофатике (Минск, 2010); V Белорусский конгресс по теоретической и прикладной механике «Механика-2011» (Минск, 2011); Международная научная конференция «Shell and Membrane Theories in Mechanics and Biology: from Macro- to Nanoscale Structures» (Минск, 2013).

### ***Опубликование результатов диссертации***

По теме диссертации опубликовано 23 научные работы, среди которых в рецензируемых научных периодических изданиях, включенных в перечень ВАК 9 статей объемом 4 авторских листа, 7 статей в рецензируемых научных периодических изданиях, 5 статей в сборниках материалов и 2 тезисов докладов на международных научных конференциях. Общий объем опубликованных материалов составляет 107 страниц.

### ***Структура и объем диссертации***

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников. Полный объем диссертации составляет 147 страниц, из них 52 иллюстрации занимают 17 страниц, 3 таблицы – 1 страница, 3 приложения. Список используемых источников содержит 139 наименований на 11 страницах, из них 23 собственные публикации автора.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

***Первая глава*** содержит обзор литературы по теме диссертации. В ней кратко изложены основные методы исследования геометрии и движения упругих стержней. Рассмотрены механические модели стержней с ограниченным числом степеней свободы. Описаны существующие модели ствола и кроны дерева. Отмечено, что в практике расчетов и конструирования лесных машин используются весьма упрощенные двух-, трех- или четырехмассовые модели ствола дерева, не способные адекватно отражать его динамику. С другой стороны, исследования упругого поведения стержней в основном сосредоточены на задачах слабых деформаций, когда не только относительные деформации, но и абсолютные перемещения точек стержней малы по сравнению с их поперечными размерами, тогда как для решения задач настоящей работы необходимо исследование сильных деформаций, когда при малости относительных деформаций абсолютные переме-

щения становятся сопоставимыми с продольными размерами стержней.

**Вторая глава** посвящена исследованию движения конечно-разностной модели стержня в двумерном пространстве. Рассмотрены модель упругого стержня Коссера, методики составления уравнений движения и их интегрирования. Модель стержня использована для исследования динамики падения дерева и его взаимодействия с лесной машиной, упругим основанием и схватом манипулятора. Исследовано влияние упругости ствола дерева на динамику его взаимодействия с основанием Винклера и лесной машиной.

При разработке модели упругого стержня переменного сечения принято во внимание, что древесина является ортотропным материалом с примерно одинаковыми упругими свойствами в радиальном и тангенциальном направлениях, для которого обобщенный закон Гука в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\sigma_{ij} = k_1 \delta_{ij} u_{ll} + 2k_2 u_{ij} + k_3 (\delta_{ij} u_{zz} + \delta_{iz} \delta_{jz} u_{ll}) + 2k_4 (u_{iz} \delta_{jz} + u_{jz} \delta_{iz}) + k_5 u_{zz} \delta_{iz} \delta_{jz},$$

где  $\sigma_{ij}$  и  $u_{ij}$  – тензоры напряжений и деформаций, соответственно,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера,  $k_m$  – упругие константы (аналоги коэффициентов Ламе), по дважды повторяющимся индексам предполагается суммирование, ось симметрии ортотропного материала направлена вдоль оси  $z$ , индексы  $i, j, l$  пробегают значения  $r, \varphi, z$ .

Методами теории упругости решена задача изгиба и установлено, что, как и в случае стержня из изотропного материала, удовлетворяется гипотеза плоских сечений, и применима элементарная теория изгиба. Показано, что коэффициенты жесткости упругих сочленений между жесткими фрагментами стержня пропорциональны модулю продольной упругости стержня и обратно пропорциональны длине фрагментов. Установлена взаимосвязь между модулем продольной упругости и аналогами коэффициентов Ламе ортотропного материала. Из полученных уравнений следуют известные результаты для случая изотропного материала.

Модель Коссера для исследуемой упругой среды представляет собой цепочку фрагментов (жестких цилиндров), соединенных упругими связями. Фрагменты могут поворачиваться друг относительно друга в плоскости. В качестве обобщенных координат приняты углы поворота цилиндров  $\varphi_k$ . Составлены общие выражения для кинетической и потенциальной энергий рассматриваемой механической модели стержня. Дифференциальные уравнения движения модели следуют из уравнений Лагранжа.

Полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений движения является линейной по обобщенным ускорениям, но сильно нелинейной по обобщенным скоростям и координатам, и может быть представлена в виде

$$\sum_{k=1}^n b_{ik}(\varphi, \dot{\varphi}) \ddot{\varphi}_k = B_i(\varphi, \dot{\varphi}), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где матрицы  $b_{ik}$  и  $B_i$  являются сложными сильно нелинейными функциями обобщенных скоростей  $\dot{\varphi}_k$  и координат  $\varphi_k$ .

Решением системы уравнений (1) является зависимость матрицы-столбца обобщенных координат  $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)^T$  от времени.

Для генерирования уравнений (1) и их последующего численного решения была разработана программа в системе компьютерной алгебры Maple. Определение вектора ускорений из системы уравнений (1) осуществлялось при помощи глобально сходящейся модификации метода Ньютона – метода Ньютона-Рафсона. Для интегрирования уравнений движения применена конечно-разностная схема. Для этой цели использована модификация алгоритма Верле, так называемая полушаговая «*leap-frog*» схема, позволяющая значительно увеличить шаг интегрирования. Следует отметить, что с точки зрения точности моделирования и величины используемых вычислительных ресурсов существуют жесткие ограничения на выбор количества фрагментов, моделирующих ствол дерева, и шага интегрирования по времени, поскольку жесткости упругих соединений достаточно велики ввиду их обратной пропорциональности длинам фрагментов.

Для проверки адекватности составленного алгоритма рассмотрена задача свободного падения ствола дерева. В качестве критерия адекватности алгоритма принято сохранение полной энергии механической системы при ее движении в отсутствие сил сопротивления. Этот критерий был использован для определения как максимально возможного шага интегрирования по времени, так и минимально допустимого количества (максимального размера) фрагментов, на которые разбивается ствол дерева, при которых решение не расходится и полная энергия системы сохраняется. Уменьшение шага по времени приводит к увеличению точности моделирования, однако увеличивает время моделирования. С другой стороны, увеличение количества фрагментов неоднозначно влияет на точность вычислений, поскольку уменьшение их длины приводит к увеличению жесткости сочленений, что в свою очередь требует уменьшения шага по времени для обеспечения устойчивости алгоритма интегрирования и требуемой точности вычислений. В результате проведенного численного эксперимента найдены оптимальный вариант для размера фрагментов разбиения  $\Delta l \leq 2$  м и величина шага по времени  $\Delta t = 10^{-3}$  с, при которых стабильность алгоритма и точность вычислений были достаточными для проводимых расчетов и, одновременно, время, затрачиваемое на моделирование, было приемлемым.

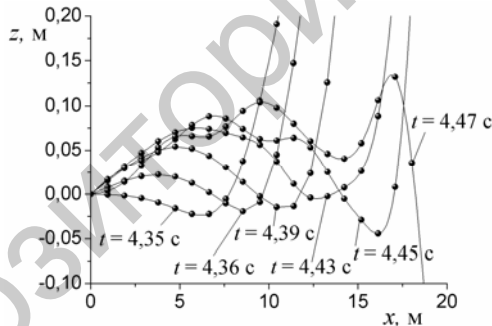
Разработанная модель упругого стержня применена к исследованию движения дерева. При этом фрагменты модели представляют собой ци-



линдры, равновеликие соответствующим усеченным конусам. Сила сопротивления, действующая со стороны кроны дерева, прикладывалась к последним фрагментам стержня в соответствии с ее расположением, и принималась линейной по скорости центров масс фрагментов.

Отмечено, что при отсутствии сил сопротивления жесткость ствола не позволяет ему существенно деформироваться, и он движется практически как абсолютно твердое тело. При наличии сил сопротивления ствол дерева заметно деформируется, и время падения значительно увеличивается.

Рассмотрено взаимодействие гибкого ствола дерева с упругим основанием, описываемым линейной моделью Винклера без демпфирования, в которой деформации поверхности пропорциональны нагрузке и полностью исчезают при ее снятии. Этому взаимодействию предшествовало свободное падение ствола дерева. Формы осевой линии ствола дерева в процессе взаимодействия с упругим основанием представлены на рисунке 1, из которого видно, что сначала, с увеличением номера соприкасающегося с основанием стержня, деформации пружин основания нарастают, затем в средней части ствола уменьшаются практически до нуля, а затем резко увеличиваются при соприкосновении с основанием последних стержней модели.

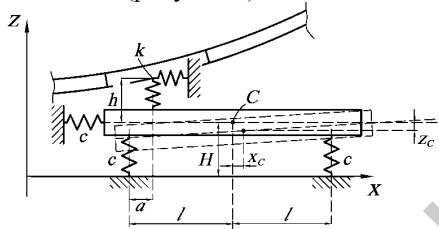


**Рисунок 1. – Упругая линия ствола дерева при взаимодействии с основанием в различные моменты времени**

Рассчитан импульс силы, производимый стволом дерева на основание, и установлено, что гибкость ствола оказывает значительное влияние на взаимодействие ствола с упругим основанием; в частности, приводит к уменьшению почти на 20% импульса, произведенного стволом дерева на упругое основание, по сравнению с жестким стержнем тех же динамических параметров.

Анализ операций технологического процесса лесозаготовительных машин показывает, что все они связаны с перемещением дерева. Изучение этого процесса необходимо при решении задач по оценке эксплуатационной нагруженности многооперационных лесозаготовительных машин. По-

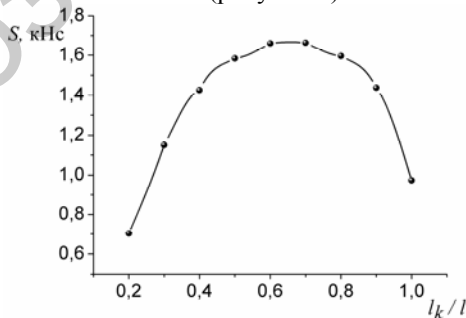
этому рассмотрено взаимодействие модели падающего дерева с моделью лесозаготовительной машины. Рассмотрены варианты упругого и неупругого взаимодействий. Для учета контактных деформаций в зоне контакта введены два упругих элемента (рисунок 2).



**Рисунок 2.** – Модель взаимодействия дерева с лесозаготовительной машиной в предположении упругого удара

Установлено, что время взаимодействия с машиной в случае неупругого удара составляет примерно 0,05 секунды, а в случае упругого удара – примерно 0,11 секунды, что примерно в два раза больше.

С целью оценки воздействия, производимого падающим деревом на лесную машину, вычислен передаваемый при этом импульс силы. Значение импульса, переданного стволу дерева машине, изменяется в зависимости от номера фрагмента, которым используется модель ствола соприкасается с машиной. Установлено, что в случае неупругого удара импульс ( $S = 1,6$  кНс), передаваемый стволу дерева, на порядок меньше чем в случае упругого удара ( $S = 13,3$  кНс). В случае упругого и неупругого удара наибольшее значение импульса, переданного стволу дерева машине, наблюдается при условии, что точка соударения ствола находится на расстоянии  $l_k/l=0,6$  от основания ствола (рисунок 3).



**Рисунок 3.** – Зависимость импульса, переданного стволу дерева машине, от значений  $l_k/l$

Рассмотрено взаимодействие модели ствола дерева с манипулятором лесозаготовительной машины. Для различных режимов движения манипу-

лятора получены графики сил, действующих на него.

С помощью нелинейного дифференциального уравнения изогнутой оси проведены расчеты на продольную устойчивость и прочность ствола дерева при его нагрузке вертикально приложенной силой. Показано, что величина прогиба сильно зависит от сбега ствола дерева.

Проведены расчеты на прочность и установлено, что для ствола со сбегом, максимальные напряжения возникают при величине безразмерной дуговой координаты приблизительно равной 0,2, отсчитанной от основания. Это значение соответствует наблюдаемым местам излома стволов деревьев при больших снегопадах.

**В третьей главе** рассмотрена общая задача движения упругого стержня в трехмерном пространстве. Стержень предполагался нерастяжимым, и пренебрегалось сдвигами поперечных сечений. Стержень моделировался как стержень Коссера, чья конфигурация описывается его осевой линией, определяемой радиус-вектором  $\mathbf{r}(s, t)$ , и тремя связанными с поперечным сечением стержня взаимно ортогональными единичными векторами  $\mathbf{d}_i(s, t)$  ( $i = 1, 2, 3$ ), где  $s$  – дуговая координата. Производная от единичных векторов по дуговой координате определяет вектор деформации  $\mathbf{u}$ :

$$\mathbf{u} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \mathbf{d}_i \times \frac{\partial \mathbf{d}_i}{\partial s}. \quad (2)$$

Производная от единичных векторов по времени определяет вектор  $\mathbf{w}$  угловой скорости вращения подвижного базиса:

$$\mathbf{w} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \mathbf{d}_i \times \frac{\partial \mathbf{d}_i}{\partial t}. \quad (3)$$

Для задания ориентации связанной системы координат  $(\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \mathbf{d}_3)$  в произвольном сечении стержня  $s$  по отношению к неподвижной системе координат  $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$  использован метод кватернионов Гамильтона, в котором вводятся четыре компоненты кватерниона в качестве обобщенных координат  $\mathbf{q} = \mathbf{q}(s, t) = (q_1, q_2, q_3, q_4)$ . Выразив единичные векторы через компоненты кватернионов и подставив их в выражения (2) и (3), получен вектор деформации и вектор угловой скорости как функции компонент кватернионов. Компоненты вектора деформации в связанной системе координат:

$$\begin{aligned} u_1 &= 2(q_1 q_4' + q_2 q_3' - q_3 q_2' + q_4 q_1'), \\ u_2 &= 2(-q_1 q_3' - q_2 q_4' + q_3 q_1' + q_4 q_2'), \\ u_3 &= 2(q_1 q_2' - q_2 q_1' - q_3 q_4' + q_4 q_3'). \end{aligned} \quad (4)$$

Проекции угловой скорости в связанной системе координат:

$$\begin{aligned}\omega_1 &= 2(q_1\dot{q}_4 + q_2\dot{q}_3 - q_3\dot{q}_2 + q_4\dot{q}_1), \\ \omega_2 &= 2(-q_1\dot{q}_3 - q_2\dot{q}_4 + q_3\dot{q}_1 + q_4\dot{q}_2), \\ \omega_3 &= 2(q_1\dot{q}_2 - q_2\dot{q}_1 - q_3\dot{q}_4 + q_4\dot{q}_3).\end{aligned}\quad (5)$$

На основании выражений (4) и (5) получены выражения для кинетической  $T$  и потенциальной  $\Pi$  энергий деформированного стержня, а также диссипативной функции  $\Phi$ , являющихся функциями компонент кватернионов. При вычислении потенциальной энергии учтены деформации изгиба и кручения стержня.

Далее проведена дискретизация стержня, для чего производные от компонент кватернионов по дуговой координате представлены как

$$q' = \frac{q_{i+1} - q_i}{\Delta s}, \quad q'' = \frac{q_{i+1} - 2q_i + q_{i-1}}{\Delta s^2},$$

где  $\Delta s$  – шаг дискретизации.

Методами теории упругости решена задача кручения стержня из ортотропного материала. Полученные выражения совпадают с таковыми для стержня из изотропного материала с тем отличием, что выражение для модуля сдвига содержит коэффициент, дополнительный к коэффициентам Ламе. Показано, что коэффициенты жесткости упругих сочленений между жесткими фрагментами стержня пропорциональны соответствующему модулю сдвига материала стержня и обратно пропорциональны длине фрагментов.

Дифференциальные уравнения движения получены на основании уравнений Лагранжа второго рода с неопределенными множителями

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_k} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_k} + \sum_{\alpha=1}^s \lambda_{\alpha} \frac{\partial \Omega_{\alpha}}{\partial q_k}, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

где  $\lambda_{\alpha}$  – множители Лагранжа;  $\Omega_{\alpha}$  – уравнения связи.

Уравнениями связи  $\Omega_{\alpha}$  являются уравнения выполнения нормы кватернионов:

$$\Omega_{\alpha} = (q_1(\alpha))^2 + (q_2(\alpha))^2 + (q_3(\alpha))^2 + (q_4(\alpha))^2 - 1, \quad \alpha = 1, 2, \dots, n.$$

Полученные из уравнений (6) дифференциальные уравнения имеют вид системы линейных уравнений относительно вторых производных по времени от компонент кватернионов:

$$\sum_{k=1}^n b_{ik}(q, \dot{q}) \ddot{q}_k = B_i(q, \dot{q}), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Решением системы уравнений (7) является зависимость матрицы-столбца обобщенных координат  $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$  от времени.

Как и в главе 2, для составления уравнений (7) и их последующего численного решения была разработана программа в системе компьютерной алгебры Maple. Определение вектора обобщенных ускорений из системы уравнений (7) осуществлялось при помощи глобально сходящейся модификации метода Ньютона – метода Ньютона-Рафсона. Для интегрирования уравнений движения применялась конечно-разностная схема на основе модифицированного алгоритма Верле.

Разработанная модель была использована для исследования движения дерева в захвате манипулятора (рисунок 4а). Воздействие манипулятора на ствол дерева моделируется двумя пружинами. Пружина с жесткостью  $c_m$  характеризует приведенную вертикальную жесткость манипулятора. Пружина с жесткостью  $c_\phi$  характеризует жесткость манипулятора, препятствующая повороту ствола в захвате. Демпфирующее свойство манипулятора определяется коэффициентом сопротивления  $\mu_m$ .

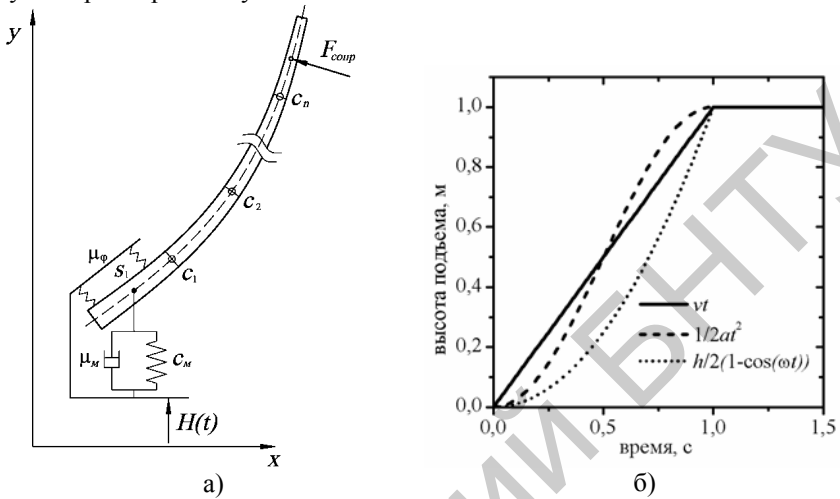
Известно, что наиболее нагруженной операцией лесозаготовительных машин с манипулятором является разгон и торможение манипулятора при перемещении дерева. Для моделирования такой ситуации на динамическую систему ствол дерева – манипулятор накладывалось кинематическое возмущение  $H(t)$  (рисунок 4б) в виде его вертикального перемещения и исследовался динамический отклик системы в начале движения, во время движения и после остановки.

Найдена сила, действующая на захват манипулятора, при подъеме дерева с различными режимами. На рисунке 5 представлены графики для режима подъема с постоянной скоростью и внезапной остановкой после первой секунды движения ( $H(t) = vt$ ).

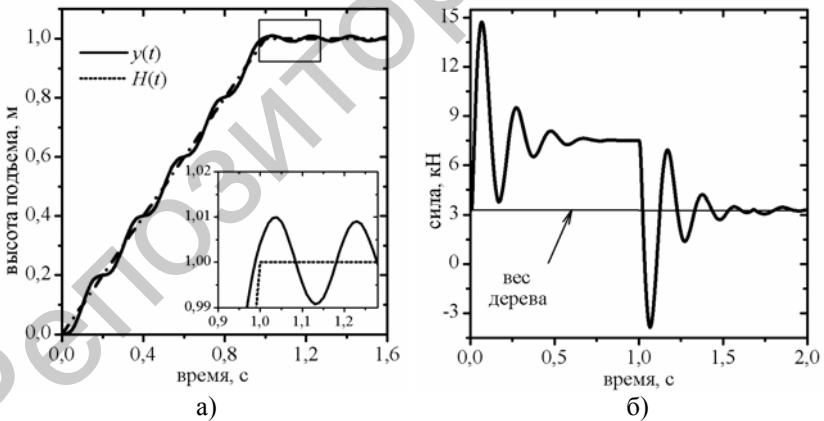
Обращает на себя внимание большая амплитуда колебаний силы, действующей на захват манипулятора, непосредственно после начала движения и остановки захвата. Значение силы, меньшее веса дерева, обусловлено ускоренным движением его центра масс вниз и влиянием сил сопротивления движению кроны, поскольку на угловые переменные связи не накладывались.

Для верификации разработанных алгоритмов было выполнено моделирование перемещения дерева манипулятором при одинаковых начальных условиях, обеспечивающих движение дерева в плоскости, для двух- и трехмерной моделей дерева. Результаты вычислений полностью совпали, что свидетельствует о правильности составленных уравнений движения и надежности разработанных алгоритмов их интегрирования, поскольку вид

дифференциальных уравнений движения принципиально отличается в двух- и трехмерном случаях.



**Рисунок 4. – Модель взаимодействия дерева с манипулятором (а) и кинематическое возмущение  $H(t)$ , накладываемое на захват манипулятора (б)**



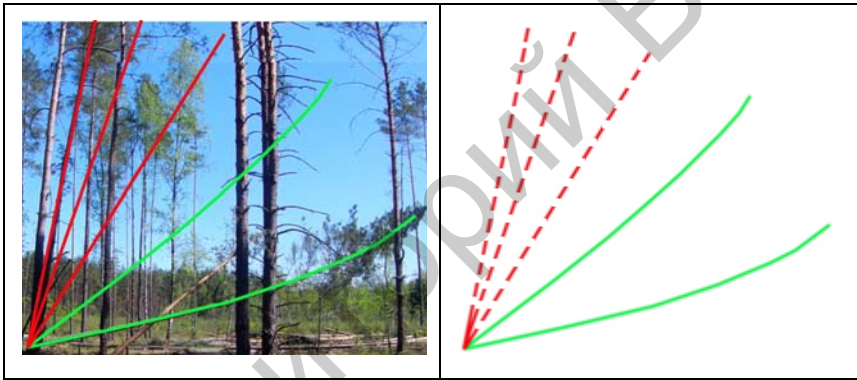
а – изменение вертикальной координаты основания стержня  $y=y(t)$  (штрих-пунктирная линия  $H=H(t)$  показывает кинематическое возмущение, наложенное на основание стержня); б – сила, действующая у основания стержня на захват манипулятора

**Рисунок 5. – Результаты моделирования**

Разработанные модели дерева, методики составления и интегрирования дифференциальных уравнений движения могут быть легко интегрированы в математические модели имитационного моделирования работы лесозаготовитель-

тельных машин для анализа нагруженности несущих конструкций на различных операциях технологического цикла при учете способов их выполнения.

**В четвертой главе** разработана методика определения и найдены коэффициенты сопротивления кроны дерева при ее движении. Для этого был произведен следующий натурный эксперимент. После срезания дерево свободно падает. Падение каждого дерева было снято на видеокамеру. После падения была измерена длина и диаметр у основания каждого дерева. По измеренным длине ствола и диаметру у основания, при известной плотности древесины, получена масса ствола дерева. По результатам видеосъемки получены фотографии падающего дерева через каждую секунду после начала падения и время движения до соприкосновения с поверхностью (время падения). На рисунке 6 представлены осевые линии ствола дерева через каждую секунду от начала падения дерева для одного из экспериментов.



**Рисунок 6.** – Фотография падающего дерева через четыре секунды после начала движения (левая панель). Показаны также положения ствола дерева через каждую секунду (на правой панели без соответствующего фона)

Из рисунка видно, что в начале падения дерева, когда скорость движения кроны невелика, силы сопротивления незначительны, и ствол дерева не деформируется. В этих положениях ствол дерева на рисунке 6 показан штриховой линией. Натурный эксперимент показал, что ствол дерева при движении не выходит из плоскости, и поэтому для моделирования движения дерева использована модель дерева и методика моделирования, подробно рассмотренные в главе 2.

Силу сопротивления воздуха, действующую на крону дерева, в соответствии с имеющимися экспериментальными данными, принимали линейной по скорости

$$\mathbf{F}_k = -\beta_k \mathbf{v}_{Ck},$$

где  $\beta_k$  – коэффициент сопротивления, действующий на  $k$ -й стержень;  $v_{ck}$  – вектор скорости центра масс  $k$ -го стержня.

Полученные для модели уравнения движения содержат неизвестные коэффициенты сопротивления  $\beta_k$ . Их невозможно получить аналитически и довольно трудно измерить экспериментально.

Было принято, что коэффициенты  $\beta_k$  отличны от нуля для нескольких последних стержней модели в соответствии с расположением кроны дерева (что соответствует натурному эксперименту) и считали, что их значения распределены по треугольному закону с максимальным значением  $\beta_{\max}$  у основания треугольника и нулевым значением на верхнем конце ствола. Ось вращения первого от основания стержня проходит через кромку среза, то есть сбрасывание дерева с пня при его движении не происходит.

Помимо неизвестного коэффициента сопротивления  $\beta_{\max}$  при моделировании процесса падения дерева неизвестной является начальная угловая скорость падения дерева  $\omega_0$ , которую ему придают вальщики для задания направления движения. Начальная угловая скорость получена из экспериментальных данных следующим образом. Очевидно, что в первые несколько секунд движения дерева его угловая скорость незначительна. Следовательно, незначительно влияние сил сопротивления, действующих на крону, о чем говорит прямолинейная форма ствола дерева в натурном эксперименте (рисунок 6). Подбирали значение начальной угловой скорости в численном эксперименте таким образом, чтобы в течение первой секунды положение осевой линии модели в численном эксперименте совпадало с осевой линией ствола дерева в натурном эксперименте.

Задавая коэффициент сопротивления  $\beta_{\max}$ , в результате интегрирования уравнений движения можно получить формы осевой линии ствола дерева в процессе его движения и время падения. Изменяя коэффициент сопротивления  $\beta_{\max}$ , и выполняя заново моделирование движения дерева, подбирали  $\beta_{\max}$  таким образом, чтобы осевая линия в численном и натурном экспериментах совпадали в любой момент времени. Сопоставляя экспериментальные данные о времени падения и форме упругой линии ствола дерева с результатами моделирования данного процесса для ряда опытов, определили границы изменения этого коэффициента (рисунок 7).

Возможность воспроизведения процесса падения дерева является также одним из аргументов, оправдывающих принятый линейный закон для силы сопротивления движению кроны.

Результаты исследования показали, что значение коэффициента сопротивления  $\beta_{\max}$  кроны сосны находится в диапазоне от 25 до 85 кг/(м·с).



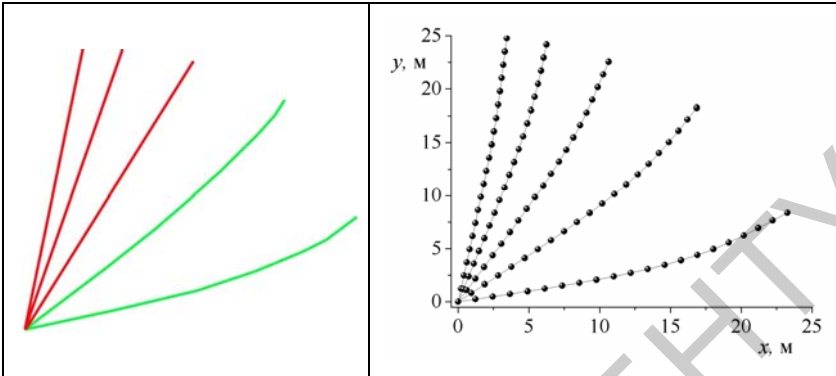


Рисунок 7. – Результаты натурального (левая панель) и численного (правая панель) экспериментов

Ряд выполненных ранее исследований показывает, что крона дерева может быть рассмотрена как фрактальный объект. На основании принципа максимума информационной энтропии получено выражение для распределения плотности вещества кроны

$$\rho(z) = d(1 + \alpha z^n)^{\frac{1}{q-1}},$$

где  $z$  – координата в пространстве состояний фрактальной системы.

Параметры  $d$ ,  $\alpha$ ,  $q$  и  $n$  определены для наиболее распространенных пород деревьев по известным экспериментальным данным методом нелинейной оптимизации Левенберга – Маркара.

Далее получена закономерность изменения плотности, связывающая между собой массу объекта и его характерный размер ( $R$ ):

$$\rho(R) = kR^\alpha + d, \quad (8)$$

где  $\alpha = D - D_f$ ;  $D = 3$  – Евклидова размерность пространства;  $D_f$  – фрактальная размерность,  $k$  и  $d$  – коэффициенты, определяемые по экспериментальным данным.

Используя выражение (8), на основании экспериментальных данных получены значения  $k$ ,  $\alpha$  и  $d$ . На основании известного характера распределения плотности в кроне найдено положение центра тяжести кроны и значения ее осевых моментов инерции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### *Основные научные результаты диссертации*

1. В результате теоретических исследований разработана механико-математическая модель деформирования упругого криволинейного стержня на основании уравнений теории упругости и свойств симметрии ортотропного материала стержня в предположении равенства упругих свойств в радиальном и тангенциальном направлениях. Модель представляет собой неразветвленную цепочку цилиндрических элементов, соединенных упругими связями, и учитывает деформации изгиба и кручения и силы сопротивления движению, что позволило применить ее к исследованию движения дерева в технологических процессах лесозаготовок. Разработаны алгоритмы динамического моделирования полученной механической структуры в двух- или трехмерном пространстве, позволяющие легко их интегрировать в математические модели имитационного моделирования работы лесозаготовительных машин для анализа нагруженности несущих конструкций на различных операциях технологического цикла [2, 4, 6, 7, 9, 13, 17, 19, 22, 23].

2. В результате численных расчетов и на основании закона сохранения энергии установлены критерии сходимости и устойчивости алгоритмов интегрирования уравнений движения моделей упругого стержня в двух- и трехмерном пространстве, позволяющие определить точность вычислений положения упругой линии ствола дерева, установить зависимость точности вычислений от числа степеней свободы системы, моделирующей исследуемую упругую среду, и минимизировать затраты машинного времени на моделирование. В результате численных экспериментов установлено, что длина фрагментов, на которые необходимо разбивать стержень, при которой погрешность вычислений не превышает 5%, составила величину  $\Delta l = 2$  м. Найден максимально возможный шаг интегрирования ( $\Delta t \approx 10^{-3}$  с), при котором обеспечивается устойчивость численного алгоритма, моделирующего исследуемую упругую среду [4, 6, 7, 9, 19].

3. На основании разработанной модели деформирования упругого стержня в результате численных экспериментов проведен анализ влияния гибкости ствола дерева на динамику его взаимодействия с лесозаготовительной машиной и упругим основанием. Показано, что гибкость ствола оказывает значительное влияние на взаимодействие ствола с упругим основанием. С целью оценки воздействия, производимого падающим деревом на лесозаготовительную машину, вычислен передаваемый при этом импульс силы. Установлено, что в случае неупругого удара импульс ( $S = 1,6$  кНс), передаваемый стволом дерева, на порядок меньше чем в случае упругого удара ( $S = 13,3$  кНс). Рассмотрено взаимодействие гибкого

ствола дерева с манипулятором лесозаготовительной машины. Получены зависимости для силы, действующей на манипулятор, позволившие определить коэффициенты динамичности нагрузки (1,9–2,7), необходимые для оценки эксплуатационной нагруженности машин, оборудованных манипулятором. Рассмотрена задача потери устойчивости ствола дерева под действием вертикальной нагрузки, показано, что максимальные напряжения возникают при величине безразмерной дуговой координаты приблизительно равной 0,2, отсчитанной от основания [3, 5, 8, 16, 18, 20].

4. На основании предложенной модели деформирования упругого стержня и натурального эксперимента по свободному падению дерева разработана методика определения коэффициентов сопротивления крон деревьев при обтекании их воздухом, на основании которой определены диапазоны изменения численных значений коэффициентов сопротивления крон наиболее распространенной породы деревьев (сосна). Для сосны их значения находятся в пределах от 25 до 85 кг/(м·с) в зависимости от размера дерева и структуры кроны [12, 14, 15, 21].

5. Разработана математико-статистическая модель кроны дерева, позволившая найти фрактальную размерность кроны дерева. На основании принципа максимума информационной энтропии получено выражение для плотности распределения массы кроны, что позволило установить геометрические характеристики распределения ее массы. На основании закона изменения плотности, связывающего между собой массу объекта и его характерный размер, найдено положение центра тяжести кроны и значения ее осевых моментов инерции, необходимых для моделирования движения дерева [1, 10, 11].

#### ***Рекомендации по практическому использованию результатов***

Основу практической значимости полученных результатов составляет широкое применение моделей деревьев при исследовании динамики лесозаготовительных машин. Результаты исследований могут быть использованы на предприятиях, проектирующих и производящих машины для лесной промышленности, в частности, ОАО «Амкорд», МТЗ, МАЗ, для изучения динамики лесных машин при заготовке и транспортировке леса, для исследования динамики манипуляторов лесных машин на лесопромышленных предприятиях Республики Беларусь.

Рекомендации по параметрам несущих конструкций многооперационных лесозаготовительных машин разработанные по результатам исследований, внедрены на ОАО «Амкорд» – управляющая компания холдинга. Также разработаны и внедрены рекомендации по приемам управления технологическим оборудованием харвестера в ГОЛХУ «Осиповичский опытный лесхоз». Разработанные модели деревьев и методы их исследования внедрены

в учебный процесс на кафедре теоретической механики и кафедре лесных машин и технологии лесозаготовок БГТУ.

Методика определения коэффициентов сопротивления крон деревьев при обтекании их воздухом внедрена в образовательном процессе ГУО «Командно-инженерный институт» МЧС для оценки влияния сильного ветра на безопасность населения и территорий в рамках темы «Защита от чрезвычайных ситуаций». Результаты исследования сопротивления крон деревьев движению воздуха могут быть использованы при прогнозировании последствий сильного ветра на лесные насаждения предприятиями Министерства лесного хозяйства и организациями Министерства по чрезвычайным ситуациям.

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК*

1. Борисевич, С. А. Геометрия масс кроны деревьев с учетом их фрактальной структуры / С. А. Борисевич // Труды БГТУ, сер. VI, физ.-мат. науки и информ. – 2003. – Вып. XI. – С. 50–54.
2. Борисевич, С. А. Разработка многоступенчатой модели гибкого ствола дерева / С. А. Борисевич, В. Б. Немцов // Труды БГТУ, сер. VI, физ.-мат. науки и информ. – 2004. – Вып. XII. – С. 47–49.
3. Борисевич, С. А. Большие прогибы деревьев под действием силы тяжести снега / С. А. Борисевич, В. Б. Немцов // Труды БГТУ, сер. VI, физ.-мат. науки и информ. – 2005. – Вып. – XIII. – С. 60–62.
4. Борисевич, С. А. Конечно-разностная схема для исследования падения ствола дерева / С. А. Борисевич // Труды БГТУ, сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2008. – Вып. XVI. – С. 104–107.
5. Борисевич, С. А. Взаимодействие падающего дерева с упругим основанием и лесной машиной / С. А. Борисевич // Труды БГТУ, сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2009. – Вып. XVII. – С. 129–133.
6. Борисевич, С. А. Численная дифференциально-разностная модель движения гибкого ствола дерева в трехмерном пространстве и алгоритм ее интегрирования / С. А. Борисевич // Труды БГТУ, сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 344–347.
7. Борисевич, С. А. Численная модель свободного падения дерева / С. А. Борисевич // Лесной журнал. – 2010. – №4. – С. 46–53.
8. Борисевич, С. А. Воздействие на лесную машину гибкого ствола дерева при его падении / С. А. Борисевич // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – Вып. 4(17). – С. 54–58.

9. Борисевич, С. А. Модель гибкого стержня в трехмерном пространстве и ее применение для описания динамики падения ствола дерева / С. А. Борисевич, А. Н. Камлюк // Известия Нац. академии наук Беларуси, Сер. физ.-матем. наук. – 2012. – № 2. – С. 69–74.

### *Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах*

10. Немцов В. Б. Использование принципа максимума информационной энтропии для описания распределения плотности вещества кроны деревьев / В. Б. Немцов, С. А. Борисевич // Межведомственный сборник научно-методических статей «Теоретическая и прикладная механика». – Минск: БНТУ, 2005. – С. 122–125.

11. Борисевич, С. А. Описание распределения плотности вещества кроны деревьев с помощью принципа максимума информационной энтропии / С. А. Борисевич, В. Б. Немцов // Труды БГТУ, сер. VI, физ.-мат. науки и информ. – 2006. – Вып. – XIV. – С. 46–48.

12. Борисевич, С. А. Определение силы сопротивления воздуха при движении кроны дерева / С. А. Борисевич // Труды БГТУ, сер. VI, физ.-мат. науки и информ. – 2007. – Вып. – XV. – С. 60–62.

13. Борисевич, С. А. Исследование движения гибкого ствола дерева с естественной кривизной в трехмерном пространстве / С. А. Борисевич // Труды БГТУ, сер. VI физ.-мат. науки и информ. – 2011. – Вып. XIX – С. 31–34.

14. Борисевич, С. А. Определение сопротивления движению кроны дерева / С. А. Борисевич, А. Н. Камлюк, Д. В. Ребко // Труды БГТУ, Сер. VI физ.-мат. науки и информ. – 2013. – № 6 (162) – С. 34–36.

15. Борисевич, С. А. Определение сопротивления кроны дерева при его движении: экспериментальные результаты и численные расчеты / С. А. Борисевич, А. Н. Камлюк, Д. В. Ребко // Научный журнал «Вестник Кокшетауского технического института МЧС РК» – № 3 (11), 2013 – С. 12–18.

16. Борисевич, С. А. Моделирование взаимодействия ствола дерева со схватом манипулятора / С. А. Борисевич // Труды БГТУ, Сер. VI физ.-мат. науки и информ. – 2015. – № 6 (179) – С. 53–57.

### *Материалы конференций*

17. Борисевич, С. А. Влияние гибкости падающего дерева на его динамические параметры / С. А. Борисевич, А. В. Жуков, В. Б. Немцов // Международная научно-техническая конференция «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов»: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–24 октября 2003 г. / Бел. гос. технол. ун-т; редкол.: И. М. Жарский (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БГТУ, 2003. – С. 379–381.

18. Борисевич, С. А. Взаимодействие падающего дерева с лесной машиной / С. А. Борисевич // Международная научно-практическая конференция

«Устойчивое управление лесами и рациональное лесопользование»: материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 18–21 мая 2010 г. / Бел. гос. технол. ун-т; редкол.: Л. Н. Рожков [и др.]. – Минск: БГТУ, 2010. – С. 83–87.

19. Борисевич, С. А. Численная дифференциально-разностная модель движения гибкого стержня в трехмерном пространстве и алгоритм ее интегрирования / С. А. Борисевич // VI Международный симпозиум по трибофатике МСТФ 2010: труды VI междунар. симпозиума по трибофатике, Минск, 25 октября–1 ноября 2010 г. В 2 ч. / Бел. гос. ун-т; редкол.: М. А. Журавков (пред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2010. – С. 275–278.

20. Борисевич, С. А. Нелинейная 3D- модель гибкого стержня и ее применение для описания динамики движения гибкого ствола дерева в захвате манипулятора / С. А. Борисевич // V Белорусский конгресс по теоретической и прикладной механике «Механика-2011»: материалы конгресса по теоретической и прикладной механике, Минск, 26–28 октября 2011 г. / НАН Беларуси; редкол.: М. С. Высоцкий [и др.]. – Минск: НАН Беларуси, – 2011. – С. 436–441.

21. Borisevich S. A. Evaluation of the resistance factor of a tree crown by numerical modeling of its movement / S. A. Borisevich, A. N. Kamluk // International Scientific Conference «Shell and Membrane Theories in Mechanics and Biology»: proceedings of the international scientific conference, Minsk, September 16–20, 2013 / Бел. гос. ун-т; редкол.: Г.И. Михасев [и др.]. – Минск: БГУ, – 2013. – С. 211–213.

### *Тезисы докладов*

22. Борисевич, С. А. Нелинейная динамика падающего дерева / С. А. Борисевич // XIII Республиканская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «НИРС 2003»: тезисы республиканской научной конф., Минск, 9–10 дек. 2003 г.: В 7 ч. / Бел. нац. техн. ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск: БНТУ, 2003. – С. 170–171.

23. Борисевич, С. А. Нелинейная ступенчатая модель падающего дерева / С. А. Борисевич // IX Республиканская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «НИРС 2004»: тезисы республиканской научной конф., Гродно, 26–27 мая 2004 г.: В 8 ч. / ГрГУ им. Янкі Купалы; редкол.: А.И. Жук (гл. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2004. – С. 75–77.

**РЭЗІЮМЭ*****Барысевіч Сяргей Анатольевіч******Динамічныя мадэлі ствала дрэў і іх прымяненне да ацэнкі  
эксплуатацыйнай нагружанасці лесанарыхтоўчых машын***

**Ключавыя словы:** пругкі стрыжань, канечна-рознасная мадэль стрыжня, дынамічная мадэль дрэва, лясная машына, ураўненне Лагранжа, лічбавае рашэнне, фрактал, крона дрэва, каэфіцыент супраціўлення.

**Мэта работы:** распрацоўка дынамічных мадэлей ствала дрэва і вывучэнне на іх аснове дынамікі ўзаемадзеяння дрэва з лясной машынай і маніпулятарам.

**Метады даследавання.** Для дасягнення пастаўленых у дысертацыі мэтаў выкарыстоўваліся ўраўненні тэорыі пругкасці, ўраўненні дынамікі сістэмы многіх тэл, камп'ютэрнае мадэляванне.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** У выніку праведзеных у дысертацыі даследаванняў распрацаваны двух-і трохмерная канечна-рознасная мадэлі ствала дрэва, якія ўлічваюць дэфармацыі выгібу і кручэння і сілы супраціўлення руху, што дазволіла прымяніць іх да даследавання руху дрэва ў тэхналагічных працэсах лесапрамысловага комплексу. Распрацаваны алгарытмы дынамічнага мадэлявання атрыманых механічных структур. Праведзены аналіз ўплыву пругкага ствала дрэва на дынаміку яго ўзаемадзеяння з ляснымі машынамі.

Распрацавана метадыка вызначэння каэфіцыентаў супраціўлення кроны дрэва пры яе руху. На аснове супастаўлення вынікаў натурнага эксперымента і камп'ютэрнага мадэлявання атрыманы каэфіцыенты супраціўлення кроны хвоі пры яе руху.

Распрацавана фрактальная мадэль кроны дрэва. На падставе прынцыпу максімуму інфармацыйнай энтрапіі атрыманы аналітычны выраз для размеркавання шчыльнасці рэчыва кроны. На падставе закона змены шчыльнасці, якая злучае паміж сабой масу аб'екта і яго характэрны памер, знойдзена становішча цэнтры цяжару кроны і значэнне яе восевых момантаў інерцыі.

**Рэкамендацыі да прымянення.** Праведзенае даследаванне можа служыць асновай для вывучэння дынамікі лясных машын пры нарыхтоўцы і транспарціроўцы лесу, для даследавання дынамікі маніпулятараў лясных машын на лесапрамысловых прадпрыемствах Рэспублікі Беларусь. Вынікі даследавання супраціўлення крон дрэў руху паветра могуць быць выкарыстаны пры прагназаванні наступстваў моцнага ветру на лясныя насаджэнні прадпрыемствамі Міністэрства лясной гаспадаркі і арганізацыямі Міністэрства па надзвычайных сітуацыях.

## РЕЗЮМЕ

*Борисевич Сергей Анатольевич*

*Динамические модели ствола дерева и их применение к оценке эксплуатационной нагруженности лесозаготовительных машин*

**Ключевые слова:** упругий стержень, конечно-разностная модель стержня, динамическая модель дерева, лесная машина, уравнение Лагранжа, численное решение, фрактал, крона дерева, коэффициент сопротивления.

**Цель работы:** разработка динамических моделей ствола дерева и изучение на их основе динамики взаимодействия дерева с лесной машиной и манипулятором.

**Методы исследования.** Для достижения поставленных в диссертации целей использовались уравнения теории упругости, уравнения динамики системы многих тел, компьютерное моделирование.

**Полученные результаты и их новизна.** В результате проведенных в диссертации исследований разработаны двух- и трехмерная конечно-разностные модели ствола дерева, учитывающие деформации изгиба и кручения и силы сопротивления движению, что позволило применить их к исследованию движения дерева в технологических процессах лесопромышленного комплекса. Разработаны алгоритмы динамического моделирования полученных механических структур. Проведен анализ влияния упругого ствола дерева на динамику его взаимодействия с лесными машинами.

Разработана методика определения коэффициентов сопротивления кроны дерева при ее движении. На основе сопоставления результатов натурного и численного экспериментов получены коэффициенты сопротивления кроны сосны при ее движении.

Разработана фрактальная модель кроны дерева. На основании принципа максимума информационной энтропии получено выражение для распределения плотности вещества кроны. На основании закона изменения плотности, связывающего между собой массу объекта и его характерный размер, найдено положение центра тяжести кроны и значения ее осевых моментов инерции.

**Рекомендации по применению.** Проведенное исследование может служить основой для изучения динамики лесных машин при заготовке и транспортировке леса, для исследования динамики манипуляторов лесных машин на лесопромышленных предприятиях Республики Беларусь. Результаты исследования сопротивления крон деревьев движению воздуха могут быть использованы при прогнозировании последствий воздействия сильного ветра на лесные насаждения предприятиями Министерства лесного хозяйства и организациями Министерства по чрезвычайным ситуациям.



## SUMMARY

*Barysevich Siarhei Anatol'evich*

### *Dynamic models of a tree stem and their application to determination of forest machines operational loading*

**Keywords:** elastic rod, finite-difference model of the rod, the dynamic model of the tree, forest machine, Lagrange's equation, numerical solution, fractal, tree crown, the resistance coefficient.

**The purpose of work:** dynamic modeling of a tree stem and investigation based on these dynamics of interaction with wood forestry machine and manipulator.

**Method of research.** In order to achieve purposes in the dissertation were used equations of the theory of elasticity, dynamic equations of many-body systems, computer simulation.

**The obtained result and their novelty.** A rod-chain model was used to study the dynamics of a tree stem in a plane. A numerical method is developed for simulating the mechanical behavior of a flexible tree stem. The motion of the flexible tree stem is determined under the resistance forces exerting on the tree crown. Flexible tree stem interaction with an elastic foundation and a forest machine is investigated as well. The numerical model is applied for calculating the impulse of force on the elastic foundation and the forest machine.

The Cosserat theory of elastic rods was used to study the three-dimensional dynamics of a tree stem. A numerical method is developed for simulating the mechanical behavior of a flexible tree stem. The motion of the flexible tree stem is determined under the resistance forces acting on the tree crown.

The method for determining the resistance of the moving tree crown was developed. The field experiment was carried out and the fall time and the form of the elastic line of a falling tree stem were obtained during the field experiment. The numerical experiment for the tree model was performed. A comparison of experiments and numerical results gave the coefficient of resistance of the tree crown assuming the linear dependence of the resistance force on the velocity.

A fractal model of the tree crown was developed. The principles of theoretical description of the distribution of tree crown density are developed on basis of methods of the modern statistical mechanics. The center of gravity of the crown and the value of its axial moment of inertia were calculated.

**Field of application.** This study can serve as a basis for studying the dynamics of forest machines in logging operations, to study the dynamics of manipulators forest machines on timber companies in the Republic of Belarus. Coefficient of resistance of the tree crown can be used by the Ministry of Forestry and the Ministry of Emergency Situations for predicting the effects of strong winds on forest plantation.

Научное издание

**БОРИСЕВИЧ**  
Сергей Анатольевич

**ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СТВОЛА ДЕРЕВА  
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ К ОЦЕНКЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ  
НАГРУЖЕННОСТИ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Подписано в печать 20.11.2015. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,09. Тираж 60. Заказ 895.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №1/173 от 12.02.2014. Пр. независимости, 65. 220013, г. Минск.