

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 630\*36:630\*243–047.43 (043.3)

**АРИКО**  
**Сергей Евгеньевич**

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВАЛОЧНО-СУЧКОРЕЗНО-  
РАСКРЯЖЕВОЧНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ РУБОК  
ПРОМЕЖУТОЧНОГО ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЯ**

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

по специальности 05.21.01 – технология и машины лесозаготовок  
и лесного хозяйства

Минск 2012

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» на кафедре лесных машин и технологии лесозаготовок

**Научный руководитель**

**Мохов Сергей Петрович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»,  
заведующий кафедрой лесных машин и технологии лесозаготовок

**Официальные оппоненты:**

**Бойков Владимир Петрович,**  
доктор технических наук, профессор,  
Белорусский национальный технический университет, заведующий кафедрой «Тракторы»

**Насковец Михаил Трофимович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»,  
заведующий кафедрой транспорта леса

**Оппонирующая организация** РУП «Минский тракторный завод»

Защита состоится «24» октября 2012 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.06 при учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» по адресу: 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, ауд. 240, корп. 4, тел. (017) 327-83-41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан «22» сентября 2012 г.

Ученый секретарь

совета по защите диссертаций  
кандидат технических наук, доцент

Мохов С.П.

**ВВЕДЕНИЕ**

В Республике Беларусь по сортиментной технологии ведется более 85% лесозаготовок, которые базируются на применении бензиномоторных пил и форвардеров. В последнее время начался процесс интенсивного оснащения предприятий отрасли машинными комплексами, состоящими из валочно-сучкорезно-раскряжевых (харвестеров) и погрузочно-транспортных (форвардеров) машин. В 2011 году учреждениями Министерства лесного хозяйства с использованием систем машин «харвестер – форвардер» заготовлено 1,23 млн. м<sup>3</sup>, что составило 13% от общего объема заготовки древесины по всем видам рубок. При этом на рубках главного пользования преимущественно эксплуатировались валочно-сучкорезно-раскряжевые машины (ВСРМ), выпуск которых освоен на РУП «Минский тракторный завод» и ОАО «Амкордор». Рубки промежуточного пользования, объем заготовленной древесины на которых в 2011 году составил 4,8 млн. м<sup>3</sup>, осуществлялись, ввиду отсутствия отечественных харвестеров, с использованием зарубежной техники, параметры которой не в полной мере соответствуют условиям эксплуатации.

В связи с этим для повышения эффективности освоения лесосек, увеличения объема заготавливаемой машинным способом древесины и решения проблемы импортозамещения является актуальным создание специализированных харвестеров, предназначенных для проведения рубок промежуточного пользования. Для достижения поставленной цели необходимо проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию параметров базового шасси и технологического оборудования валочно-сучкорезно-раскряжевой машины для рубок промежуточного пользования, что имеет научную и практическую значимость.

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Связь работы с крупными научными программами и темами. Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям инновационного развития, фундаментальных и прикладных научных исследований в Республике Беларусь на 2011–2015 гг. и научному направлению кафедры лесных машин и технологии лесозаготовок БГТУ. Диссертация выполнялась в рамках следующих НИР: БС 27-049 «Разработать и освоить производство лесозаготовительного комплекса в составе валочно-сучкорезно-раскряжевой (харвестер) и погрузочно-транспортной машин», № ГР 20073092, 2007 г. (ГНТП «Машиностроение»); БС 26-213 «Разработать и внедрить технологию применения системы машин в составе валочно-сучкорезно-раскряжевой (харвестер) и погрузочно-транспортной (форвардер) машин с созданием харвестера для рубок промежуточного пользования на базе лесного шасси 4К4»,

1637 ар

**БЕЛІЯТЭКА**  
Беларускага дзяржаўнага  
універсітэта імя С.М. Ніясіцкага

№ ГР 20065294, 2006–2009 гг. (ГНТП «Управление лесами и рациональное лесопользование»); БС 10-084 «Проведение эксплуатационных испытаний шарнира сочленения полурам новой техники, выпускаемой МТЗ», 2010 г. (Научно-техническая программа Союзного государства «Современные технологии и оборудование для производства новых полимерных и композиционных материалов, химических волокон и нитей на 2008–2011 годы»); ГБ 10-023 «Повышение эффективности работы валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины для рубок промежуточного пользования за счет выбора и обоснования параметров технологического оборудования», № ГР 20100495, 2010 г.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследований является обоснование параметров валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины для повышения эффективности освоения лесосечного фонда при проведении рубок промежуточного лесопользования машинным способом.

Для реализации поставленной цели потребовалось решение следующих задач:

1. Выполнить анализ показателей эксплуатационных свойств лесозаготовительных машин, осуществляющих валку деревьев, обрезку сучьев, раскряжевку хлыста на сортименты, и выбрать критерии их оценки.

2. Разработать методику и математическую модель для обоснования параметров базового шасси и технологического оборудования харвестера с учетом их конструктивных особенностей, условий эксплуатации, изменения таксационных характеристик насаждений и скоростей выполнения отдельных операций.

3. Провести экспериментальные исследования валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины для оценки ее устойчивости и эффективности эксплуатации на рубках промежуточного лесопользования, а также проверки адекватности разработанной математической модели.

4. Установить зависимость изменения усилия взаимодействия крон при валке деревьев от таксационных характеристик насаждений для моделирования процесса работы валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины в условиях несплошных рубок.

5. По результатам исследований разработать рекомендации по выбору параметров базового шасси и технологического оборудования, режимов эксплуатации харвестеров для рубок промежуточного пользования в заданных природно-производственных условиях.

**Объект исследования:** валочно-сучкорезно-раскряжевочная машина для рубок промежуточного пользования на базе колесного шасси 4К4.

**Предмет исследования:** показатели технико-эксплуатационных свойств, параметры базового шасси и технологического оборудования валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины.

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

– Методика обоснования параметров базового шасси и технологического оборудования валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины для рубок промежуточного пользования, позволяющая определять режимы работы и производить оценку эффективности эксплуатации харвестеров.

– Математическая модель, описывающая динамическую систему «валочно-сучкорезно-раскряжевочная машина – предмет труда» в пространстве с учетом шарнирно-сочлененного исполнения харвестера и взаимодействия крон при валке деревьев, позволяющая на основе оценки устойчивости ВСРМ при выполнении технологических операций в заданных природно-производственных условиях обосновывать параметры шасси и технологического оборудования.

– Зависимость изменения усилий взаимодействия крон при валке деревьев от таксационных характеристик насаждений, позволяющая моделировать направленную валку у дерева при проведении рубок промежуточного пользования в системе «валочно-сучкорезно-раскряжевочная машина – предмет труда».

– Полученные закономерности в виде номограмм, позволяющие выбирать параметры вылета и грузового момента гидроманипулятора, усилия протаскивания дерева при обрезке сучьев, мощность привода и массу харвестерной головки с учетом породного состава, среднего объема хлыста, интенсивности рубки, скоростей выполнения отдельных операций.

– Обоснованные параметры базового шасси и технологического оборудования валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины, обеспечивающие повышение эффективности освоения лесосек при проведении рубок промежуточного пользования машинным способом.

**Личный вклад соискателя.** Диссертация является результатом личной работы С.Е. Арико. Автором выполнен обзор конструктивных особенностей валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин и технологического оборудования, приведены их классификации, проведен анализ литературных источников, посвященных исследованию технико-эксплуатационных показателей и динамической нагруженности лесозаготовительных машин общего и специального назначения, обоснована актуальность исследований. Разработаны методика обоснования параметров валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины и математическая модель, описывающая динамическую систему «харвестер – предмет труда» в пространстве. Соискателем проведены экспериментальные исследования по установлению зависимости изменения усилия взаимодействия крон при валке деревьев от таксационных параметров насаждений, определению жесткости шин лесозаготовительной техники и оценке эксплуатационных свойств валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины для рубок промежуточного пользования, выполнены обработка и анализ полученных данных, сформулированы выводы. Автор лично участвовал в подготовке публикаций по теме диссертации,

соавторами которых являются сотрудники учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты диссертационной работы были доложены на: Международной научно-технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (БРУ, Могилев, 2008 г.); Международных научно-технических конференциях «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (БРУ, Могилев, 2008–2012 гг.); Международной научно-технической конференции «Тракторы, автомобили, мобильные энергетические средства: проблемы и перспективы развития», посвященной 80-летию со дня рождения д-ра техн. наук, профессора Скотникова Валерия Александровича (БГАТУ, Минск, 2009 г.); III и V Международных евразийских симпозиумах «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века» (УГЛТУ, Екатеринбург, 2008 г. и 2010 г.); Международной научно-технической конференции «Устойчивое управление и рациональное лесопользование» (БГТУ, Минск, 2010 г.); Международной научно-технической конференции «Инновации в машиностроении» (ОИМ НАН Беларуси, Минск, 2010 г.); Молодежном инновационном форуме «Интри» – 2010 (БНТУ, Минск, 2010 г.); Республиканской научной конференции студентов и аспирантов высших учебных заведений Республики Беларусь «НИРС – 2011» (БГТУ, Минск, 2011 г.); Научно-практическом семинаре «Взаимодействие белорусских и литовских организаций в сфере нано- и биотехнологий, оптики, машиностроения, медицины» форума «Беларусь – ЕС», проводимого в рамках Белорусской инновационной недели (БНТУ, Минск, 2011 г.); научно-технических конференциях БГТУ 2008–2012 гг. и др.

**Опубликованность результатов диссертации.** По результатам исследований опубликовано 27 печатных работ, в том числе 8 научных статей в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК по специальности, объемом 4,2 авторского листа, 3 – в научных сборниках, 14 – в материалах и тезисах научных конференций, 1 – патент, 1 – заявка на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, заключения, библиографического списка, включающего список использованных источников из 145 наименований и список публикаций соискателя из 27 наименований, приложений. Работа изложена на 225 страницах печатного текста, включая 73 иллюстрации на 58 страницах, 26 таблиц на 24 страницах, 12 приложений на 68 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** рассмотрено современное состояние, дан анализ перспектив развития лесозаготовительного производства в Республике Беларусь и обоснована необходимость применения на рубках промежуточного пользования ва-

льно-сучкорезно-раскряжевочных машин. На основе изучения особенностей конструкций харвестеров отечественного и зарубежного производств установлены основные направления совершенствования технологического оборудования и базового шасси, заключающиеся в использовании лесозаготовительной техники на колесном шасси 4К4, применении гидравлической или гидромеханической трансмиссии, установке гидроманипуляторов параллельного типа, повышении скорости выполнения технологических операций, использовании легких и средних харвестерных головок с короткой или составной рамой для обработки стволов, имеющих высокую степень кривизны, обоснованном выборе параметров харвестера исходя из условий эксплуатации.

Выполненный анализ исследований А.В. Жукова, М.С. Высоцкого, В.И. Кувалдина, Ю.И. Верховя, В.Ф. Полетайкина по совершенствованию машин общего и специального назначения, Э.А. Дваранаускаса, И.Н. Багаутдинова, М.К. Асмоловского по изучению процессов взаимодействия лесозаготовительных машин с деревом при его валке и переносе, а также ряда других работ позволил установить необходимость решения задач по обоснованию параметров и выбору режимов эксплуатации валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин для рубок промежуточного пользования, обеспечивающих повышение эффективности освоения лесосек машинным способом.

В проведенных исследованиях недостаточно полно раскрыты вопросы, связанные с рассмотрением процесса взаимодействия крон при падении деревьев, что характерно для машин, осуществляющих их валку на рубках промежуточного пользования. Решение поставленных задач требует проведения комплекса теоретических и экспериментальных исследований, разработки методики и расчетных схем, позволяющих при рассмотрении процесса взаимодействия ВСРМ с деревом учитывать особенности конструкции базового шасси, заключающиеся в шарнирно-сочлененном его исполнении, расположение и кинематику работы технологического оборудования, основные виды внешних и внутренних воздействий, приводящих к возникновению динамических нагрузок.

На основе анализа научных работ и состояния лесозаготовительного производства сформулированы цель и задачи исследований.

**Во второй главе** для различных видов рубок промежуточного пользования приведена характеристика предмета труда, с учетом которой на основе разработанной методики расчета эффективности проведения рубок промежуточного пользования проведены исследования влияния таксационных характеристик обрабатываемого древостоя, способа перемещения ВСРМ по технологическим коридорам, скоростей выполнения отдельных операций на производительность харвестера, обоснован вылет гидроманипулятора и выполнена сравнительная оценка эффективности применения на валке, раскряжевке и обрезке сучьев бензиномоторных пил, отечественных и зарубежных харвестеров.

Установлено, что на рубках промежуточного пользования расстояние между технологическими стоянками харвестера должно составлять 1–1,5 м, что при снижении производительности харвестера  $\Pi$  ( $\text{м}^3/\text{см}$ ) на 3,4% обеспечит выполнение лесоводственно-экологических требований за счет повышения коэффициента геометрической доступности древостоя до 2,5 раза. В свою очередь, увеличение ликвидного запаса древесины  $Q_{\text{га}}$  ( $\text{м}^3/\text{га}$ ) с 160  $\text{м}^3/\text{га}$  до 230  $\text{м}^3/\text{га}$  при эксплуатации ВСРМ с вылетом гидроманипулятора  $l_{\text{max}}$  (м) в 5,2–6,2 м (рисунок 1) позволяет повысить объем заготавливаемой в смену древесины на 13–14%.

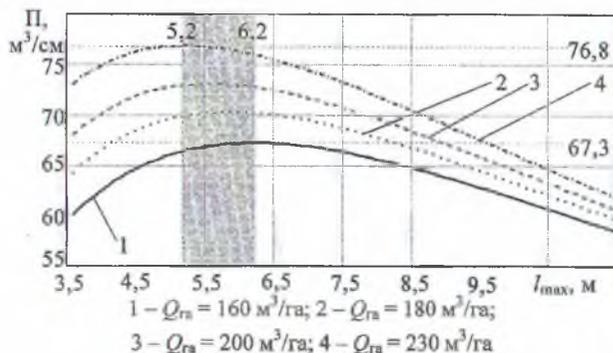


Рисунок 1 — Изменение производительности харвестера от вылета гидроманипулятора и запаса древесины

Производительности харвестера в 1,67–1,69 раза, до 0,25  $\text{м}^3$  — в 1,92–1,97 раза и требует применения гидроманипулятора с увеличенным вылетом. Существенное влияние на указанный показатель оказывает интенсивность рубки, увеличение которой с 10% до 20% позволяет повысить производительность валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины на 27,4–37,2%, а при интенсивности 30% — на 57,8–71,3%. Установлено, что увеличение скорости перемещения валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины по технологическому коридору позволяет повысить эффективную эксплуатацию харвестеров, имеющих меньший вылет гидроманипулятора, за счет увеличения объема заготавливаемой в смену древесины на 36,3%. Проведенные исследования позволили установить диапазоны изменения параметров предмета труда и условия эффективной эксплуатации валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин на рубках промежуточного пользования.

Сравнительная оценка эффективности проведения рубок промежуточного пользования показала, что лесозаготовительные работы в насаждениях со средним объемом хлыста до 0,02  $\text{м}^3$  должны проводиться ручным моторным инструментом. На прочистках и прореживании, а также других видах рубок промежуточного пользования со средним объемом хлыста не более 0,18  $\text{м}^3$  необходимо использовать малогабаритную лесозаготовительную технику, что повысит эффективность их проведения за счет снижения удельных эксплуатационных

При эксплуатации харвестера с гидроманипулятором, обеспечивающим обработку деревьев на расстоянии 7,5–9,5 м производительность снижается на 1–7% при ликвидном запасе древесины  $Q_{\text{га}} = 160 \text{ м}^3/\text{га}$  и 5–14% при  $Q_{\text{га}} = 230 \text{ м}^3/\text{га}$ . Увеличение среднего объема хлыста с 0,1  $\text{м}^3$  до 0,2  $\text{м}^3$  приводит к повышению

затрат в 1,6–2,2 раза. При проведении рубок промежуточного пользования в насаждениях со средним объемом хлыста более  $0,18 \text{ м}^3$  целесообразно использовать отечественные валочно-сучкорезно-раскряжевные машины, создание которых требует обоснованного выбора параметров харвестерной головки, гидроманипулятора и базового шасси на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований, приведенных в главах 3–5.

**Третья глава** посвящена разработке методики обоснования и выбора параметров валочно-сучкорезно-раскряжевной машины для рубок промежуточного пользования. Разработаны расчетные схемы и математические описания работы харвестерной головки при захвате, срезании и протаскивании дерева через сучкорезные ножи, которые позволяют выбирать параметры и режимы работы оборудования для различных условий эксплуатации. На основе синтеза кинематических связей отдельных элементов гидроманипулятора разработана расчетная схема, позволяющая определять положения колонны, стрелы, рукоятки, их центров масс, а также грузовой момент и мощность привода гидроманипулятора при выполнении технологических операций.

Для исследования процесса взаимодействия валочно-сучкорезно-раскряжевной машины с деревом разработана математическая модель, позволяющая на стадии расчетных исследований определять величины динамических сил в отдельных звеньях системы «харвестер – предмет труда» при различных эксплуатационно-технологических условиях работы. Модель рассматривает процесс колебаний машины в пространстве, учитывает шарнирно-сочлененное исполнение базового шасси, кинематику работы гидроманипулятора и харвестерной головки, влияние ветровой нагрузки  $F_{\text{вн}}$  (Н), сопротивление воздушной среды  $F_{\text{вс}}$  (Н) и усилия взаимодействия крон падающего и стоящих деревьев  $F_{\text{вк}}$  (Н) на процесс валки. Для реализации поставленной задачи разработана расчетная схема ВСРМ (рисунок 2), на которой приняты следующие обозначения:  $a$ ,  $b$  – расстояние от оси колес энергетического и технологического модулей до вертикально-горизонтального шарнира, м;  $a_1$ ,  $b_1$  – расстояние от центров масс энергетического модуля  $M_1$  (кг) до вертикально-горизонтального шарнира и технологического  $M_2$  (кг) до оси его колес, м;  $b_k$  – колея, м;  $L_1$  – расстояние от оси колес технологического модуля до шарнира наклона колонны, м;  $L_3$ ,  $L_4$ ,  $L_6$  – длины стрелы, кронштейна и рукоятки, м;  $L_2$ ,  $L_5$  – расстояния от шарниров крепления до центров масс стрелы  $m_c$  (кг) и рукоятки  $m_p$  (кг) соответственно, м;  $m_k$  – масса колонны, кг;  $h_b$  – свободный радиус колеса, м;  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ ,  $h_4$  – высоты расположения центров масс  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $m_k$  и шарнира крепления стрелы к колонне гидроманипулятора над продольной осью харвестера, м;  $h_5$  – расстояние от места крепления ротатора к рукоятки гидроманипулятора до шарнира наклона захватно-срезающего устройства (харвестерной головки), м;  $\alpha$  – угол отклонения рычага наклона харвестерной головки от вертикального положения, рад;  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$ ,  $J_4$ ,  $J_5$ ,  $J_6$ ,  $J_7$  – моменты инерции

энергетического модуля относительно продольной и вертикальной осей, шасси относительно оси колес технологического модуля, технологического модуля относительно его продольной оси, гидроманипулятора относительно оси его поворота, стрелы и рукояти относительно осей их вращения, кг·м<sup>2</sup>;  $c_{1D}$ ,  $k_{1D}$ ,  $c_{1T}$ ,  $k_{1T}$ ,  $c_{1D}$ ,  $k_{1D}$ ,  $c_{1T}$ ,  $k_{1T}$  – радиальные жесткости (Н/м) и коэффициенты демпфирования (Н·с/м) шин левых и правых колес энергетического и технологического модулей;  $c_{1M2}$ ,  $k_{1M2}$ ,  $c_{1M1}$ ,  $k_{1M1}$ ,  $c_{M2}$ ,  $k_{M2}$ ,  $c_c$ ,  $k_c$ ,  $c_p$ ,  $k_p$  – угловые жесткости (Н·м/рад) и коэффициенты демпфирования (Н·м·с/рад) шарнира сочленения полурам в вертикальной и горизонтальной плоскостях, привода поворота гидроманипулятора, металлоконструкций стрелы и рукояти соответственно;  $Z$  – линейное вертикальное перемещение технологического модуля, м;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_4$  – поперечно-угловые перемещения энергетического и технологического модулей, рад;  $\varphi_2$  – угол между продольными осями энергетического и технологического модулей, рад;  $\varphi_3$  – угол наклона продольной оси харвестера относительно горизонта, рад;  $\varphi_5$ ,  $\varphi_6$ ,  $\varphi_7$  – углы поворота гидроманипулятора относительно продольной оси лесозаготовительной машины, стрелы и рукояти относительно горизонта, рад;  $\varphi_1^0$ – $\varphi_7^0$  – начальные значения соответствующих обобщенных координат, рад;  $F_z(t)$ ,  $F_x(t)$ ,  $F_y(t)$  – проекции реакции в шарнире наклона харвестерной головки на соответствующие оси, Н.

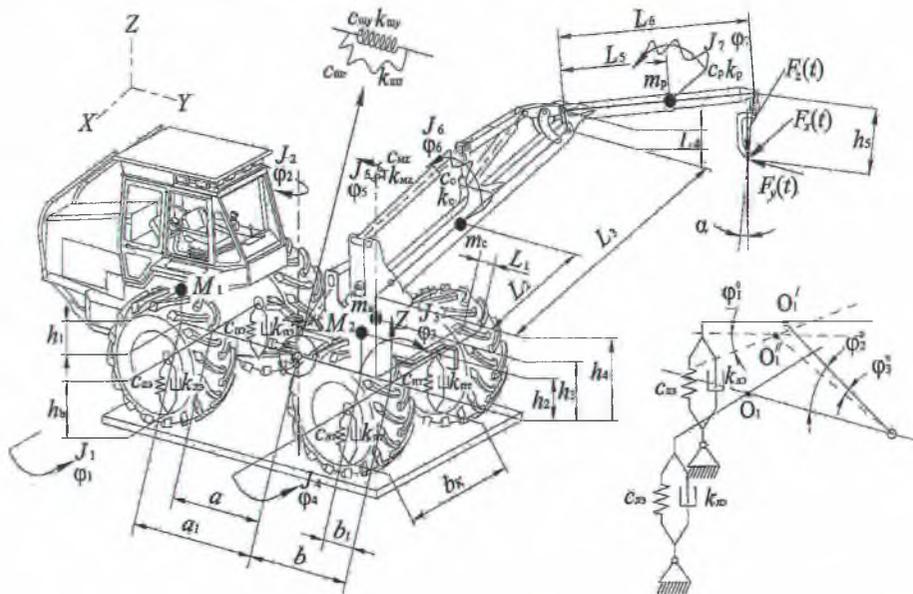


Рисунок 2 – Расчетная схема валочно-сучкорезно-раскряжевой машины

Система дифференциальных уравнений, описывающая динамические процессы, возникающие при работе валочно-сучкорезно-раскряжевой машины, составлена на основе принципа Даламбера и имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
\ddot{Z} &= [-c_{\lambda_3} \dot{\lambda}_{\lambda_3} - k_{\lambda_3} \dot{\lambda}_{\lambda_3} - c_{\lambda_{\lambda_3}} \dot{\lambda}_{\lambda_{\lambda_3}} - k_{\lambda_{\lambda_3}} \dot{\lambda}_{\lambda_{\lambda_3}} - c_{\lambda_{\lambda_3}} \dot{\lambda}_{\lambda_{\lambda_3}} - k_{\lambda_{\lambda_3}} \dot{\lambda}_{\lambda_{\lambda_3}} - c_{\lambda_{\lambda_3}} \dot{\lambda}_{\lambda_{\lambda_3}} - k_{\lambda_{\lambda_3}} \dot{\lambda}_{\lambda_{\lambda_3}} - \\
&\quad - (M_1 + M_2 + m_k + m_c + m_p)g - F_z(t)] / (M_1 + M_2 + m_k + m_c + m_p); \\
\ddot{\Phi}_1 &= [c_{\lambda_3} \dot{\lambda}_{\lambda_3} \frac{b_k}{2} \cos(\Phi_1) + k_{\lambda_3} \dot{\lambda}_{\lambda_3} \frac{b_k}{2} \cos(\Phi_1) - c_{\lambda_{\lambda_3}} \dot{\lambda}_{\lambda_{\lambda_3}} \frac{b_k}{2} \cos(\Phi_1) - k_{\lambda_{\lambda_3}} \dot{\lambda}_{\lambda_{\lambda_3}} \frac{b_k}{2} \cos(\Phi_1) + \\
&\quad + c_{\lambda_{\lambda_3}} (\Phi_4 - \Phi_4^0 - \Phi_1 + \Phi_1^0) + k_{\lambda_{\lambda_3}} (\dot{\Phi}_4 - \dot{\Phi}_1) + M_1 g h_1 \sin(\Phi_1)] / J_1; \\
\ddot{\Phi}_2 &= [-c_{\lambda_{\lambda_2}} (\Phi_2 - \Phi_2^0) - k_{\lambda_{\lambda_2}} (\dot{\Phi}_2)] / J_2; \\
\ddot{\Phi}_3 &= [-c_{\lambda_{\lambda_3}} [b + a \cos(\Phi_2) + \frac{b_k}{2} \sin(\Phi_2) \cos(\Phi_1)] \cos(\Phi_3) - k_{\lambda_{\lambda_3}} [b + a \cos(\Phi_2) + \\
&\quad + \frac{b_k}{2} \sin(\Phi_2) \cos(\Phi_1)] \cos(\Phi_3) - c_{\lambda_{\lambda_3}} [b + a \cos(\Phi_2) - \frac{b_k}{2} \sin(\Phi_2) \cos(\Phi_1)] \cos(\Phi_3) - \\
&\quad - k_{\lambda_{\lambda_3}} [b + a \cos(\Phi_2) - \frac{b_k}{2} \sin(\Phi_2) \cos(\Phi_1)] \cos(\Phi_3) - M_1 g [b + a_1 \cos(\Phi_2)] \cos(\Phi_3) + \\
&\quad + M_1 g h_1 \sin(\Phi_3) - M_2 g b_1 \cos(\Phi_3) + M_2 g h_2 \sin(\Phi_3) - m_k g L_1 \cos(\Phi_3) + m_c g h_3 \cos(\Phi_3) - \\
&\quad - c_c (\Phi_6 - \Phi_6^0) \cos(\Phi_5) - k_c (\dot{\Phi}_6) \cos(\Phi_5) - F_y(t) \sin(\Phi_5) [h_4 \cos(\Phi_3) + L_1 \sin(\Phi_3) + \\
&\quad + L_3 \sin(\Phi_6) + L_4 \cos(\Phi_7) + L_6 \sin(\Phi_7) - h_5 \cos(\alpha)] - (F_z(t) + \\
&\quad + (m_p + m_c) \cdot g) (L_1 \cos(\Phi_3) - h_4 \sin(\Phi_3)) - F_y(t) \cos(\Phi_5) (L_1 \sin(\Phi_3) + h_4 \cos(\Phi_3))] / J_3; \\
\ddot{\Phi}_4 &= [c_{\lambda_{\lambda_3}} \dot{\lambda}_{\lambda_{\lambda_3}} \frac{b_k}{2} \cos(\Phi_4) + k_{\lambda_{\lambda_3}} \dot{\lambda}_{\lambda_{\lambda_3}} \frac{b_k}{2} \cos(\Phi_4) - c_{\lambda_{\lambda_3}} \dot{\lambda}_{\lambda_{\lambda_3}} \frac{b_k}{2} \cos(\Phi_4) - \\
&\quad - k_{\lambda_{\lambda_3}} \dot{\lambda}_{\lambda_{\lambda_3}} \frac{b_k}{2} \cos(\Phi_4) - c_{\lambda_{\lambda_3}} (\Phi_4 - \Phi_4^0 - \Phi_1 + \Phi_1^0) - k_{\lambda_{\lambda_3}} (\dot{\Phi}_4 - \dot{\Phi}_1) + \\
&\quad + M_2 g h_2 \sin(\Phi_4) + m_k g h_3 \sin(\Phi_4) + F_x(t) \cos(\Phi_5) [h_4 \cos(\Phi_4) + L_3 \sin(\Phi_6) + \\
&\quad + L_4 \cos(\Phi_7) + L_6 \sin(\Phi_7) - h_5 \cos(\alpha)] + c_c \sin(\Phi_5) (\Phi_6 - \Phi_6^0) + k_c \sin(\Phi_5) \dot{\Phi}_6 + \\
&\quad + (F_z(t) + (m_p + m_c) \cdot g) h_4 \sin(\Phi_4) + F_x(t) h_4 \cos(\Phi_4)] / J_4; \\
\ddot{\Phi}_5 &= [-c_{\lambda_{\lambda_2}} (\Phi_5 - \Phi_5^0) - k_{\lambda_{\lambda_2}} \dot{\Phi}_5 - c_{\lambda_{\lambda_2}} (\Phi_2 - \Phi_2^0) - k_{\lambda_{\lambda_2}} \dot{\Phi}_2 - F_x(t) \cos(\Phi_5) [L_3 \cos(\Phi_6) - \\
&\quad - L_4 \sin(\Phi_7) + L_6 \cos(\Phi_7)] + F_y(t) \sin(\Phi_5) [L_3 \cos(\Phi_6) - L_4 \sin(\Phi_7) + L_6 \cos(\Phi_7)]] / J_5; \\
\ddot{\Phi}_6 &= [-c_c (\Phi_6 - \Phi_6^0) - k_c \dot{\Phi}_6 + c_p (\Phi_7 - \Phi_7^0) + k_c \dot{\Phi}_7 - m_c g L_2 \cos(\Phi_6) - \\
&\quad - (F_z(t) + m_p \cdot g) L_3 \cos(\Phi_6) + F_x(t) L_3 \sin(\Phi_6) \sin(\Phi_5) + F_x(t) L_3 \sin(\Phi_6) \cos(\Phi_5)] / J_6; \\
\ddot{\Phi}_7 &= [-c_p (\Phi_7 - \Phi_7^0) - k_c \dot{\Phi}_7 - m_p g [-L_4 \sin(\Phi_7) + L_5 \cos(\Phi_7)] - \\
&\quad - F_z(t) [-L_4 \sin(\Phi_7) + L_6 \cos(\Phi_7)] + F_y(t) \cos(\Phi_5) [L_4 \cos(\Phi_7) + L_6 \sin(\Phi_7) - h_5 \cos(\alpha)] + \\
&\quad + F_x(t) \sin(\Phi_5) [L_4 \cos(\Phi_7) + L_6 \sin(\Phi_7) - h_5 \cos(\alpha)]] / J_7,
\end{aligned}
\tag{1}$$

где  $\lambda_{\lambda_3}$ ,  $\dot{\lambda}_{\lambda_3}$ ,  $\lambda_{\lambda_{\lambda_3}}$ ,  $\dot{\lambda}_{\lambda_{\lambda_3}}$ ,  $\lambda_{\lambda_{\lambda_3}}$ ,  $\dot{\lambda}_{\lambda_{\lambda_3}}$ ,  $\lambda_{\lambda_{\lambda_3}}$ ,  $\dot{\lambda}_{\lambda_{\lambda_3}}$  – величины (м) и скорости (м/с) деформации шин левых и правых колес энергетического и технологического модулей.

Для описания процесса валки деревьев была разработана расчетная схема, представленная на рисунке 3, учитывающая движение дерева относительно шар-

нира наклона харвестерной головки, действия ветровой нагрузки, воздушной среды, взаимодействие крон деревьев.

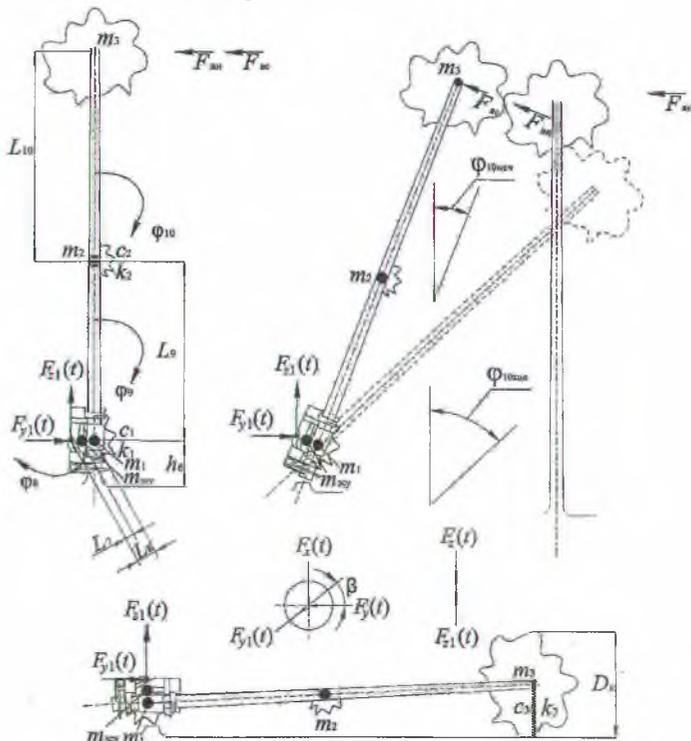


Рисунок 3 – Расчетная схема направленной валки дерева

Система дифференциальных уравнений описывающая процесс падения дерева имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \ddot{\varphi}_8 &= [m_{3cy}gL_7 \cos(\varphi_8) + m_1gL_8 \cos(\varphi_8) + c_1(\varphi_9 - \varphi_8) + k_1(\dot{\varphi}_9 - \dot{\varphi}_8) + \\
 &+ ((m_3 + m_2)g - (F_{bc} + F_{bk} + c_3\dot{\lambda}_3 + k_3\dot{\lambda}_3)\sin(\varphi_{10}))L_8 \cos(\varphi_8) - \\
 &- (F_{bh} + (F_{bc} + F_{bk} + c_3\dot{\lambda}_3 + k_3\dot{\lambda}_3)\cos(\varphi_{10}))L_8 \cos(\varphi_8)] / J_8; \\
 \ddot{\varphi}_9 &= [m_2gL_9 \sin(\varphi_9) + c_2(\varphi_{10} - \varphi_9) + k_2(\dot{\varphi}_{10} - \dot{\varphi}_9) - c_1(\varphi_9 - \varphi_8) - \\
 &- k_1(\dot{\varphi}_9 - \dot{\varphi}_8) + (m_3g - (F_{bc} + F_{bk} + c_3\dot{\lambda}_3L_{10} + k_3\dot{\lambda}_3)\sin(\varphi_{10}))L_9 \sin(\varphi_9) - \\
 &- (F_{bh} + (F_{bc} + F_{bk} + c_3\dot{\lambda}_3 + k_3\dot{\lambda}_3)\cos(\varphi_{10}))L_9 \cos(\varphi_9)] / J_9; \\
 \ddot{\varphi}_{10} &= [m_3gL_{10} \sin(\varphi_9) - c_2(\varphi_{10} - \varphi_9) - k_2(\dot{\varphi}_{10} - \dot{\varphi}_9) - F_{bc}L_{10} - F_{bh}L_{10} \cos(\varphi_{10}) - \\
 &- F_{bk}L_{10} - c_3\dot{\lambda}_3L_{10} - k_3\dot{\lambda}_3L_{10}] / J_{10},
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $h_6$  – расстояние от поверхности земли до шарнира наклона захватно-срезающего устройства (ЗСУ), м;  $\varphi_8 - \varphi_{10}$  – угловые перемещения центра масс ЗСУ  $m_{3cy}$  (кг), центров тяжести масс  $m_1$  (кг),  $m_2$  (кг) и  $m_3$  (кг) дерева, рад;  $J_8 - J_{10}$  –

моменты инерции масс  $m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$ , кг·м<sup>2</sup>;  $\Phi_{10нач}$ ,  $\Phi_{10кон}$  – углы начала и окончания взаимодействия крон деревьев, рад;  $L_7$ ,  $L_8$  – расстояния от шарнира наклона ЗСУ до  $m_{эсу}$  и  $m_1$  соответственно, м;  $L_9$ ,  $L_{10}$  – расстояние от сосредоточенных масс  $m_1$  и  $m_3$  до центра тяжести дерева, м;  $D_k$  – диаметр кроны, м;  $\beta$  – угол между продольной осью харвестера и направлением валки, рад;  $c_1$ ,  $k_1$ ,  $c_2$ ,  $k_2$  – угловые жесткости (Н·м/рад) и коэффициенты демпфирования (Н·м·с/рад) безинерционных стержней, соединяющих дискретные массы дерева;  $c_3$ ,  $k_3$  – линейная жесткость (Н/м) и коэффициент демпфирования (Н·с/м) кроны;  $F_{z1}(t)$ ,  $F_{y1}(t)$  – вертикальная и горизонтальная составляющие реакции в шарнире наклона ЗСУ, Н;  $\lambda_3$ ,  $\dot{\lambda}_3$  – величина (м) и скорость (м/с) деформации кроны.

При математическом моделировании процесса взаимодействия валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины с деревом системы дифференциальных уравнений (1) и (2) решались совместно в математическом пакете Mathcad 14.0 на основе использования неявного жестко-устойчивого метода Рунге - Кутты до 5-го порядка точности с возможностью обработки ленточных матриц Якоби. Оценка адекватности математической модели выполнена путем сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований, относительная погрешность которых не превышает 9,9%.

Разработанный метод и математическая модель позволили получить зависимости для определения мощности, затрачиваемой на выполнение отдельных операций, привод харвестерной головки, гидроманипулятора, усилия протаскивания дерева при обрезке сучьев от параметров обрабатываемого древостоя. В результате реализации математической модели установлены реакции под колесами энергетического и технологического модулей, позволившие на основе оценки устойчивости валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины при выполнении технологических операций, обосновать параметры базового шасси.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям эксплуатационных свойств валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины с колесной формулой 4К4 и установлению влияния таксационных параметров древостоя на усилие взаимодействия крон при их падении. При проведении исследований использовалась измерительная аппаратура: восьмиканальный многофункциональный измерительный усилитель «Spider 8», портативный переносный компьютер, тензометрические датчики вертикальных нагрузок УД-1, датчики силы U9B. Регистрация определяемых параметров производилась тензометрическим методом с относительной погрешностью 0,5%.

Экспериментальные исследования проводились на опытном образце валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины МЛХ-414 с колесной формулой 4К4 в различных природно-производственных условиях. Установлено, что максимальные динамические реакции под колесами харвестера возникают при выполнении предварительного натяга дерева и превышают статические в

1,12–1,46 раза, а сталкивание зависшего дерева и последующая его обработка сопровождались увеличением реакции на 10–18% и 5–7% соответственно. В результате обработки данных исследований получены зависимости перераспределения нагрузок между колесами харвестера в процессе создания предварительного натяга дерева в различных точках рабочей зоны.

В случае поворота гидроманипулятора в одну из сторон реакция под колесом соответствующего борта технологического модуля возрастает в 1,11–1,14 раза, а энергетического – в 2,33–2,46. Отрыв колеса технологического модуля МЛХ-414 наступает при вылете гидроманипулятора 7,8 м, а потеря устойчивости, сопровождающаяся отрывом колес одного борта, – при вылете 8,3 м.

Установлено, что на устойчивость харвестера оказывают влияние параметры шин. В процессе исследований определена жесткость устанавливаемых на харвестер шин 30,5L-32LS, которая изменяется в диапазоне 116,4–312,8 кН/м, обеспечивая обработку древостоя со средним объемом хлыста до 0,27 м<sup>3</sup> на вылете гидроманипулятора 7,3 м. Наполнение объема шин на 75–80% жидкостью увеличивает жесткость в 4–5 раз и позволяет проводить лесозаготовительные работы на максимальном вылете гидроманипулятора в 9,5 м.

Исследования влияния таксационных характеристик насаждений на усилие взаимодействия крон при валке деревьев проводились в условиях Негорельского учебно-опытного лесхоза. Измерения усилий осуществлялись для сосны и ели, которые имели различные параметры ствола и кроны.



**Рисунок 4 – Процесс подъема и опускания дерева**

ных значениях максимальной площади их взаимодействия  $S_{\max}$  (м<sup>2</sup>).

Обработка полученных данных позволила установить зависимость для определения усилия взаимодействия крон при валке деревьев (3).

$$F_{\text{вк}} = 4 \cdot k_4 \cdot S_{\max} \cdot \left( \frac{x}{x_{\max}} - \left( \frac{x}{x_{\max}} \right)^2 \right) + k_5, \quad (3)$$

где  $k_4$ ,  $k_5$  – коэффициенты (для сосны  $k_4 = 863 \text{ Н/м}^2$ ,  $k_5 = 168 \text{ Н}$ ; для ели  $k_4 = 777 \text{ Н/м}^2$ ,  $k_5 = 151 \text{ Н}$ );  $x$ ,  $x_{\max}$  – текущее и максимальные значения пути взаимодействия крон, м.

Экспериментальные исследования подтвердили результаты, полученные с использованием разработанной математической модели.

В пятой главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию параметров валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины, на основе которых получены закономерности, представленные в виде номограмм (рисунки 5 и 6). Установлено, что в зависимости от среднего объема хлыста  $V_{хл}$  ( $м^3$ ) и породного состава насаждений требуемое усилие на обрезку сучьев изменяется в широком диапазоне. При обработке деревьев с  $V_{хл} = 0,27 м^3$  величина усилия протаскивания дерева при обрезке сучьев  $F_{пр}$  (Н) достигает 17,9 кН для сосны и 12,7 кН для березы (рисунок 5). Для эффективной работы харвестерной головки необходимо обеспечить протаскивание дерева со средней скоростью  $v_{ср}^{пр}$  (м/с), равной 2,7–5,2 м/с, при этом потребляемая на протаскивание мощность  $N_{пр}$  (Вт) находится в пределах 57–109 кВт. Меньшее значение мощности требуется на осуществление привода захватных рычагов  $N_{зр}$  (2–8 кВт) и механизма срезания дерева  $N_{в}$  (5–16 кВт). Изменение массы харвестерной головки  $m_{зсу}$  (кг) от величины раскрытия сучкорезных ножей  $D_{сн}$  (м), определяемой исходя из диаметра обрабатываемого дерева на высоте 1,3 м  $d_{1,3}$  (м), учитывалось при обосновании параметров шасси.

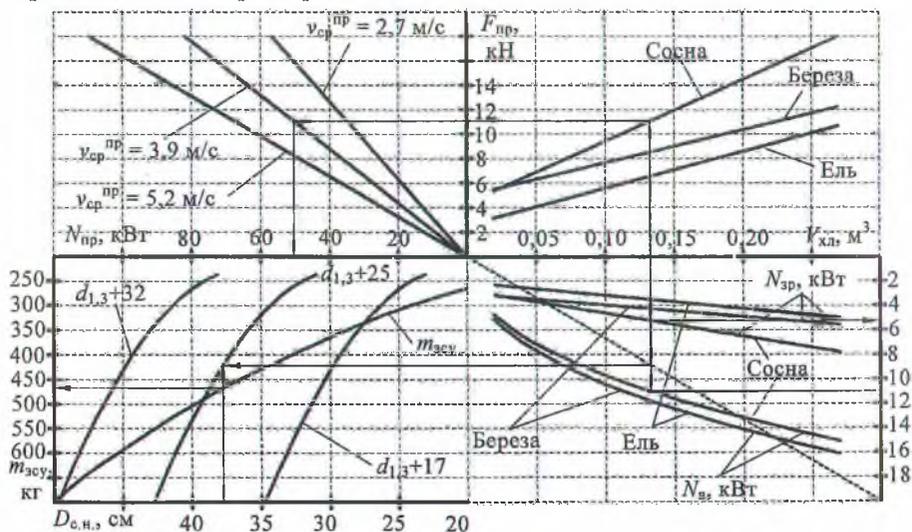


Рисунок 5 – Номограмма определения параметров харвестерной головки

Приведенная на рисунке 6 номограмма позволяет определить эффективный вылет гидроманипулятора  $l_{эф}$  (м), который зависит от среднего объема хлыста, скорости наведения ЗСУ на дерево  $v_{зсу}^н$  (м/с), интенсивности рубки  $i$  и скорости движения лесной машины  $v_{лв}$  (м/с) (рисунок 6). На харвестерах, предназначенных для проведения прочисток и прореживаний,  $l_{эф}$  составляет 5,2–5,6 м, для ру-

бок ухода в типичном древостое – 5,6–6,8 м, для проходных рубок – 5,9–7,1 м, для выборочных санитарных рубок – 8,4–10,1 м. Величина вылета гидроманипулятора влияет на грузовой момент, который при проведении прочисток и прореживаний должен составлять 25,6–39,8 кНм, рубок ухода в типичном древостое – 37,3–61,2 кНм, проходных рубок – 45,1–71,7 кНм, выборочных санитарных рубок – 64,3–102,1 кНм.

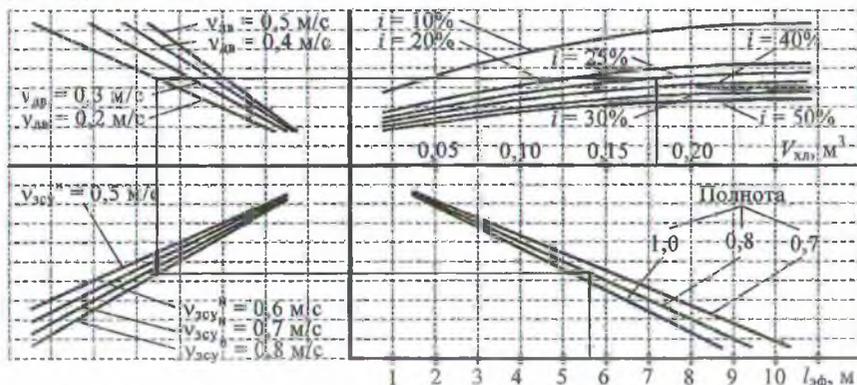


Рисунок 6 – Номограмма определения максимального вылета гидроманипулятора

Результаты исследований позволили установить зависимости изменения массы харвестера от его ширины с учетом применения технологического оборудования, имеющего различные эксплуатационные характеристики. Установлено, что харвестеры, предназначенные для проведения прочисток и прореживаний, должны иметь ширину 2,08–2,24 м, массу 4357–5127 кг при установке гидроманипулятора массой 862 кг и харвестерной головки массой 345 кг. Харвестеры для рубок ухода в типичных для Республики Беларусь условиях должны иметь ширину не более 2,24 м и полную массу 4448–6798 кг, для проходных рубок – массу от 5342 кг до 7877 кг и ширину 2,36–2,84 м. Установка выпускаемых в настоящее время харвестерных головок и гидроманипуляторов массой 619 кг и 1184 кг для рубок ухода, 655 кг и 1115 кг для проходных рубок увеличивает массу харвестеров до 9920–14750 кг и 10870–15680 кг соответственно.

Увеличение массы технологического оборудования и базового шасси, при аналогичной ширине харвестера, требует применения шин с большей жесткостью. На валочно-сучкорезно-раскряжевочных машинах, имеющих технологическое оборудование максимальной (минимальной) массы, рекомендуется применение шин с жесткостью: 730–1275 кН/м (410–675 кН/м) на прочистке и прореживании; 550–1335 кН/м (280–720 кН/м) – на рубках ухода в типичном древостое; 520–1115 кН/м (300–615 кН/м) – на проходных рубках; 485–970 кН/м (290–565 кН/м) – на выборочных санитарных рубках.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Предложена разработанная методика обоснования параметров валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины [3-А, 10-А, 21-А], позволяющая определять режимы работы и эффективность ее применения на рубках промежуточного пользования [22-А, 23-А, 25-А] на основе комплексной оценки эксплуатационных свойств ВСРМ с учетом особенностей конструкций харвестерной головки [2-А, 27-А], гидроманипулятора [1-А, 2-А, 12-А, 14-А, 26-А], базового шасси [2-А] и технологии проведения рубок промежуточного пользования [9-А].

2. Разработана математическая модель [5-А, 10-А, 11-А, 15-А, 18-А, 20-А], позволяющая производить оценку устойчивости валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины [5-А, 11-А, 18-А] и выбирать параметры базового шасси [13-А, 16-А, 17-А, 24-А] с учетом шарнирно-сочлененного исполнения рамы, движения дерева относительно шарнира наклона харвестерной головки, действия ветровой нагрузки, воздушной среды, взаимодействия крон деревьев. Реализация модели позволила установить, что для обеспечения устойчивости ВСРМ и удовлетворения лесоводственным требованиям ширина и масса харвестера для проведения прочисток и прореживаний должны составлять 2,08–2,24 м и 4357–5127 кг, для рубок ухода в типичном древостое – 2,24–2,72 м и 4448–6798 кг, проходных рубок в типичном древостое – 2,36–2,84 м и 5342–7877 кг, выборочных санитарных рубок – 2,84–3,2 м и 6253–10538 кг [3-А, 5-А, 11-А]. Оценка адекватности математической модели выполнена путем сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований, относительная погрешность которых не превышает 9,9%.

3. Установлена зависимость усилия взаимодействия крон при валке деревьев от таксационных параметров насаждений, которая позволяет моделировать процесс падения дерева в системе «валочно-сучкорезно-раскряжевочная машина – предмет труда». Экспериментально определена величина усилия взаимодействия крон ели при максимальной площади соприкосновения, равной 2,72 м<sup>2</sup>, которая составляет 2,33 кН, а усилие взаимодействия крон сосны, при аналогичной площади соприкосновения, ниже на 7–13% [8-А].

4. Экспериментальные исследования опытного образца валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины МЛХ-414 показали, что при выполнении технологических операций наибольшие нагрузки возникают в процессе создания предварительного натяга дерева, при этом величины динамических реакций под колесами технологического модуля превышают статические в 1,12–1,46 раза, а столкновение зависшего дерева и последующая его обработка сопровождались увеличением реакции на 10–18% и 5–7% соответственно [4-А].

5. Получены закономерности в виде номограмм, отражающие влияние таксационных показателей насаждений на выбор параметров технологического

оборудования валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины для рубок промежуточного пользования, позволившие установить:

– с целью повышения эффективности проведения рубок промежуточного пользования [23–А, 25–А] харвестеры должны оснащаться гидроманипуляторами с вылетом 5,2–5,6 м и грузовым моментом 25,6–39,8 кНм на прочистках и прореживаниях, 5,6–5,8 м и 37,3–61,2 кНм на рубках ухода в типичном древостое, 5,9–7,1 м и 45,1–71,7 кНм на проходных рубках, 8,4–10,1 м и 64,3–102,1 кНм на выборочных санитарных рубках [3–А, 6–А, 7–А];

– наибольшая мощность двигателя требуется на привод харвестерной головки и составляет 30–57 кВт при эксплуатации ВСРМ на прочистках и прореживаниях, 43–82 кВт – рубках ухода в типичном древостое, 57–109 кВт – проходных и выборочных санитарных рубках, что позволит реализовывать необходимые для обрезки сучьев усилия протаскивания соответственно в 8,8 кН, 13,9 кН и 17,9 кН [6–А]. С учетом совмещения наиболее энергоемкой операции по обрезке сучьев с подтаскиванием дерева к месту обработки [3–А, 4–А] мощность двигателя ВСРМ для рубок промежуточного пользования должна быть на 10–27% больше требуемой на привод харвестерной головки, что обеспечит повышение производительности на 3–5%.

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

1. Результаты исследований внедрены при создании опытного образца харвестера МЛХ-414 [5–А, 19–А], эксплуатационно-технологические испытания которого подтвердили эффективность его применения на рубках промежуточного пользования со средним объемом хлыста 0,21–0,27 м<sup>3</sup> при вылете гидроманипулятора 7,3 м. Установлено, что обработку древостоя на максимальном вылете гидроманипулятора в 9,5 м следует производить на выборочных санитарных рубках, при этом для обеспечения устойчивости шины харвестера необходимо на 75–80% их объема наполнять жидкостью. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения МЛХ-414 на проходной рубке в условиях ГЛХУ «Узденский лесхоз» составит 151,77 млн. рублей [4–А].

2. Разработанную методику, представленные в виде номограмм результаты, запатентованные конструкции гидроманипулятора [26–А] и харвестерной головки [27–А] целесообразно использовать на машиностроительных и лесозаготовительных предприятиях при создании и эксплуатации валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин для рубок промежуточного пользования, что позволит освоить выпуск конкурентоспособных отечественных харвестеров и повысить эффективность освоения лесосечного фонда. Алгоритмы и программы, разработанные для реализации математической модели, прошли практическую апробацию и внедрены в учебный процесс на кафедре лесных машин и технологии лесозаготовок БГТУ по дисциплинам «Основы проектирования лесных машин и системы автоматизированного проектирования», «Основы научных исследований и инновационной деятельности».

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### Статьи в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК

1–А. Мохов, С.П. Кинематика харвестерного рычажного манипулятора параллельного типа / С.П. Мохов, С.Е. Арико, В.Н. Лой // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2008. – Вып. XVI. – С. 47–51.

2–А. Арико, С.Е. Анализ конструкций харвестерных машин / С.Е. Арико // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2009. – Вып. XVII. – С. 79–81.

3–А. Мохов, С.П. Создание валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины для рубок промежуточного пользования / С.П. Мохов, М.К. Асмоловский, С.Е. Арико // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2009. – Вып. XVII. – С. 82–85.

4–А. Оценка результатов производственных испытаний валочно-сучнорезно-раскряжевочной машины 4К4 / С.П. Мохов, В.Н. Лой, С.Е. Арико, В.А. Коробкин // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 55–59.

5–А. Арико, С.Е. Математическая модель работы харвестерной машины 4К4 / С.Е. Арико // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 113–117.

6–А. Мохов, С.П. Оценка параметров валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины для рубок промежуточного пользования / С.П. Мохов, С.Е. Арико // Труды БГТУ. Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2011. – № 2. – С. 45–48.

7–А. Арико, С.Е. Влияние вылета манипулятора на эффективность работы харвестера / С.Е. Арико // Труды БГТУ. Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2011. – № 2. – С. 117–121.

8–А. Арико, С.Е. Моделирование процесса взаимодействия крон деревьев при их валке / С.Е. Арико // Труды БГТУ, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2011. – № 2. – С. 127–131.

### Статьи в научных сборниках

9–А. Арико, С.Е. Технологии разработки лесосеки с применением системы машин в составе харвестера и форвардера на рубках ухода / С.Е. Арико // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: тр. III междунар. евраз. симпоз., Екатеринбург, 30 сент. – 3 окт. 2008 г. / под науч. ред. В.Г. Новоселова – Екатеринбург, 2008. – С. 33–37.

10–А. Арико, С.Е. Многооперационная лесозаготовительная машина для проведения рубок промежуточного пользования / С.Е. Арико, С.П. Мохов // Механика – машиностроению: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Инновации в машиностроении» и VI Междунар. симпоз. по трибофатике МСТФ

2010 ОИМ НАН Беларуси, Минск, 26–29 окт. 2010 г. / ОИМ НАН Беларуси; редкол. : М.С. Высоцкий [и др.]. – Минск, 2010. – С. 215–217.

11–А. Арико, С.Е. Оценка устойчивости валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины / С.Е. Арико, С.П. Мохов // *Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: тр. V Междунар. евраз. симпоз., Екатеринбург, 25–28 мая 2010 г.* / под науч. ред. В.Г. Новоселова. – Екатеринбург, 2010. – С. 24–30.

### **Материалы научных конференций и тезисы докладов**

12–А. Арико, С.Е. Принципиальные схемы современных харвестерных гидроманипуляторов / С.Е. Арико, В.Н. Лой // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 17–18 апр. 2008 г.:* в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеративное агенство по образованию, Могилев. обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2008. – Ч. 3. – С. 6–7.

13–А. Арико, С.Е. Исследование динамической нагруженности харвестера / С.Е. Арико // *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 20–21 ноября 2008 г.* / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеративное агенство по образованию, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2008. – С. 78.

14–А. Арико, С.Е. Современные харвестерные гидроманипуляторы / С.Е. Арико // *Северо-Кавказский государственный технический университет [Электронный ресурс.]* – 2008. – Режим доступа : <http://science.ncstu.ru/conf/past/2008/stud/mach-building>. – Дата доступа : 17.05.2012.

15–А. Мохов, С.П. Оценка нагруженности элементов технологического оборудования харвестерных машин / С.П. Мохов, С.Е. Арико, В.А. Симанович // *Тракторы, автомобили, мобильные энергетические средства: проблемы и перспективы развития: докл. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 80-летию со дня рождения д-а техн. наук, проф. Скотникова Валерия Александровича, Минск, 11–14 февраля 2009 г.* / М-во сельского хоз-ва и продовольствия Респ. Беларусь, Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; редкол.: А.В. Кузьмицкий [и др.]. – Минск, 2009. – С. 399–403.

16–А. Арико, С.Е. Оценка параметров технологического оборудования валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины / С.Е. Арико, С.П. Мохов // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 апр. 2009 г.:* в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеративное агенство по образованию, Могилев. обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь,

Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2009. – Ч. 2. – С. 118–119.

17–А. Арико, С.Е. Исследование динамической нагруженности взаимодействия харвестера с предметом труда / С.Е. Арико, В.А. Симанович, С.П. Мохов // Сборник научных работ студентов высших учебных заведений Республики Беларусь «НИРС 2008» / редкол.: А.И. Жук (пред.) [и др.]. – Минск: Издат. центр БГУ, 2009. – С. 109–110.

18–А. Арико, С.Е. Моделирование работы лесозаготовительных машин харвестерного типа / С.Е. Арико // Устойчивое управление лесами и рациональное лесопользование: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 18–21 мая 2010 г. : в 2 кн. / М-во лес. хоз-ва Респ. Беларусь, Гос. ком. по науке и технологии Респ. Беларусь, Беларус. гос. технол. ун-т; редкол.: Л.Н. Рожков, О.А. Атрощенко, Н.П. Вырко. – Минск, 2010. – Кн. 1. – С. 47–51.

19–А. Коробкин, В.А. Валочно-сучкорезно-раскряжеочная машина для проведения рубок промежуточного пользования / В.А. Коробкин, С.П. Мохов, В.Н. Лой, М.К. Асмоловский, С.Е. Арико // Устойчивое управление лесами и рациональное лесопользование: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 18–21 мая 2010 г. : в 2 кн. / М-во лес. хоз-ва Респ. Беларусь, Гос. ком. по науке и технологии Респ. Беларусь, Беларус. гос. технол. ун-т; редкол.: Л.Н. Рожков, О.А. Атрощенко, Н.П. Вырко. – Минск, 2010. – Кн. 1. – С. 302–305.

20–А. Арико, С.Е. Динамика лесозаготовительных машин харвестерного типа / С.Е. Арико // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2010 г.: в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеративное агенство по образованию, Могилев. обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2010. – Ч. 2. – С. 6–7.

21–А. Арико, С.Е. Создание и совершенствование валочно-сучкорезно-раскряжеочных машин / С.Е. Арико, С.П. Мохов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2010 г.: в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеративное агенство по образованию, Могилев. обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2010. – Ч. 2. – С. 8–9.

22–А. Пищов, С.Н. Комплекс лесных машин для заготовки сортиментов на рубках промежуточного пользования с возможностью освоения труднодоступного лесосечного фонда / С.Н. Пищов, С.Е. Арико // Материалы секционных заседаний. Молодежный инновационный форум «Интри» – 2010, Минск, 29–30 ноября 2010 г. / Гос. ком. по науке и технологии Респ. Беларусь, ГУ «БелИСА»; под общ. ред. И.В. Войтов. – Минск, 2010. – С. 33–34.

23–А. Арико, С.Е. Повышение эффективности работы харвестера на основе выбора габаритных параметров манипулятора / С.Е. Арико, С.П. Мохов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Международ. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апр. 2011 г. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеративное агентство по образованию, Могилев. обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2011. – Ч. 2. – С. 28–29.

24–А. Арико, С.Е. Выбор параметров валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины и ее технологического оборудования / С.Е. Арико, С.П. Мохов // Сб. тез. докл. Республ. науч. конф. студентов и аспирантов высш. учеб. заведений Респ. Беларусь, Минск, 18 окт. 2011 г. / Белорус. гос. ун-т., Белорус. нац. техн. ун-т., Белорус. гос. аграр. техн. ун-т., Белорус. гос. технол. ун-т., Белорус. гос. ун-т. информатики и радиоэлектроники, Белорус. гос. ун-т. культуры и искусств, Витеб. гос. технол. ун-т.; редкол.: С.В. Абламейко [и др.]. – Минск, 2011. – С. 372.

25–А. Мохов, С.П. Перспективы развития лесного машиностроения Республики Беларусь / С.П. Мохов, А.Р. Гороновский, С.Н. Пищов, С.Е. Арико // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Международ. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апр. 2012 г. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Могилев. обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2012. – Ч. 2. – С. 32–33.

### **Патент на изобретение**

26–А. Манипулятор лесной машины: пат. 14291 Респ. Беларусь, МПК В60Р3/41/ В.А. Симанович, С.П. Мохов, В.А. Коробкин, С.Е. Арико, Г.Я. Климчик, С.Н. Пищов; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № а 20090602; заявл. 23.04.09; опубл. 30.04.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 2. – С. 76.

### **Заявка на изобретение**

27–А. Валочно-сучкорезно-раскряжевочное устройство лесозаготовительной машины: заявка на изобретение Респ. Беларусь, МПК А 01 G 23/08 / В.А. Симанович, С.Е. Арико, С.П. Мохов, С.Н. Пищов, М.А. Данилович; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № а20110367; заявл. 24.03.11.

## РЭЗІЮМЭ Арыка Сяргей Яўгенавіч

### Абгрунтаванне параметраў валачна-сучкарэзна-раскражовачнай машыны для высечак прамежкавага лесакарыстання

**Ключавыя словы:** валачна-сучкарэзна-раскражовачная машына, высечка прамежкавага карыстання, мадэляванне, устойлівасць, гідраманіпулятар, харвестарная галоўка, намаграма.

**Мэта работы:** абгрунтаванне параметраў валачна-сучкарэзна-раскражовачнай машыны для павышэння эфектыўнасці асваення лесасек пры правядзенні высечак прамежкавага карыстання машынным спосабам.

**Метады даследавання і апаратура:** эксперыментальныя даследаванні праводзіліся па распрацаваных і зацверджаных метадыках. Для рэгістрацыі і апрацоўкі даных выкарыстоўваліся васьміканальны шматфункцыянальны вымяральны ўзмацняльнік «Spider 8», тэнзаметрычныя датчыкі вертыкальных нагрузак УД-1, датчыкі сілы U9B. Пры тэарэтычных даследаваннях прымяняліся метады тэарэтычнай механікі, матэматычнай статыстыкі і камп'ютарнага мадэлявання.

**Навуковая навізна атрыманых вынікаў:** распрацавана метадыка абгрунтавання параметраў валачна-сучкарэзна-раскражовачнай машыны, якая ўключае матэматычную мадэль узаемадзеяння ВСПМ з прадметам працы, што дазваляе разглядаць дынамічную сістэму «харвестэр – прадмет працы» ў прасторы, вызначаць параметры базавага шасі з улікам шарнірна-сучлененага выканання лесанарыхтоўчай машыны, дзеянне ветравой нагрузкі, паветранага асяроддзя, узаемадзеянне крон дрэў. На аснове мадэлявання тэхналагічных працэсаў атрыманы залежнасці ў выглядзе намаграм, якія дазваляюць вызначаць велічыні вылету і грузавага моманту гідраманіпулятараў, намаганні працягвання дрэва пры абразанні сукоў, магутнасць і масу харвестарнай галоўкі з улікам пароднага складу, сярэдняга аб'ёму хлыста, інтэнсіўнасці высечкі, хуткасцяў выканання асобных аперацый. Упершыню эксперыментальна ўстаноўлена залежнасць змянення намаганняў узаемадзеяння крон пры валцы дрэў ад таксацыйных параметраў насаджэнняў.

**Ступень выкарыстання:** вынікі даследаванняў выкарыстаны пры распрацоўцы даследуемага ўзору валачна-сучкарэзна-раскражовачнай машыны МЛХ-414 і яе эксплуатацыі ў ДЛГУ «Уздзенскі лясгас».

**Галіна выкарыстання:** вынікі працы могуць быць выкарыстаны пры абгрунтаванні параметраў валачна-сучкарэзна-раскражовачнай машыны і тэхналагічнага абсталявання на машынабудаўнічых прадпрыемствах, выбары рэжымаў эксплуатацыі харвестараў для павышэння эфектыўнасці правядзення высечак прамежкавага карыстання.

**РЕЗЮМЕ**  
**Арико Сергей Евгеньевич**

**Обоснование параметров валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины для рубок промежуточного лесопользования**

**Ключевые слова:** валочно-сучкорезно-раскряжевочная машина, рубка промежуточного пользования, моделирование, устойчивость, гидроманипулятор, харвестерная головка, номограмма.

**Цель работы:** обоснование параметров валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины для повышения эффективности освоения лесосек при проведении рубок промежуточного пользования машинным способом.

**Методы исследования и аппарата:** экспериментальные исследования проводились по разработанным и утвержденным методикам. Для регистрации и обработки данных использовались восьмиканальный многофункциональный измерительный усилитель «Spider 8», тензометрические датчики вертикальных нагрузок УД-1, датчики силы У9В. При теоретических исследованиях применялись методы теоретической механики, математической статистики и компьютерного моделирования.

**Научная новизна полученных результатов:** разработана методика обоснования параметров валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины включающая математическую модель взаимодействия ВСПМ с предметом труда, позволяющую рассматривать динамическую систему «харвестер – предмет труда» в пространстве, определять параметры базового шасси с учетом шарнирно-сочлененного исполнения лесозаготовительной машины, действие ветровой нагрузки, воздушной среды, взаимодействие крон деревьев. На основе моделирования технологических процессов получены зависимости в виде номограмм, которые позволяют определять величины вылета и грузового момента гидроманипулятора, усилия протаскивания дерева при обрезке сучьев, мощность и массу харвестерной головки с учетом породного состава, среднего объема хлыста, интенсивности рубки, скоростей выполнения отдельных операций. Впервые экспериментально установлена зависимость изменения усилий взаимодействия крон при валке деревьев от таксационных параметров насаждений.

**Степень использования:** результаты исследований использованы при разработке опытного образца валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины МЛХ-414 и ее эксплуатации в ГЛХУ «Узденский лесхоз».

**Область применения:** результаты работы могут быть использованы на машиностроительных предприятиях при обосновании параметров базового шасси и технологического оборудования валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины, выборе режимов эксплуатации харвестера для повышения эффективности проведения рубок промежуточного пользования.

**SUMMARY**  
**Ariko Sergei Yevgenjevich**

**Substantiation of felling-delimiting-bucking machine characteristics  
for intermediate forest exploitation cutting**

**Key words:** felling-delimiting-bucking machine, intermediate forest exploitation cutting, modeling, stability, hydraulic manipulator, harvester head, nomogram.

**Objective:** substantiation of felling-delimiting-bucking machine characteristics for effectiveness increase of cutting area development during intermediate forest exploitation cutting by machine mode.

**Analysis and equipment:** experimental research was being carried out in accordance with the developed and approved technologies. For recording and data processing there has been used eight channel multipurpose instrumentation amplifier «Spider 8», strain-gauge transducers of vertical loads UD-1, strain-gage sensor U9B. Methods of theoretical mechanics, mathematical statistics and computer simulation have been used for theoretical studies.

**Scientific novelty of the results:** there have been developed the technique for substantiation of felling-delimiting-bucking machine characteristics. It includes mathematical model of interaction between FDBM and object of labour allowing viewing the dynamic system «harvester – object of labour» in 3-D format, to determine the parameters of basic chassis considering articulated vehicle, effect of wind load, air, interaction of tree crowns. Based on the engineering process modeling, there has been obtained the dependences in the form of nomograms which make possible determination of arm of crane value and load moment value of hydraulic manipulator, tree pulling force during delimiting, capacity and mass of harvester head considering species composition, average volume of tree-length material, and heaviness of felling, speed of performing separate operations. The dependency of changes in force interaction between tree crowns and taxation parameters of stands during felling has been determined experimentally for the first time.

**Efficiency:** research results have been used in the prototype development of felling-delimiting-bucking machine MLH-414 and in its operation in state forestry establishment «Uzda forestry».

**Application domain:** the results can be applied at engineering enterprises in substantiating the characteristics of basic chassis and engineering equipment for felling-delimiting-bucking machine, selection of harvester operation modes for effectiveness increase during intermediate felling.

Научное издание

Арико Сергей Евгеньевич

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВАЛОЧНО-СУЧКОРЕЗНО-  
РАСКРЯЖЕВОЧНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ РУБОК  
ПРОМЕЖУТОЧНОГО ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЯ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.21.01 – технология и машины лесозаготовок  
и лесного хозяйства

Ответственный за выпуск С.Е. Арико

Подписано в печать 21.09.2012. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,4.  
Тираж 60 экз. Заказ 396 .

Издатель и полиграфическое исполнение:  
УО «Белорусский государственный технологический университет».  
ЛП № 02330/0549423 от 08.04.2009.  
ЛП № 02330/0150477 от 16.01.2009.  
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.