

На правах рукописи

АБУЗОВ Александр Викторович

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
КАНАТНЫХ ЛЕСОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ
АЭРОСТАТИЧЕСКИХ И ПНЕВМАТИЧЕСКИХ
КОНСТРУКЦИЙ**

05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Хабаровск – 2015

Работа выполнена на кафедре «Технология лесопользования и ландшафтного строительства» ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет».

Научные консультанты: **Рябухин Павел Борисович**
доктор технических наук, профессор
Якимович Сергей Борисович
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Бурмистрова Ольга Николаевна**, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологии и машины лесозаготовок» ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет»;
Макуев Валентин Анатольевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Колесных и гусеничных машин» ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»;
Сушков Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленного транспорта, строительства и геодезии» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова».

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ, г. Петрозаводск).

Защита диссертации состоится «7» апреля 2016 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.281.02 при ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет» (620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37), к. 401.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет», www.usfeu.ru/nauka/disserattsiionnye-sovety.html.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Кузубина Нелли Валерьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность направления исследований. В настоящий период времени область распространения лесозаготовительных операций в Дальневосточном федеральном округе (ДФО) планомерно смещается с наиболее доступных лесных территорий на лесосеки с характерными признаками труднодоступности и экологической зависимости, с плотным наличием на них рек, озер и болот, как правило, окруженных горными склонами с резким перепадом высот. Уже сейчас остро встаёт вопрос о дефицитном состоянии лесного фонда ДФО ввиду его невозможности в ближайшем будущем обеспечить отрасль качественной и рентабельно доступной древесиной.

Исходя из этого, одним из основных факторов, сдерживающим увеличение объемов лесозаготовок, проводимых в горной местности, является сложность технологического процесса по первичной транспортировке древесины от точки заготовки до места складирования и погрузки. При этом около 34,6% лесных площадей, на которых произрастает качественный и спелый древостой, находятся на склонах свыше 20°, где традиционная техника либо не в состоянии вести заготовку древесины, либо выполняет её с большими затратами и с явным экологическим несоответствием.

В связи с этим характер технологических процессов, связанный с заготовкой древесины на крутых склонах, требует внедрения новых прогрессивных технологий, обеспечивающих не только минимальное экологическое воздействие, но и оперативный режим транспортировки древесины в зоне резкопеременного рельефа с наличием водных препятствий.

Современные технологические системы заготовки древесины, представленные самопередвигающимися канатными установками или тракторными комплексами, специализированных для работы на крутых склонах, не до конца решают проблемы горных лесозаготовок и не обеспечивают эффективность лесозаготовительного процесса, как с технологической, так и с экологической точек зрения.

Опыт применения воздушных систем транспортировки древесины доказал технологическую и лесоводственную эффективность данных методов. Однако, если техническая изученность вертолетных трелевочных систем очевидна и в большинстве случаев сводится к повышению экономической целесообразности выполняемых работ, то воздушные способы и механизмы на базе аэростатных и подвесных канатных комплексов, способных работать на крутых склонах и преодолевать водные преграды, требуют дополнительного серьезного и разностороннего исследования, позволяющего более эффективно изучить и оценить их технологические и конструктивные особенности.

В связи с этим, более детальное изучение альтернативных технологий, которыми являются канатные лесотранспортные системы на базе аэростатических и пневматических конструкций, позволяющих эффективно осваивать труднодоступные лесные массивы с соблюдением экологических требований, представляет научный интерес и практическую значимость.

Цель исследований. Повышение эффективности заготовки древесины на труднодоступных лесных территориях посредством разработки технологии и обоснования конструктивных параметров канатных лесотранспортных систем, минимизирующих техногенное воздействие на окружающую среду.

Объекты исследования: технологические процессы лесозаготовок, канатные лесотранспортные системы на базе аэростатических и пневматических конструкций для освоения труднодоступных лесных территорий.

Предмет исследования: научные основы процесса колебаний системы подвижных канатов, математические модели, методики, алгоритмы, характеризующие технологические и конструктивные параметры канатных лесотранспортных систем.

Методы исследования: системный анализ, методы дифференциального и интегрального исчисления, математического и имитационного моделирования, методы интерполяции данных, пассивного производственного эксперимента, математической статистики и информационных технологий, теории резания древесины, теории механики эластичных механизмов и конструкций.

Научная новизна исследований. На основании полученных патентов РФ на изобретения (№№ 2499706, 2503562, 2503172, 2531649, 2531778) были определены новые технологические и конструктивные особенности аэростатных транспортных комплексов и канатных лесотранспортных систем на базе пневматических конструкций, которые послужили основанием для решения ранее не изученных теоретических и практических вопросов, связанных с эксплуатационными и конструктивными решениями, учитывающих факторы и параметры внешних воздействий, а также состояние и возможности лесного фонда Дальневосточного региона.

Исходя из выше изложенного, впервые были поставлены и решены следующие задачи:

- разработана методология исследований процесса колебаний, возникающих в грузовой подвеске аэростатно-канатной системы (АКС) и влияющих на точность и оперативность наведения грузозахватного механизма в процессе эксплуатации;

- разработаны математические модели процесса колебаний и распределения нагрузок, возникающих в трёх рабочих точках грузовой подвески АКС, учитывающие взаимное влияние данных точек друг на друга в разные периоды эксплуатационного цикла;

- разработан алгоритм расчета размеров внешнего контура лесоэксплуатационного участка в зависимости от нагрузок, действующих на АКС в процессе выполнения технологических операций;

- разработана методология исследований динамических нагрузок и процесса колебаний, возникающих в несущем канате канатной лесотранспортной системы (КЛТС) на базе плавающих пневматических конструкций (ППК) в процессе перемещения груза с учетом воздействия волновых и ветровых нагрузок;

- разработаны математические модели процесса колебаний несущего каната и возникающих в нем нагрузок в зависимости от конструктивных особенностей и условий эксплуатации КЛТС на базе ППК;

- разработаны технологические и конструктивные решения для реализации лесозаготовительных процессов с применением канатных лесотранспортных систем на базе аэростатических и пневматических конструкций.

Основные положения, выносимые на защиту:

- методика и реализация математической модели, описывающей процессы колебаний, возникающие в грузовой подвеске АКС под действием внешних факторов и влияющих на точность и оперативность наведения грузозахватного механизма;

- алгоритм расчета размеров внешнего контура лесозаготовительного участка при использовании трехлинейной аэростатно-канатной системы;

- методика определения конструктивных параметров пневматической арочной конструкции, служащей опорой для несущего каната лесотранспортной системы;

- методика и реализация математической модели, описывающей процессы колебаний и динамические нагрузки, возникающие в несущем канате КЛТС на базе ППК, в процессе перемещения груза с учетом воздействия внешних факторов;

- технологические и конструктивные решения для реализации лесозаготовительных процессов с применением канатных лесотранспортных систем на базе аэростатических и пневматических конструкций.

Достоверность научных положений, выводов и результатов, сформулированных в диссертационной работе, обоснована применением признанных научных методов (методы математической статистики, метод наименьших квадратов, объектно-ориентированный анализ, реляционная алгебра) и подтверждена результатами промышленных экспериментов.

Для обработки и получения результатов исследований использовались программы и программные комплексы: «ЛИРА-САПР 2014 PRO», «ЛИРА-САПР 2014 Сапфир ЖБК», Maple (версия 18), Mathcad 15.0, Microsoft Excel – 2013;

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований были доложены и обсуждены на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и аспирантов Тихоокеанского государственного университета (ТОГУ) в 2003-2014 г.г.; на межрегиональной научно-практической конференции по освоению горных лесов в 2003 г. (г. Хабаровск, ТОГУ); на восьмом «Ежегодном конкурсе молодых ученых и аспирантов учебных заведений Дальнего Востока» в 2006 г. (г. Хабаровск, ТОГУ); на седьмой международной научной конференции «Новые идеи нового века» в 2007 г. (г. Хабаровск, ТОГУ); на международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы развития лесного комплекса» в 2012 и 2014 г.г. (г. Вологда, ВоГТУ); на международном научно-практическом форуме «Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона» в 2012 г. (г. Хабаровск, ТОГУ); на международном экологическом семинаре «Кедр – хозяин дальневосточной

тайги» в 2013 г. (г.Хабаровск, ТОГУ); на всероссийской конференции с международным участием «Состояние лесов и актуальные проблемы лесопользования» в 2013 г. (г. Хабаровск, ДальНИИЛХ); на международном экологическом семинаре «Философия современного природопользования в бассейне реки Амур» в 2014 г. (г. Хабаровск, ТОГУ).

Технические и конструкторские разработки, представленные в данной научной работе, награждены следующими дипломами и медалями:

- диплом Петербургской технической ярмарки за разработку проекта «Технология освоения труднодоступных лесных территорий на принципах экосистемы региона» в номинации «Промышленная экология, рациональное природопользование», г.Санкт-Петербург, 12-14 марта 2013 года;

- диплом Петербургской технической ярмарки НИ-ТЕСН-2014 за разработку установки «Лесотранспортная канатная система на основе надувных плавающих опор» в номинации «Лучший инновационный проект в области экологии, рационального природопользования, переработки отходов», г. Санкт-Петербург, 2014 год;

- серебряная медаль XVII Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «Архимед-2014» за разработку «Аэростатно-канатная система для воздушной заготовки и транспортировки древесины».

- серебряная медаль конкурса «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» Петербургской технической ярмарки НИ-ТЕСН-2015 за разработку «Канатная лесотранспортная система на базе пневматических конструкций» в номинации «Лучший инновационный проект в области экологии, рационального природопользования, переработки отходов», г. Санкт-Петербург, 2015 год.

Реализация результатов работы. Исследования, положенные в основу настоящей работы, внедрены в учебный процесс Тихоокеанского государственного университета в дипломном проектировании и дисциплинах «Технология, машины и оборудование заготовки и первичной обработки древесины», «Технология и оборудование лесосечных работ».

По результатам выполненных теоретических и экспериментальных исследований созданы практические масштабные модели аэростатно-канатной системы МТА-500 и лесотранспортной канатной системы КЛТС-50П, конструкции которых взяты за основу при создании промышленных образцов на базе предприятий Дальневосточный Центр Воздухоплавания «Аэрос» и ООО «Аэростано-Комплексные Системы» под непосредственным руководством автора.

Личный вклад автора. В ходе выполнения научных исследований автор являлся организатором конструкторских и экспериментальных работ, на основе которых сформирована концепция и алгоритм методологии исследований колебательных процессов, возникающих в канатных лесотранспортных системах на базе аэростатических и пневматических конструкций. Были разработаны и реализованы математические модели процесса колебаний и сопутствующих нагрузок, действующих в процессе функционирования канатных лесотранспортных

систем и оказывающих влияние на процесс эксплуатации. Сформулированы практические выводы и рекомендации.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства:

3. Разработка операционных технологий и процессов в лесопромышленном и лесохозяйственном производствах: заготовительном, транспортном, складском, обрабатывающем, лесовосстановительном и др.

4. Исследование условий функционирования машин и оборудования, агрегатов, рабочих органов, средств управления.

5. Обоснование и оптимизация параметров и режимов работы лесозаготовительных и лесохозяйственных машин.

6. Выбор технологий, оптимизация параметров процессов с учетом воздействия на смежные производственные процессы и окружающую среду.

Публикации. По материалам выполненных исследований опубликовано 53 научные работы, из них – 2 монографии, 7 патентов на полезную модель, 11 патентов на изобретения, 16 научных работ в журналах реферируемых ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, основных выводов и рекомендаций, списка используемых источников и приложений. Основной объем работы составляет 372 страницы. Работа содержит 200 рисунков, 26 таблиц. Список используемых источников состоит из 326 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится общая характеристика работы, обоснована актуальность направлений исследования, сформулированы цели и научная новизна, научная и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен расширенный анализ, как отечественных, так и зарубежных информационных источников, научных и практических работ, сформированных за предыдущие годы, в области грузовых канатных систем и других специализированных механизмов, предназначенных для эксплуатации на труднодоступных лесных территориях и в сложных технологических условиях.

Анализ научных трудов Адамовского Н.Г., Бачище А.В., Белой Н.М., Буткина В.Д., Бойко Ю.С., Гарькуши В.Н., Герца Э.Ф., Григорьева И.В., Дукельского А.И., Ковалева А.П., Козловского В.Б., Магулы В.Э., Матвеева Э.Н., Пятакина В.И., Редькина А.К., Родионова В.И., Рябухина П.Б., Стрельникова Д.В., Цветкова А.А., Ширнина А.Ю., Якимовича С.Б., Ярцева И.В. и др., а также отчеты зарубежных ученых Brian L. Tuor, Daniel Y. Guimier, Dykstra D.P., Frank Greulich, Robert B. Avery и таких организаций, как МПНСУ «Центротехмонтаж», ЦНИИМЭ, ВЦ «Авгурь», ДЦВ «Аэрос», Goodyear Aerospace Corp., Aerial Crane Systems, Skyhook Interprises Ltd. позволили определить современ-

ное состояние области научных исследований, посвященных изучению конструктивных и технологических параметров канатных лесотранспортных систем на базе аэростатических и пневматических конструкций.

Исходя из анализа изученных научных трудов, было установлено, что:

- большинство работ, связанных с изучением вопросов применения аэростатно-канатных систем в лесозаготовительном процессе, морально устарели ввиду того, что исследуемые в них трелевочные системы не могут быть применены в настоящее время в силу своей не конкурентно способности с другими видами лесозаготовительного транспорта;

- ряд современных научных работ, базирующихся на исследовании нагрузок, возникающих в канатах АКС, используют методы расчетов в статике, расчеты же динамических нагрузок представлены только в неподвижных системах, результатов которых не достаточно для оценки параметров и свойств трехлинейной АКС, предназначенной для транспортно-грузовых операций в лесозаготовительном цикле;

- в силу отсутствия в технологических лесозаготовительных операциях прошлых лет, процессов и механизмов, способных вести воздушную заготовку древесины с вертикальным изъятием древостоя, научные работы, связанные с колебательными процессами и точностью наведения грузозахватного механизма, также отсутствуют;

- ввиду того, что научных исследований, по использованию лесотранспортных канатных систем на базе пневматических конструкций не представлено не только в РФ, но и за рубежом, то вопросы, связанные с технологией эксплуатации, а также процессами, происходящими в системе в момент её функционирования, также не изучены.

На основании проведенного анализа сформулирована цель диссертационной работы и определены основные задачи исследований.

Во второй главе определены особенности лесного фонда ДФО с учетом перспектив возможного использования канатных лесотранспортных систем на базе аэростатических и пневматических конструкций в лесозаготовительном процессе. Выполнен анализ условий эксплуатации и обоснование выбора технологий, предназначенных для освоения труднодоступных лесных территорий.

Отмечено, что, несмотря на высокое разнообразие лесного фонда, многопородность, огромные запасы и большую площадь покрытых лесом земель, в эксплуатационном плане леса ДФО имеют в целом невысокую производительность с преобладанием в насаждении IV, V, Va и ниже классов бонитета.

Важной особенностью лесов Дальневосточного региона является снижение концентрации запасов эксплуатационной древесины на 1 га. Незначительное изменение отмечено только в Приморском крае, где запас древесины на 1 га понизился лишь на 9%. Критическая ситуация образовалась в Магаданской области и Якутии, где запас на 1 га понизился на 45,2% и 31% соответственно. Произошло снижение запаса в Хабаровском крае на 21%, в Сахалинской области на 22,5%, в Амурской области на 18,5%, в Камчатском крае на 23,4%.

Проведенный анализ показал отрицательную динамику запасов и площадей припевающихся основных эксплуатационных пород по отношению к площади и запасам спелых (перестойных) древостоев. Тенденция по будущему уменьшению эксплуатационных запасов затрагивает практически все лесные формации, произрастающие на территории ДФО (рис. 1).

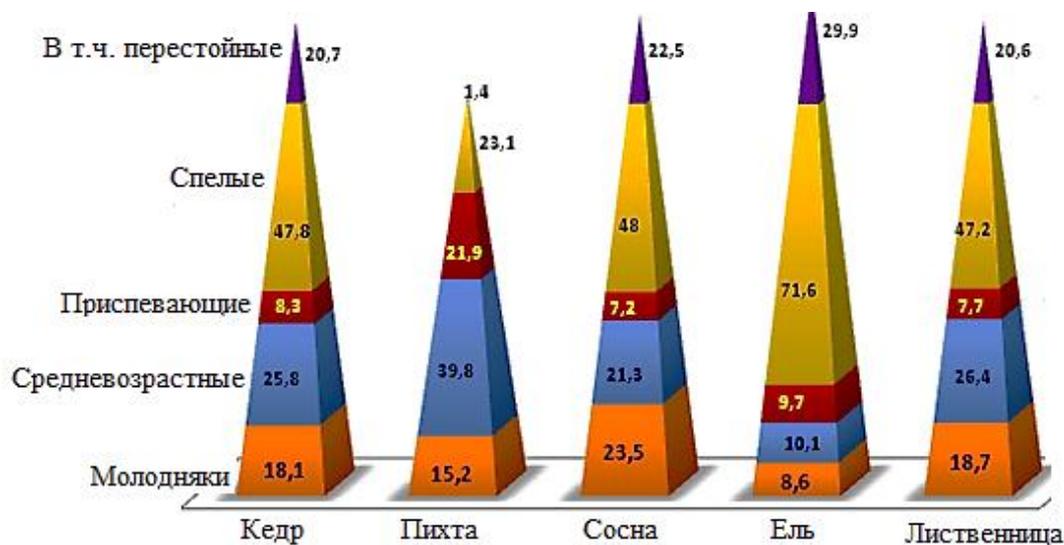


Рис. 1. Распределение площадей произрастания хвойных пород в ДФО по группам возраста, %

Установлено, что до 57% площадей припевающихся и средневозрастных древостоев, произрастающих на крутых склонах, входят в общую структуру горных лесов, в которых доминируют спелые и перестойные насаждения. Это обстоятельство играет отрицательную роль в процессе валки деревьев традиционными способами, при которых происходит массовое повреждение оставшихся на корню древостоев (подроста, тонкомера).

В ходе проведенных экспериментальных наблюдений отмечена закономерность данных повреждений:

- вероятность одновременного повреждения нескольких (2-4 шт.) древостоев на одно поваленное дерево, преимущественно, составляет 20-28%;
- при увеличении запаса на 10-15 м³/га, повреждаемость древостоев увеличивалась в среднем на 3,5%;
- с увеличением склона на 5⁰, повреждаемость древостоев в среднем увеличивалась на 12-13,5%;

Для определения условий эксплуатации лесозаготовительных систем в горных районах Хабаровского края, которые в настоящий момент наиболее обеспечены запасом древесины хорошего качества, был проведен анализ характеристик рельефа лесного фонда, а также гидрологических систем по образующим склонам, с использованием справочных материалов и программ ArcGis v.10, ENVI. Этот анализ показал:

- значительные площади спелого древостоя сосредоточены не только на территориях с плотным наличием резко пересеченного рельефа и крутых скло-

нов, но и в местах с наличием сильно переувлажненных грунтов, заболоченности и топи;

- возможность использования гидрологических систем в качестве транспортных коридоров для канатного и водно-канатного надувного транспорта в широком диапазоне расстояний.

По итогам анализа было определено, что комплексными технологическими системами лесозаготовительного процесса, которые способны совмещать возможности выборочного изъятия леса и обеспечить эффективную работу по преодолению водных преград и заболоченных мест, могут являться канатные лесотранспортные системы на базе аэростатических и пневматических конструкций.

Третья глава посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям технических параметров аэростатно-канатной системы, работающей в режиме вертикального изъятия древостоя.

Отмечено, что для проведения лесозаготовительного процесса с вертикальным изъятием растущих деревьев, требуется разработка и параметризация специализированных грузозахватных механизмов (ГЗМ) инерционного типа.

Важными параметрами инерционного ГЗМ, обеспечивающих эффективное срезание сучьев, является его масса и скорость опускания на крону дерева.

Возможность очистки дерева от сучьев с использованием инерционного ГЗМ оценивается по сопоставлению суммарной энергии срезающего механизма в начале процесса E и значения работы, которую необходимо совершить при срезании всех сучьев A .

С учетом функции распределения сучьев по диаметру, величину A [кДж] рассчитаем по формуле:

$$A = \int_0^{d_c+3S} 315 \cdot 10d^{-8} S a_{II} a_s i d d \quad (1)$$

Сумму кинетической и потенциальной энергии срезающего механизма определим E [кДж] по формуле:

$$E = 10^{-3} \{0,5MV^2 + Mg(l - l_{oc})\} \quad (2)$$

где M – масса срезающего механизма, V – скорость срезающего механизма в начале процесса очистки дерева от сучьев, g – ускорение свободного падения.

Возможность очистки дерева от сучьев оценим по сопоставлению суммарной энергии срезающего механизма в начале процесса E и значения работы, которую необходимо совершить при срезании всех сучьев A .

Отметим, что при скоростях срезающего механизма в начале срезания сучьев (на вершине дерева) в пределах 1 – 2 м/с, кинетическая энергия много меньше потенциальной, т.е. $0,5MV^2 \ll Mg(l - l_{oc})$. Например, при скорости $V = 2$ м/с и массе $M = 500$ кг кинетическая энергия составит 4 кДж, потенциальная энергия при разности $l - l_{oc} = 10$ м составит 50 кДж, что на порядок выше. Таким образом, скорость, с которой начинается очистка дерева от сучьев, не оказывает на процесс заметного влияния. Иными словами, срезание сучьев стано-

вится возможным за счет энергии, приобретаемой срезающим механизмом уже в процессе его движения вдоль ствола дерева.

Вычисления были произведены при $V = 1 - 2$ м/с, $M = 50 - 500$ кг, $a_{II} = 1$ (сосна), 1,1 (лиственница) и 1,3 (ель), $a_{\delta} = 1$, $v = 0,2 - 0,5$.

Полученные результаты можно аппроксимировать следующими степенными зависимостями (для сосны, ели и лиственницы, соответственно):

$$d_{1,3} = 13,121M^{0,2101} \pm 3,5 \quad (3)$$

$$d_{1,3} = 12,875M^{0,2604} \pm 2,7 \quad (4)$$

$$d_{1,3} = 5,239M^{0,3476} \pm 2,4 \quad (5)$$

Оценить изменение скорости срезающего механизма в процессе очистки дерева от сучьев можно с использованием закона сохранения энергии, а также выражений (1) и (2). При допущении о равномерном распределении числа сучков по длине ствола скорости $V(z)$ определится по формуле:

$$V(z) = \sqrt{\frac{10^{-3} \{0,5MV^2 + Mgz\} - \int_0^z \int_0^{d_c+3S} 315 \cdot 10d^{-8} Sa_{II} a_{\delta} i d d dz}{M}} \quad (6)$$

Решение уравнения (6) показало, что начальный «запас» энергии (т.е. кинетическая энергия, обусловленная скоростью срезающего механизма до начала очистки дерева от сучьев) довольно быстро расходуется на совершение работы, а основная часть работы по срезанию сучьев совершается за счет энергии, получаемой срезающим механизмом во время его падения (т.е. уже после начала процесса очистки дерева от сучьев, при условии отсутствия ограничения на скорость со стороны лебедки).

Дополнительно были выполнены расчеты для определения массы срезающего механизма M в зависимости от среднего диаметра деревьев в разрабатываемом древостое с учетом коэффициента угла срезания сучка a_{δ} .

Исходя из полученных результатов, был сделан вывод, что среднее значение массы, необходимой для эффективного срезания сучьев на вертикально стоящем дереве с использованием инерционного ГЗМ, может составлять 500 кг.

Проведенные испытания экспериментальной модели аэростатно-канатной системы МГА-500 выявили ряд особенностей колебательных процессов, возникающих в грузовой подвеске АКС, которые заключаются во взаимно-системном влиянии трех нагруженных точек A , F , L подвески (точек приложения силы) друг на друга. При этом каждая отдельная точка может оказывать периодическое влияние на соседнюю точку, не зависимо от третьей. Также все три точки могут иметь несколько степеней свободы не только относительно друг друга, но и что важно, относительно вертикально стоящего дерева, за счет периодически изменяющихся параметров системы.

Структурная схема исследуемой аэростатно-канатной системы (на примере АКС-5) представлена на рисунке 2.

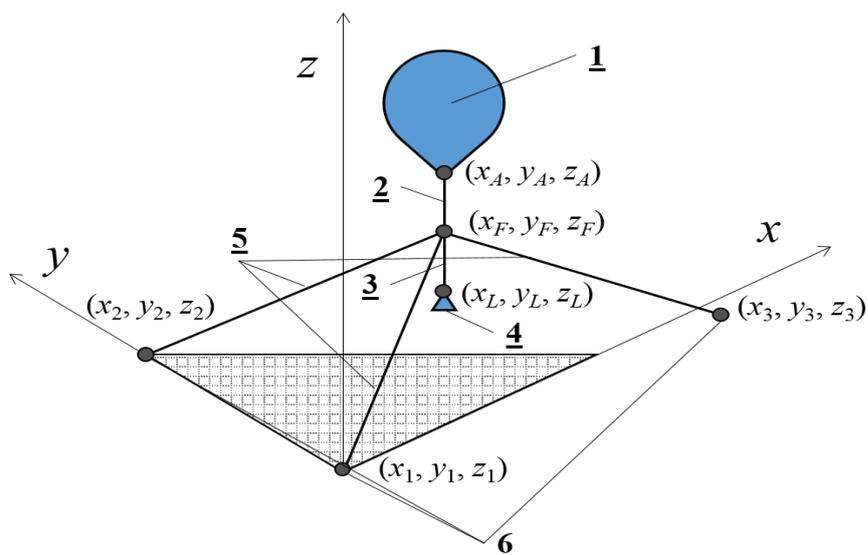


Рис. 2. Структурна схема, исследуемой АКС.

Первым этапом исследований было определение факторов, влияющих на канаты системы и на оболочку аэростата АКС-5 и выполнение их моделирования.

Выявлено, что процесс колебаний подвески зависит от ряда факторов, которые могут меняться, как не зависимо, так и в полном взаимодействии и дополнении друг друга:

- χ_1 – подъемная сила аэростата F_a , кг;
- χ_2 – температура окружающей среды T , °С;
- χ_3 – высота подъема аэростата над уровнем моря H , м;
- χ_4 – рейсовая нагрузка аэростата Q_p , кг;
- χ_5 – скорость ветра $v_в$, м/с;
- χ_6 – направление ветра φ ;
- χ_7 – направление движения ψ ;
- χ_8 – траектории перемещения;
- χ_9 – скорость перемещения аэростата при различных режимах работы $v_{хол}$, $v_{раб}$, м/с;
- χ_{10} – скоростной напор, Н/м²;
- χ_{11} – результирующая нагрузка R , Н;
- χ_{12} – вертикальная нагрузка Q_y , Н;
- χ_{13} – горизонтальная нагрузка, действующая на аэростат Q_x , зависящая от скоростного напора и воздушного потока, Н;
- χ_{14} – скорость выбирания аэростата лебедкой $v_{выб}$, м/с;
- χ_{15} – скорость опускания грузозахватного механизма, $v_{о.з.}$, м/с;
- χ_{16} – скорость подъема груза (дерева), $v_{н.з.}$, м/с;
- χ_{17} – лобовое сопротивление кроны дерева, Н/м²;

Элементы каната рассматриваются как упруго-вязкие с жесткостью k и коэффициентом демпфирования b , за счет этого учитывается, как растяжение, так и влияние на развитие колебаний системы возникающего при растяжении канатов явления диссипации энергии. Исходя из этого, предложена зависимость

для расчета коэффициента демпфирования каната под действием вертикальной нагрузки, учитывающая деформации растяжения-сжатия в вертикальной плоскости:

$$b = 2\zeta \cdot m \cdot \omega_n, \quad (8)$$

где ζ – коэффициент, определяемый в соответствии с логарифмическим декрементом колебаний по пиковым значениям натяжения каната; m – масса каната; ω_n – собственная частота колебаний каната.

Для построения аппроксимирующей зависимости влияния ветровой нагрузки на аэростат, в виде функции второго порядка, было рассмотрено три угла ветровой атаки: 0^0 , 90^0 , 180^0 . При углах атаки 0^0 – ветер обдувает аэростат сверху, 90^0 – ветер действует в плоскости, параллельной горизонту и 180^0 – поток ветра направлен снизу. Для данных значений угла ветровой атаки получены зависимости для определения площади наветренной поверхности оболочки аэростата:

$$S_h(0) = 2\pi \cdot \int_{17,067}^{25,2} d(h) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dd(h)}{dh}\right)^2} dh = 508,876 \quad (9)$$

$$S_h(90) = \frac{1}{2} \cdot 2\pi \cdot \int_0^{25,2} d(h) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dd(h)}{dh}\right)^2} dh = 730,332 \quad (10)$$

$$S_h(180) = 2\pi \cdot \int_0^{17,067} d(h) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dd(h)}{dh}\right)^2} dh = 951,796 \quad (11)$$

Тогда зависимость для определения площади наветренной поверхности аэростата АКС-5 можно представить в виде линейной функции угла φ :

$$S_h(\varphi) = 2,4607\varphi + 508,87 \quad (12)$$

Для исследования поведения отдельного каната, нагруженного произвольной распределенной нагрузкой, принимаем методику расчета гибкой нити, расчетная схема которой представлена на рисунке 3.

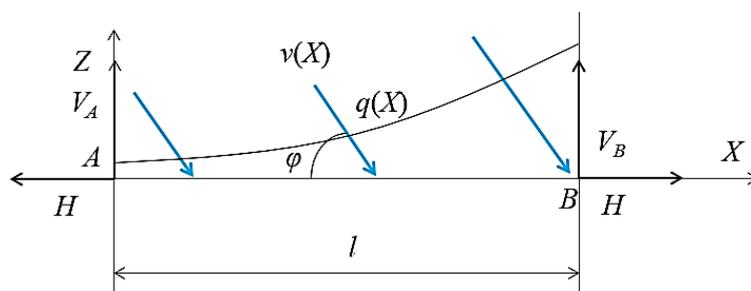


Рис. 3. Расчетная схема гибкой нити

Основное уравнение, описывающее равновесие гибкой нити, имеет вид:

$$\frac{d^2 Z(X)}{dX^2} = \frac{q(X)}{H}, \quad (13)$$

где H – величина распора, кН.

При необходимости учета переменных нагрузок (например, ветровой или любой другой внешней нагрузки, в т.ч. от веса снега, либо капель дождя), но-

сящих переменный характер по длине троса (и, таким образом, по координате X на рисунке 4), воспользуемся двумя следующими зависимостями:

$$q(X) = a \cdot X + b, \quad (14)$$

$$q(X) = a \cdot \exp(b \cdot X), \quad (15)$$

где a, b –числовые коэффициенты, значения которых определяются в зависимости от интенсивности нагрузки.

С учетом погонной массы каната и ветровой нагрузки в зависимости от скорости ветра, для проекции $q(X)$ получим следующее уравнение:

$$\begin{aligned} \bar{q}(X) &= \frac{1}{2\sqrt{2}} \rho \cdot C_d d_T X \cdot f_\phi v^2(X) + \frac{pgX}{100}, \\ v(X) &= 0,0333X, \\ q(X) &= \frac{d\bar{q}(X)}{dX} \end{aligned} \quad (16)$$

После преобразований общее дифференциальное уравнение примет вид:

$$Z(X) = \frac{1}{2} \frac{C \cdot X^2}{H} - \frac{1 - l^2 C}{2 Hl} X, \quad (17)$$

Длина гибкой нити в деформированном состоянии рассчитывается по формуле:

$$L = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{1 + (dZ(X)/dX)^2} dX, \quad (18)$$

где производная $dZ(X)/dX$ равна:

$$\frac{dZ(X)}{dX} = \frac{CX}{H} - \frac{1 - Cl^2}{2 Hl}, \quad (19)$$

Тогда, после интегрирования по формуле (18) в пределах X от 0 до l_h получим:

$$L = \frac{H}{2G} \cdot \ln \frac{f_1 l \cdot H + Gl^2}{f_1 l \cdot H - Gl^2} + \frac{f_1 \cdot l}{4}, \quad (20)$$

Вспомогательные обозначения, введенные для упрощения записи:

$$f_1 = \frac{\sqrt{(4h^2 + 4l^2) \cdot H^2 + G^2 l^4}}{Hl}, \quad (21)$$

Проведя ряд дополнительных преобразований, получим трансцендентное уравнение, задающее длину каната в деформированном состоянии в зависимости от величины распора H и внешней нагрузки:

$$\left\{ \begin{aligned} L &= \frac{(-b^4 H^2 l^2 - a^2 e^{2bl} + 2a^2 e^{bl}) \cdot \ln A_4 - \{a \cdot (e^{bl} - 1) \cdot \ln A_5 + Hb^2 l \cdot (A_2 - A_3)\} \cdot b^2 l A_1 H}{b^5 H^2 A_1 l^2} \\ L &= \frac{H}{k \cdot b} \cdot \left(f_1 - f_2 - \operatorname{arctanh} \frac{1}{f_1} + \operatorname{arctanh} \frac{1}{f_2} \right) + l \end{aligned} \right. \quad (22)$$

$$A_1 = \frac{\sqrt{b^4 H^2 l^2 + e^{2bl} a^2 - 2e^{bl} a^2 + a^2}}{b^2 H l}$$

$$A_2 = \frac{\sqrt{e^{2bl} a^2 - 2e^{bl} a^2 \cdot (bl + 1) + a^2 (bl + 1)^2 + b^4 H^2 l^2}}{b^2 H l}$$

$$A_3 = \frac{\sqrt{e^{2bl} a^2 (bl - 1)^2 - 2e^{bl} a^2 \cdot (bl - 1) + a^2 + b^4 H^2 l^2}}{b^2 H l}$$

$$A_4 = \frac{-a^2 (bl - 1)e^{2bl} + a^2 (bl - 2)e^{bl} + a^2 + b^4 H^2 l^2 (A_1 A_3 + 1)}{\{a^2 e^{2bl} - a^2 (bl + 2)e^{bl} + a^2 (bl + 1) + b^4 H^2 l^2 (A_1 A_2 + 1)\} \cdot e^{bl}}$$

$$A_5 = \frac{a \cdot (bl - 1)e^{bl} + A_3 b^2 l H + a}{A_2 b^2 l H + abl - a e^{bl} + a}$$

$$f_1 = \sqrt{1 + \{a \exp(bl) / H\}^2}$$

$$f_2 = \sqrt{1 + \{a / H\}^2}$$

При составлении математической модели для исследования колебательных процессов в аэростатно-канатной системе необходимо учитывать, что нагрузка на элементы системы (аэростат, грузозахватный механизм, тягово-возвратные канаты и канаты подвески) может быть различной как по величине, так и по направлению.

При рассчитанном значении распора H , реакции V_A , V_B определим из условия равновесия гибкой нити с учетом схемы нити по рисунку 4. Тогда:

$$V_B = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l X \cdot q(X) dX = \frac{a \cdot (e^{bl} bl - e^{bl} + 1)}{b^2 l} \quad (23)$$

$$V_A = \int_0^l q(X) dX - \frac{1}{l} \cdot \int_0^l X \cdot q(X) dX = \frac{a}{b} \cdot (e^{bl} - 1) - \frac{a}{b^2 l} (e^{bl} bl - e^{bl} + 1) \quad (24)$$

Проекция усилия V_B на неподвижную ось z определится по формуле:

$$V_{iBz} = V_{iB} \sin \gamma_{ix0y} \quad (25)$$

где γ_{ix0y} – угол между плоскостью действия ветровой нагрузки на i -й канат и горизонтальной плоскостью $x0y$ (принимается в качестве исходной величины при задании ветровой нагрузки), индекс i здесь и далее соответствует номеру каната.

Проекции усилия V_B на оси x , y соответственно определяться по формулам:

$$V_{iBx} = V_{iB} \cos \gamma_{ix0y} \cos \gamma_{ix0z} \quad (26)$$

$$V_{iBy} = V_{iB} \cos \gamma_{ix0y} \sin \gamma_{ix0z} \quad (27)$$

где γ_{ix} – угол между горизонтальной проекцией направления i -го каната (на плоскость $x0y$) и осью x неподвижной системы координат, γ_{iy} – угол между горизонтальной проекцией направления i -го каната (на плоскость $x0y$) и осью y неподвижной системы координат.

Проекции усилия H на ось z , x , y соответственно рассчитываются при помощи формул:

$$H_{iz} = H_i \sin \gamma_{iz} \quad (28)$$

$$H_{ix} = H_i \cos \gamma_{1z} \cos \gamma_{ix} \quad (29)$$

$$H_{iy} = H_i \cos \gamma_{iz} \sin \gamma_{ix} \quad (30)$$

Углы γ в уравнениях (25) – (30) зависят от положения точки соединения канатов аэростатно-канатной системы и являются переменными величинами, зависящими от прикладываемой нагрузки.

Определить углы γ можно следующим образом:

$$\cos \gamma_{1x} = \frac{x_F - x_1}{\sqrt{(x_F - x_1)^2 + (y_F - y_1)^2 + (z_F - z_1)^2}} \quad (31)$$

$$\cos \gamma_{2x} = \frac{x_F - x_2}{\sqrt{(x_F - x_2)^2 + (y_F - y_2)^2 + (z_F - z_2)^2}} \quad (32)$$

$$\cos \gamma_{3x} = \frac{x_F - x_3}{\sqrt{(x_F - x_3)^2 + (y_F - y_3)^2 + (z_F - z_3)^2}} \quad (33)$$

$$\cos \gamma_{1y} = \frac{y_F - y_1}{\sqrt{(x_F - x_1)^2 + (y_F - y_1)^2 + (z_F - z_1)^2}} \quad (34)$$

$$\cos \gamma_{2y} = \frac{y_F - y_2}{\sqrt{(x_F - x_2)^2 + (y_F - y_2)^2 + (z_F - z_2)^2}} \quad (35)$$

$$\cos \gamma_{3y} = \frac{y_F - y_3}{\sqrt{(x_F - x_3)^2 + (y_F - y_3)^2 + (z_F - z_3)^2}} \quad (36)$$

$$\cos \gamma_{1z} = \frac{z_F - z_1}{\sqrt{(x_F - x_1)^2 + (y_F - y_1)^2 + (z_F - z_1)^2}} \quad (37)$$

$$\cos \gamma_{2z} = \frac{z_F - z_2}{\sqrt{(x_F - x_2)^2 + (y_F - y_2)^2 + (z_F - z_2)^2}} \quad (38)$$

$$\cos \gamma_{3z} = \frac{z_F - z_3}{\sqrt{(x_F - x_3)^2 + (y_F - y_3)^2 + (z_F - z_3)^2}} \quad (40)$$

Где x_F, y_F, z_F – координаты точки соединения тягово-возвратных канатов в неподвижной системе координат (переменные величины, подлежащие определению), x_i, y_i, z_i – координаты точек соединения канатов с контурными шкивами у поверхности земли (принимаются в качестве исходных величин).

Дополнительно определим усилия, возникающие в канатах за счет смещения точки их соединения в том случае, когда канаты деформируются под действием подъемной силы аэростата, либо за счет внешнего усилия, действующего на аэростат и передающегося через верхнюю подвеску.

Проекции длин канатов на их собственные направления в недеформированном состоянии определяются по зависимостям:

$$l_{1F} = \sqrt{(x_F - x_1)^2 + (y_F - y_1)^2 + (z_F - z_1)^2} \quad (41)$$

$$l_{2F} = \sqrt{(x_F - x_2)^2 + (y_F - y_2)^2 + (z_F - z_2)^2} \quad (42)$$

$$l_{3F} = \sqrt{(x_F - x_3)^2 + (y_F - y_3)^2 + (z_F - z_3)^2} \quad (43)$$

С другой стороны, усилия растяжения пропорциональны удлинениям, таким образом, запишем:

$$N_1 = \frac{l_{1F} - l_{10}}{l_{10}} \cdot k_1 \quad (44)$$

$$N_2 = \frac{l_{2F} - l_{20}}{l_{20}} \cdot k_2 \quad (45)$$

$$N_3 = \frac{l_{3F} - l_{30}}{l_{30}} \cdot k_3 \quad (46)$$

где l_{i0} – длины тросов в недеформированном состоянии, k_i – жесткости тросов.

Введем дополнительные обозначения:

$$F_x = V_{1Bx} + V_{2Bx} + V_{3Bx} + H_{1Bx} + H_{2Bx} + H_{3Bx} + S_x \quad (47)$$

$$F_y = V_{1By} + V_{2By} + V_{3By} + H_{1By} + H_{2By} + H_{3By} + S_y \quad (48)$$

$$F_z = V_{1Bz} + V_{2Bz} + V_{3Bz} + H_{1Bz} + H_{2Bz} + H_{3Bz} + S_z \quad (49)$$

где S_x, S_y, S_z – компоненты дополнительных внешних нагрузок (подъемная сила аэростата F_a , ветровое воздействие на аэростат F_v , передаваемое верхней подвеской, вес перемещаемого груза и вес грузоподъемного устройства, сопротивление среды при перемещении аэростата, зависящее от скорости его движения и т.д., задаются в качестве исходных данных) по осям x, y, z неподвижной системы координат xuz соответственно.

Таким образом, все внешние нагрузки на аэростатно-канатную систему приводятся к ортогональным проекциям на оси неподвижной системы координат xuz , приложенным к точке стыковки тросов.

Систему уравнений, описывающих равновесие точки стыковки канатов аэростата, равно как и ее перемещения при приложении произвольных нагрузок, представим в виде уравнения равновесия:

$$\begin{cases} \cos\gamma_{1x} \cdot N_1 \cdot \text{He}(N_1) + \cos\gamma_{2x} \cdot N_2 \cdot \text{He}(N_2) + \cos\gamma_{3x} \cdot N_3 \cdot \text{He}(N_3) = F_x \\ \cos\gamma_{1y} \cdot N_1 \cdot \text{He}(N_1) + \cos\gamma_{2y} \cdot N_2 \cdot \text{He}(N_2) + \cos\gamma_{3y} \cdot N_3 \cdot \text{He}(N_3) = F_y \\ \cos\gamma_{1z} \cdot N_1 \cdot \text{He}(N_1) + \cos\gamma_{2z} \cdot N_2 \cdot \text{He}(N_2) + \cos\gamma_{3z} \cdot N_3 \cdot \text{He}(N_3) = F_z \end{cases} \quad (50)$$

В систему (50) введены единичные функции Хевисайда ($\text{He}(\xi) = 0$ при $\xi < 0$, $\text{He}(\xi) = 1$ при $\xi \geq 0$), таким образом, учитывается, что канаты не сопротивляются осевому сжатию.

С помощью системы уравнений (50) можно получить решение и обратной задачи по определению значений напряжений N_1, N_2, N_3 . при варьировании пе-

перемещений точек x_F, y_F, z_F с учетом действующих внешних факторов, задающихся как исходные данные.

Обобщение численных результатов решения системы (50) относительно перемещений x_F, y_F, z_F приводит к аналогам жесткостей системы в зависимости от направления перемещения точки стыковки канатов по осям x, y, z в виде нелинейных трансцендентных зависимостей:

$$k_x = f(X_1, X_2 \dots X_n) \quad (51)$$

$$k_y = f(X_1, X_2 \dots X_n) \quad (52)$$

$$k_z = f(X_1, X_2 \dots X_n) \quad (53)$$

где $X_1 \dots X_n$ – исходные данные (т.е. все величины, так или иначе фигурирующие в предыдущих зависимостях, используемых при расчете x_F, y_F, z_F).

Поскольку по результатам решения системы получаются зависимости ортогональных перемещений точки соединения канатов в зависимости от направлений и интенсивностей воздействия, то решение может быть использовано при расчете колебаний грузовой подвески АКС. Рабочая схема для расчета колебаний грузовой подвески АКС представлена на рисунке 4.

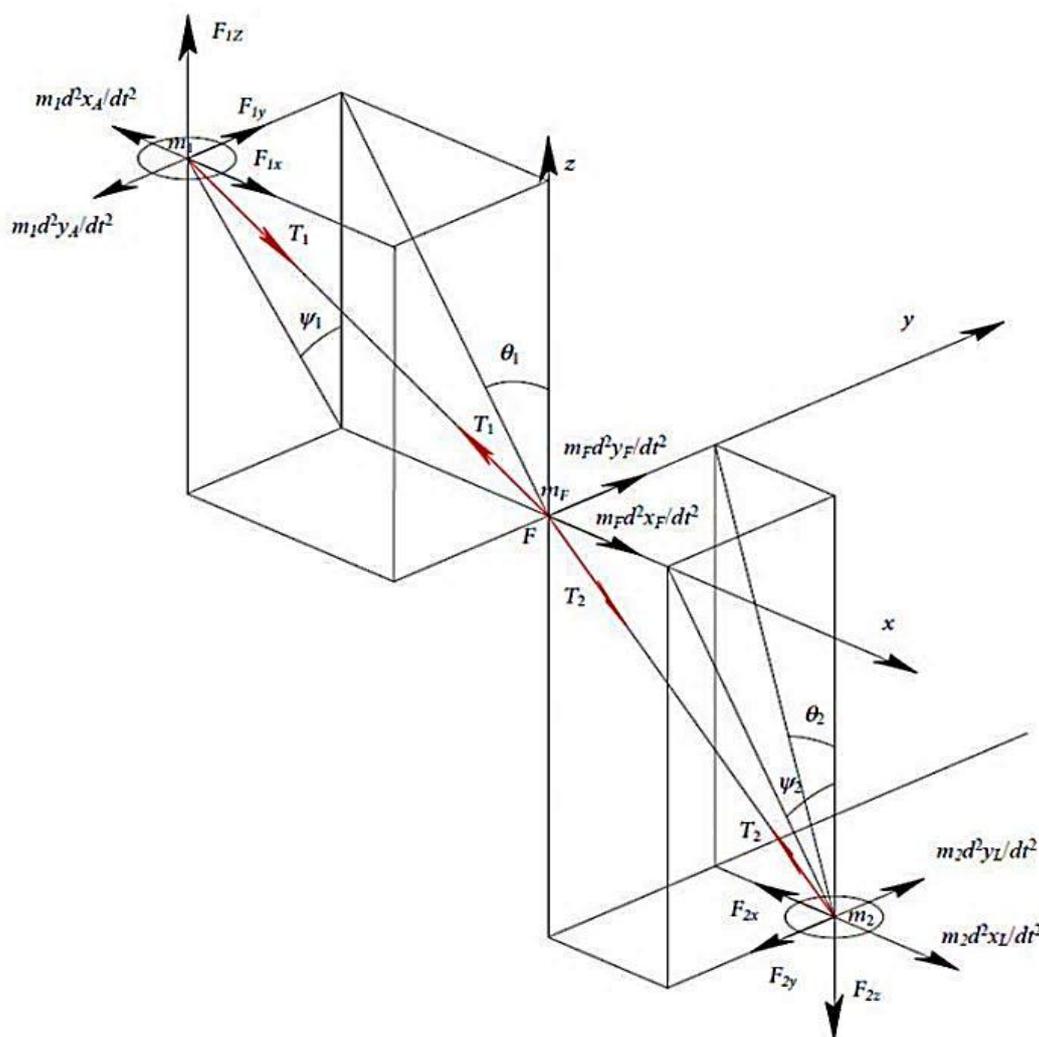


Рис. 4. Рабочая схема для расчета колебаний грузовой подвески АКС.

Для этого составляется и решается система нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, которая в общем виде записывается следующим образом:

$$\begin{aligned}
m_1 \cdot \frac{d^2 x_A}{dt^2} + n_1 \cdot \frac{dx_A}{dt} + T_1 \sin \theta_1 &= F_{1x} \\
m_F \cdot \frac{d^2 x_F}{dt^2} + n_F \cdot \frac{dx_F}{dt} + k_x x_F - T_1 \sin \theta_1 - T_2 \sin \theta_2 &= F_x \\
m_2 \cdot \frac{d^2 x_L}{dt^2} + n_2 \cdot \frac{dx_L}{dt} + T_2 \sin \theta_2 &= F_{2x} \\
m_1 \cdot \frac{d^2 y_A}{dt^2} + n_1 \cdot \frac{dy_A}{dt} + T_1 \sin \psi_1 &= F_{1y} \\
m_F \cdot \frac{d^2 y_F}{dt^2} + n_F \cdot \frac{dy_F}{dt} + k_y y_F - T_1 \sin \psi_1 - T_2 \sin \psi_2 &= F_y \\
m_2 \cdot \frac{d^2 y_L}{dt^2} + n_2 \cdot \frac{dy_L}{dt} + T_2 \sin \psi_2 &= F_{2y} \\
T_1 = \frac{F_{1z}}{\cos \theta_1} = \frac{F_{1z}}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_1}} \\
T_2 = \frac{F_{2z}}{\cos \theta_2} = \frac{F_{2z}}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_2}} \\
\sin \theta_1 = \frac{x_A - x_F}{l_1}, \\
\sin \theta_2 = \frac{x_L - x_F}{l_2} \\
\sin \psi_1 = \frac{y_A - y_F}{l_1} \\
\sin \psi_2 = \frac{y_L - y_F}{l_2}
\end{aligned} \tag{54}$$

где m_1 – масса аэростата; m_2 – масса грузозахватного механизма; m_F – масса бортовой лебедки, размещенной в точке подвеса (примечание: при отсутствии бортовой лебедки величина m_F принимается равной нулю); n_1, n_2 – коэффициенты демпфирования канатов верхней и нижней подвесок соответственно; n_F – коэффициент демпфирования тягово-возвратных канатов; l_1 – длина верхней подвески; l_2 – длина нижней подвески; F_{1x}, F_{1y}, F_{1z} – внешние нагрузки на аэростат (исходные данные); F_{2x}, F_{2y}, F_{2z} – внешние нагрузки на грузозахватный механизм (исходные данные); T_1, T_2 – натяжения (внутренние усилия) в верхней и нижней подвесках; $\psi_1, \psi_2, \theta_1, \theta_2$ – углы, характеризующие отклонения аэростата и ГЗМ от положения точки подвеса.

В ходе дальнейших исследований выявлено, что при выполнении работ вдоль периметра рабочего треугольника, в канатах АКС возникают максимальные усилия, а при определенном направлении и силе ветра, один или два каната системы могут быть на время выключены из работы. Это ведет к неуправляемости и возникновению ситуаций, когда точка подвеса и, соответственно, грузовая подвеска с ГЗМ смещаются от линии периметра рабочего треугольника.

При воздействии ветровой нагрузки, направленной в сторону деляны, усилие в одном из канатов (или даже в двух) оказывается равным нулю. Исходя из этого, система работающих канатов поворачивается так, что оказывается параллельной результирующей силе P^* .

В экстремальном случае, когда ветровая нагрузка перпендикулярна стороне ij , плоскость $ij0$ (плоскость, образуемая траекторией смещения каната) будет иметь наклон к горизонтальной плоскости на угол $\beta = \arctg \frac{P}{P_6}$, определяя тем самым основную расчетную схему (рис. 5).

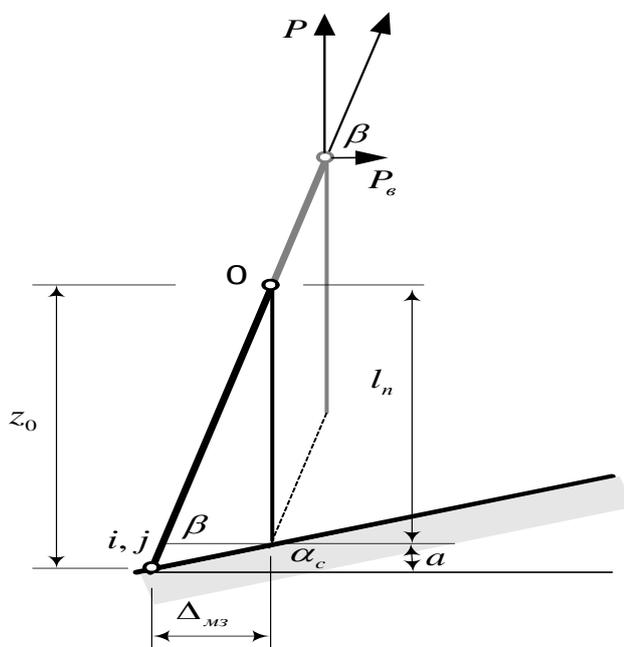


Рис. 5. Расчетная схема для определения размеров зоны недоступности: l_n – длина грузовой подвески; α_c – угол наклона поверхности деляны (локальный угол склона); $\Delta_{мз}$ – размер недоступной зоны.

Основываясь на разработанной методике по определению усилий в тягово-возвратных канатах трехлинейной АКС, позволяющей определять оптимальные значения длины грузовой подвески, предложен алгоритм расчета размеров внешнего контура лесозаготовительного участка.

Размер недоступной зоны определяется по формуле:

$$\Delta_{мз} = \frac{l_n}{\text{tg } \beta - \text{tg } \alpha_c}. \quad (55)$$

$$\text{где: } \operatorname{tg} \beta = \frac{P}{P_6} = \frac{z_0}{\Delta_{.M3}}, \quad \operatorname{tg} \alpha_c = \frac{a}{\Delta_{.M3}}, \quad a = z_0 - l_n = \Delta_{.M3} \operatorname{tg} \beta - l_n, \quad a = \Delta_{.M3} \operatorname{tg} \alpha_c$$

Отметим, что $\Delta_{.M3} = \Delta_{.M3}^{\max}$, если ветровая нагрузка направлена в сторону α_c^{\max}

При известном положении деляны и особенностях рельефа (характерные локальные углы склона) следует подсчитать размеры $\Delta_{.M3}$ и устанавливать лебедки (контурные шкивы) так, чтобы габариты деляны не попадали в недоступную зону (рис. 6).

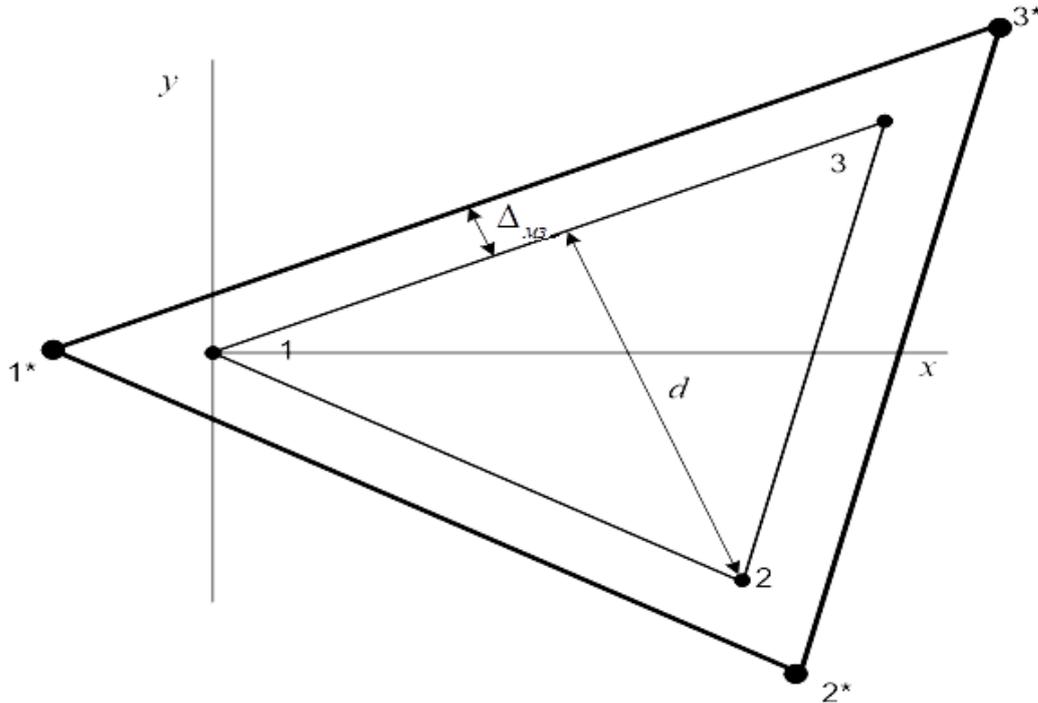


Рис. 6. Расчетная схема для определения точек установки лебедок.

Предположим, что максимальная величина $\Delta_{.M3}$ оказалась на стороне 13. Определим расстояние d от противоположной вершины треугольника до указанной стороны согласно расчетной схеме обозначенной на рисунке 6.

Зададим направляющий вектор стороны 13:

$$\mathbf{v}_{13} = \begin{pmatrix} x_3 - x_1 \\ y_3 - y_1 \\ z_3 - z_1 \end{pmatrix} \quad (56)$$

Далее найдем векторное произведение:

$$\mathbf{v}_{12} = \mathbf{v}_{13} \times \begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ y_2 - y_1 \end{pmatrix} \quad (57)$$

Соответственно искомая величина будет равна:

$$d = \frac{\sqrt{\mathbf{v}_{12}^T \mathbf{v}_{12}}}{\sqrt{\mathbf{v}_{13}^T \mathbf{v}_{13}}} \quad (58)$$

Далее, согласно расчетной схеме на рисунке 5, определяем отношение:

$$\gamma = \frac{d + \Delta_{M3} / \cos \alpha_c}{d} \quad (59)$$

Используя расчетную схему на рисунке 5, найдем координаты точек 1^* , 2^* , 3^* :

$$x_i^* = x_i - (x_c - x_i)(\gamma - 1) \quad (60)$$

$$y_i^* = y_i - (y_c - y_i)(\gamma - 1), \quad (i=1, 2, 3), \quad (61)$$

$$\text{где } x_c = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}, \quad y_c = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}.$$

Координаты z_i^* определим из уравнения плоскости $Ax + By + Cz + D = 0$, проходящей через точки 1, 2, 3:

$$z_i^* = -\frac{1}{C}(Ax_i^* + By_i^* + D) \quad (62)$$

Тем самым оказываются определенными координаты лебедок 1^* (x_1^* , y_1^* , z_1^*), 2^* (x_2^* , y_2^* , z_2^*), 3^* (x_3^* , y_3^* , z_3^*).

Четвертая глава посвящена систематизации конструктивных и технологических параметров аэростатно-канатных систем для заготовки и транспортировки древесины. Дано описание принципа работы и конструктивных особенностей разработанных грузозахватных механизмов при вертикальном изъятии и транспортировке деревьев, которые отличаются низкими показателями энергозатрат, а также повышенной оперативностью и более низкой себестоимостью выполняемых работ. Основными вариантами, разработанных ГЗМ являются:

- разделяющийся нисходящего типа движения;
- разделяющийся восходящего типа движения;
- восходящего типа движения с дополнительным манипулятором;
- одиночный восходящего типа движения;

Пример технологического процесса по использованию разделяющегося ГЗМ нисходящего типа движения (РГЗМ НТД) представлен на рисунке 7.

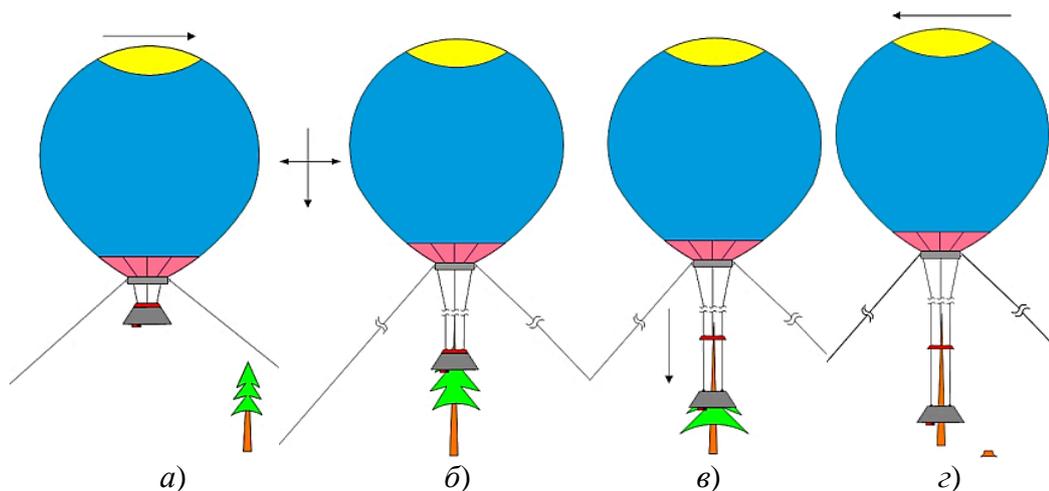


Рис. 7. Технологический процесс заготовки древесины с использованием РГЗМ НТД:
а) движение в точку загрузки; б) процесс наведения; в) процесс очистки от ветвей и спил;
г) процесс транспортировки в точку разгрузки.

Пример технологического процесса по использованию разделяющегося ГЗМ восходящего типа движения (РГЗМ ВТД) представлен на рисунке 8.

Исходя из конструктивных особенностей и принципа работы ГЗМ, разработаны рекомендации для реализации технологических процессов при разработке лесосек аэростатно-канатными системами в зависимости от заданных условий эксплуатации.

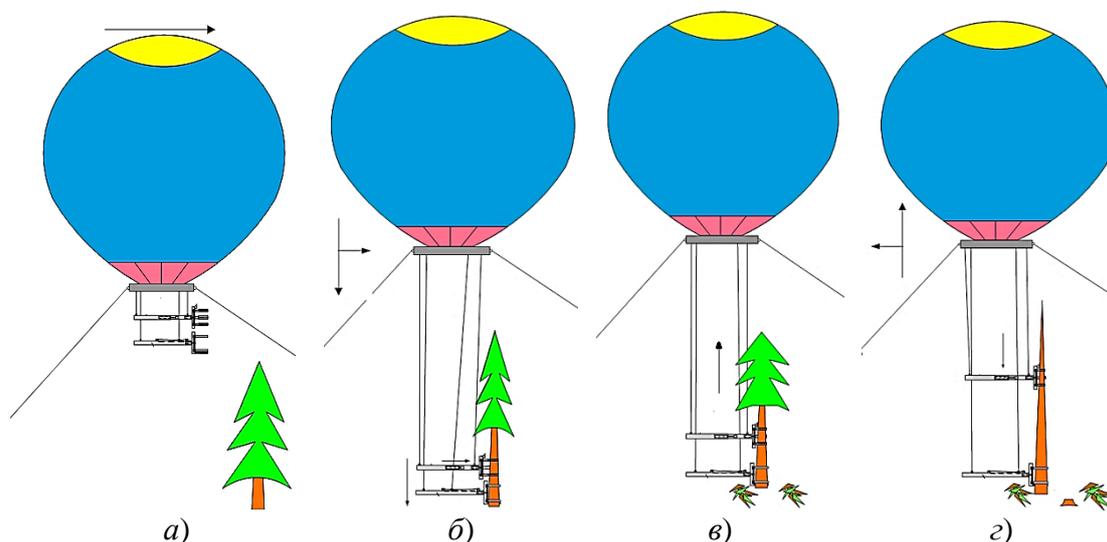


Рис. 8. – Технологический процесс заготовки древесины с использованием РГЗМ ВТД: а) движение в точку загрузки; б) процесс наведения; в) процесс очистки от ветвей и спил; г) транспортировки в точку разгрузки.

В пятой главе рассмотрена конструкция арочной пневматической опоры, представлены методика исследований и результаты моделирования процесса колебаний, возникающих в несущем канате КЛТС на базе арочных пневматических конструкций.

Для транспортировки древесины в труднодоступной местности с помощью подвесной канатной системы и самопередвигающейся радиоуправляемой грузовой каретки несущий канат удерживается за счет пневматических опор (рис. 9). Особенностью данных опор является наличие в конструкции внутренних шаровых элементов, служащих демпфером и обеспечивающих одновременно жесткость и гибкость конструкции, а также устойчивость на водной поверхности.

Основными параметрами, которые обеспечивают устойчивость пневматических арочных конструкций, являются внутреннее давление и диаметр сечения её основания.

Определить деформации пневматических опор расчетным путем, учитывая сопряжение и взаимодействие внутренних сфер, достаточно сложно из-за неустойчивости и реологических свойств материала. Поэтому для реализации данной задачи использовались программные комплексы «ЛИРА-САПР 2014 PRO», «ЛИРА-САПР 2014 Сапфир ЖБК», в основу которого положен метод конечных элементов.

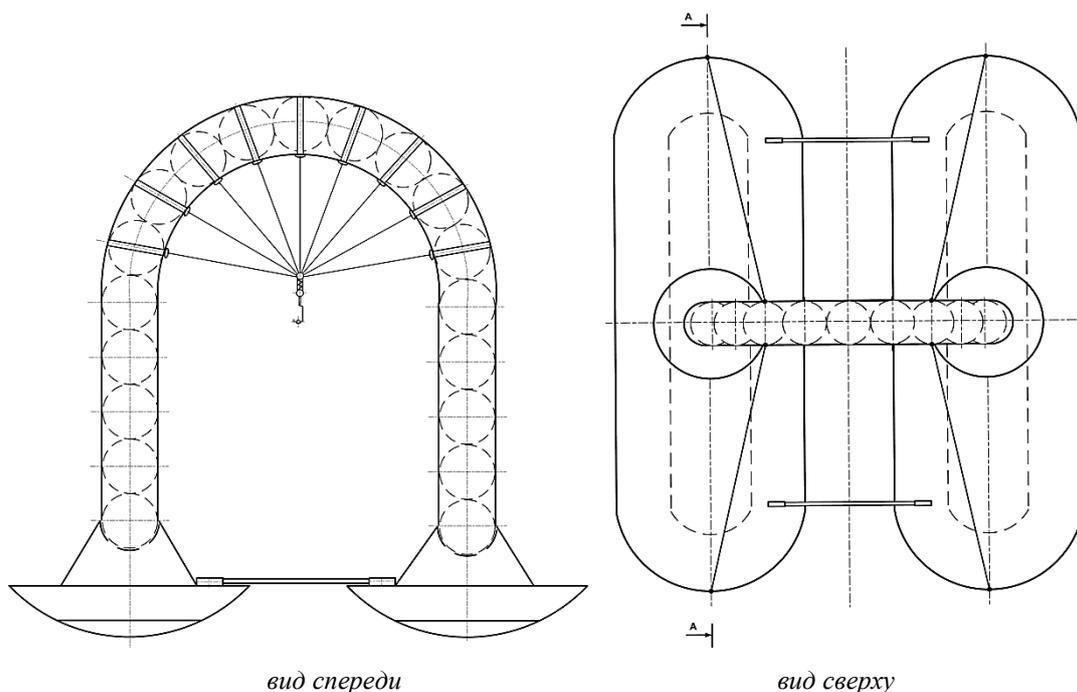


Рис. 9. Общий вид пневматической плавающей конструкции.

В ходе проведения экспериментов были выявлены различные режимы колебаний. Наиболее опасным режимом является такой, при котором поступательные колебания могут встречаться с возвратными, что приводит к резкому ослаблению (провису) и последующему натяжению отрезка несущего каната («эффект плётки») (рис.10). Данная ситуация может привести к аварии и нарушению технологического цикла транспортных работ.

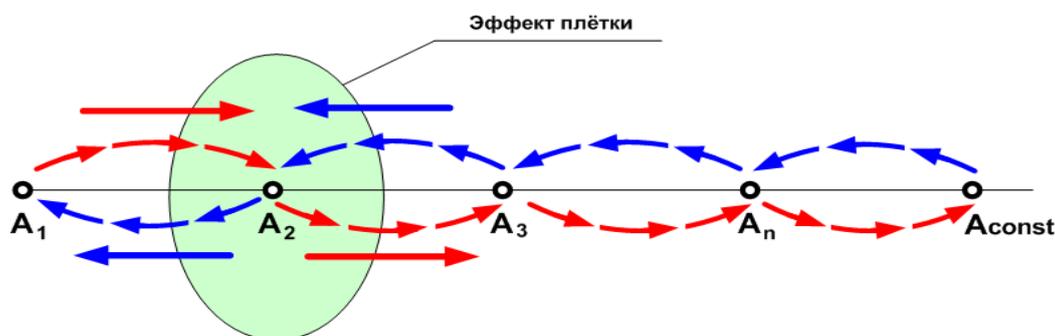


Рис. 10. Режим колебаний, приводящий к «эффекту плётки».

Первым этапом разрабатываемой методики является определение зависимости учета статической составляющей ветровой и волновой нагрузок путём аппроксимации результатов расчета методом наименьших квадратов.

Расчетное значение нагрузки, приложенной к вершине опоры, действие которой эквивалентно ветровой $F_{ЭКВВЕТР}$ [кН], определим из условия:

$$F_{ЭКВВЕТР} = 0,00052 d_{оп}^{1,158} H_{оп}^{1,117} v_0^{1,979} \quad (63)$$

Расчетное значение силы, действующей по горизонту в плоскости контакта плавающей пневматической опоры с поверхностью воды, эквивалентна волновой нагрузке $F_{ЭКВВОЛН}$ [кН] и определяется по формуле:

$$F_{ЭКВВОЛН} = 46,93 \cdot \left(\frac{b^2 h \cdot \left(-\frac{1,477}{\lambda} a + 1,137 \right)}{\left(\frac{a}{b} \right)^{0,604} \lambda} \right) \cdot \exp \left(-5,736 \frac{d}{\lambda} \right) \quad (64)$$

С учетом того, что ветровые и волновые нагрузки могут носить случайный характер, будем рассматривать смещения опор в двух случаях: силы действуют в плоскости ZOY (при расчете поперечных колебаний канатной дороги) и силы действуют в плоскости ZOX (при расчете продольных колебаний канатной дороги). Для этого рассмотрим равновесие плавающей пневматической опоры под действием горизонтальных сил F_1 и F_2 , направленных по осям x , y (рис. 11).

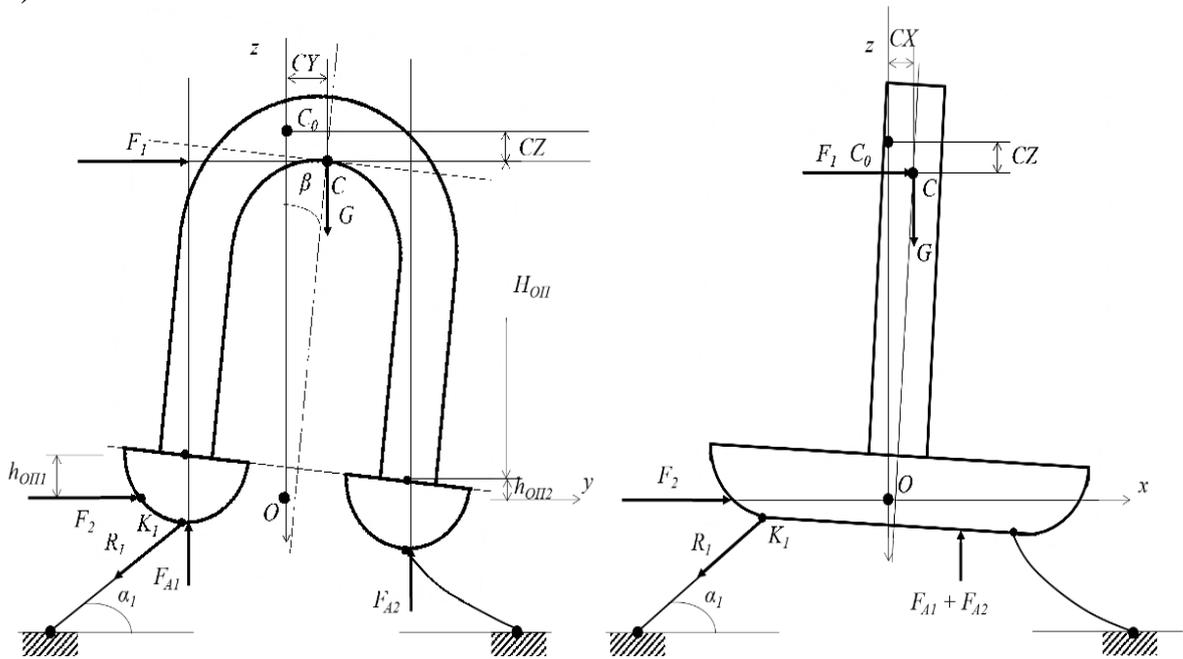


Рис. 11. Плавающая пневматическая опора под действием внешних сил F_1 , F_2 , G в плоскостях x , y .

При повороте центральной оси платформы в плоскости ZOY сила F_{A2} увеличивается по мере уменьшения расстояния $h_{оп2}$, пренебрегая перемещением точки приложения силы G по горизонтали, можем записать уравнение:

$$F_1 \cdot H_{оп} + G \cdot \frac{LY}{2} - F_{A2} LY = 0 \quad (65)$$

При этом силу F_{A2} найдем по формуле:

$$F_{A2} = \rho_B g \cdot L_Y \cdot R^2 \cdot \left(\arccos \frac{h_{оп2}}{R} - \frac{h_{оп2}}{R} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{h_{оп2}}{R} \right)^2} \right), \quad (66)$$

При этом величина $h_{оп2}$ определяется из выражения:

$$h_{оп2} = h_{оп} + H_{оп} - 0,5LY \sin \beta - H_{оп} \cos \beta \quad (67)$$

В итоге, после аппроксимации результатов расчетов по выражениям (65) – (67), с некоторым приближением для угла β получим:

$$\beta = \frac{F_1 \cdot H_{оп}}{1,5 \cdot \rho \cdot g \cdot LX \cdot R \cdot LY^2} \quad (68)$$

Уравнения равновесия для определения перемещений точки C

$$-R_1 \sin \alpha_1 - G + F_{A1} + F_{A2} = 0 \quad (69)$$

$$-R_1 \cos \alpha_1 + F_1 + F_2 = 0 \quad (70)$$

По аналогии с F_{A2} , запишем выражение для определения силы F_{A1} :

$$F_{A1} = \rho_B g \cdot L_y \cdot R^2 \cdot \left(\arccos \frac{h_{оп1}}{R} - \frac{h_{оп1}}{R} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{h_{оп1}}{R} \right)^2} \right), \quad (71)$$

Расстояния $h_{оп1}$, $h_{оп2}$ с учетом отклонения оси опоры от вертикали на угол β и перемещения точки C найдем по формулам:

$$h_{оп2} = h_{оп} + H_{оп} - C_z - 0,5LY \sin \beta - H_{оп} \cos \beta \quad (72)$$

$$h_{оп1} = h_{оп} + H_{оп} - C_z + 0,5LY \sin \beta - H_{оп} \cos \beta \quad (73)$$

Расчеты при действии сил F_1 , F_2 в плоскости ZOX (продольные колебания канатной дороги) проводятся по аналогии со случаем приложения сил в плоскости ZOY , но с тем отличием, что угол поворота β , а также силы F_{A1} , F_{A2} , оцениваются на основании решения системы приближенных уравнений:

$$\begin{cases} F_1 H_{оп} \approx \frac{2}{3} (F_{A1} + F_{A2}) \cdot LX \cdot \cos \beta \\ F_{A1} = F_{A2} \\ F_{A1} + F_{A2} \approx 2\pi \cdot \rho_B g \cdot R^2 \cdot (R - CZ) \cdot LX \end{cases} \quad (74)$$

где F_1 - горизонтальная сила, приложенная к вершине опоры (эквивалент статической составляющей ветровой нагрузки), F_2 - горизонтальная сила, приложенная к опоре в плоскости контакта с водной поверхностью (эквивалент статической составляющей волновой нагрузки), $H_{оп}$ - высота опоры, LY - расстояние между несущими элементами опоры, LX - длина несущего элемента опоры, R - радиус несущего элемента арочной опоры, α - угол закрепления троса опоры, L_0 - длина каната, удерживающего основание опоры, EA - жесткость каната.

После проведенных расчетов и статистической обработки результатов, получены уравнения, выражающие связь внешних нагрузок с перемещением точки C [м] при действии сил F_1 и F_2 [кН], соответственно, по оси OX и OY , а также G [кН] по оси z :

$$CY = 127 \frac{H_{оп}^{0,894}}{R^{0,796} LY^{0,94} LX^{1,764}} F_1 + 9,53 \frac{1}{R^{0,796} LY^{0,801} LX^{0,203}} F_2 \quad (75)$$

$$CX = 27,9 \frac{H_{оп}^{0,811}}{R^{0,796} LX^{1,777}} F_1 + 2,63 \frac{1}{R^{0,796} LX^{0,1431}} F_2 \quad (76)$$

$$CZ = \frac{1}{30 \cdot LX \cdot R} G \quad (77)$$

Исходя из того, что вертикальное перемещение трелевочной каретки с грузом равно провису несущего каната в точке нахождения каретки, запишем уравнение для определения поперечных колебаний по оси z в виде:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{Hql}{V^2 x \cdot (l-x) \cdot G} z - \frac{lq + 2G}{2G} + \frac{g}{V^2} = 0, \quad (78)$$

где q – вес 1 погонного метра несущего каната, l – длина секции канатной дороги, H – сила растяжения несущего каната, x – расстояние от каретки с грузом до опоры, принимаемой за начало отсчета.

Для расчета значений колебаний вершин пневматических опор в рассматриваемой системе составим расчетную схему в соответствии с рисунком 12.

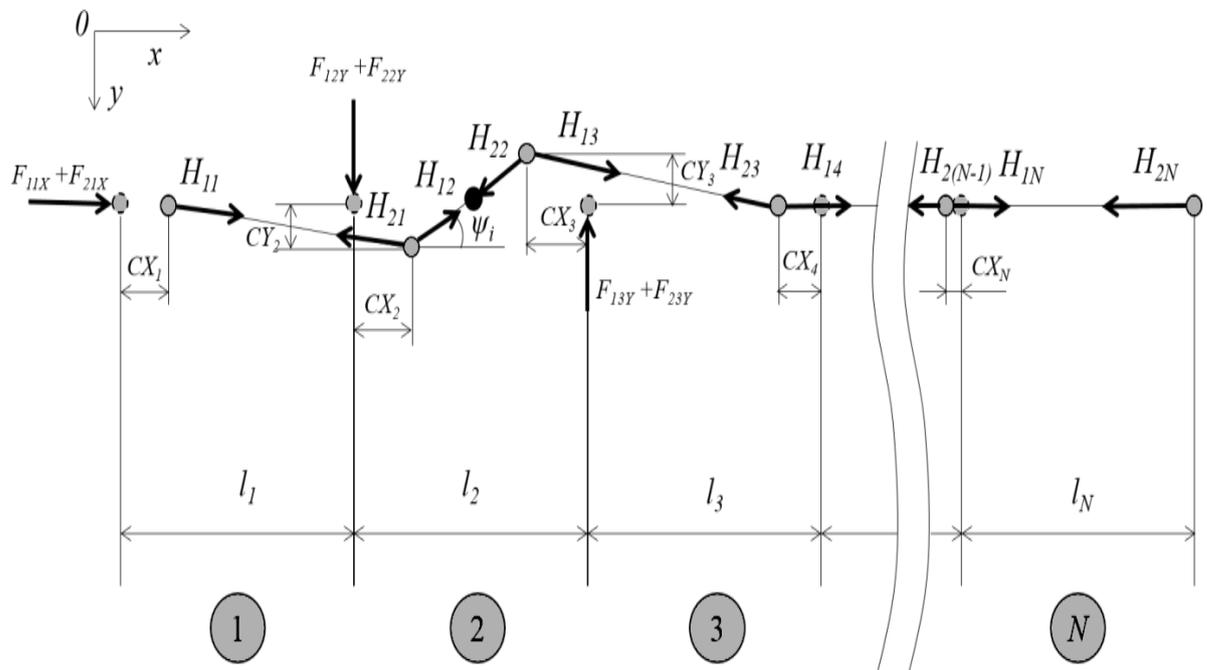


Рис. 12. Расчетная схема КЛТС на базе ППК.

По результатам аппроксимации расчетных значений максимального вертикального перемещения z_{MAX} получено выражение (79), учитывающее влияние наклона несущего каната на величину максимального вертикального перемещения каретки грузом. Результат решения данного уравнения представлен в виде графиков на рисунке 13.

$$z_{MAX} = 0,0223 \cdot l \cdot \sqrt[3]{\frac{G \cdot V^2 \cdot \cos^4 \alpha}{EA}} \quad (79)$$

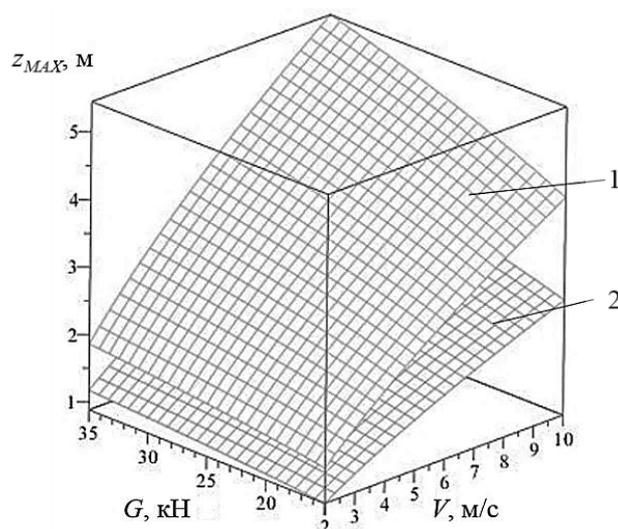


Рис. 13. Максимальное вертикальное перемещение каретки с грузом при движении от опоры к опоре ($l = 50$ м, $EA = 30$ МПа):

1 – угол несущего каната $\alpha = 0^\circ$, 2 – угол несущего каната $\alpha = 45^\circ$

Процесс развития продольных колебаний плавающих пневматических опор можно описать системой дифференциальных уравнений второго порядка:

$$m_i \frac{d^2 CX_i}{dt^2} + \gamma_i \frac{dCX_i}{dt} + K_{xi} \cdot CX_i = f(CX) + f(HX) + f(FX) \quad (80)$$

где CX_i – перемещение вершины мачты по оси x , m_i – масса опоры, γ_i – коэффициент демпфирования, K_{xi} – аналог коэффициента жесткости, связывающий сопротивление перемещению вершин опор по оси x и усилия, им противодействующие (обусловлены действием якорей и сил Архимеда при отклонении оси опоры от вертикали):

$$K_{xi} = \frac{1}{A_{xi} F_{1ix} + B_{xi} \cdot F_{2ix}} \quad (81)$$

$$A_{xi} = 27,9 \frac{H_{оп}^{0,811}}{R^{0,796} LX^{1,777}}, \quad B_{xi} = 2,63 \frac{1}{R^{0,796} LX^{0,1431}}$$

$f(CX)$ – функция, характеризующая влияние усилия со стороны растянутого несущего каната за счет смещения вершин опор друг относительно друга:

$$f(CX) = C_i \text{He}(CX_{i+1} - CX_i) - C_{i-1} \text{He}(CX_i - CX_{i-1}), \quad (82)$$

$\text{He}(\xi)$ – единичная функция Хевисайда, определяемая формулой:

$$\text{He}(\xi) = \begin{cases} 0, & \xi \leq 0 \\ 1, & \xi > 0 \end{cases} \quad (83)$$

C_i – усилие сопротивления растяжению троса при смещении вершин опор друг относительно друга:

$$C_i = \frac{EA}{l_i} \cdot (CX_{i+1} - CX_i) \quad (84)$$

$f(FX)$ – функция, характеризующая влияние ветровой и волновой нагрузки на колебания опоры:

$$f(FX) = F_{1iX} + F_{2iX} \quad (85)$$

F_{1i} , F_{2i} – усилия, эквивалентные ветровой и волновой нагрузкам на i -ую опору по оси x ;

$f(H)$ – функция, характеризующая воздействие на опору за счет перемещения каретки с грузом (передается со стороны растянутого несущего каната):

$$f(HX) = H_{1i} \operatorname{He}\left(\frac{i \cdot l_i}{V} - t\right) \cdot \operatorname{He}\left(t - \frac{(i-1) \cdot l_i}{V}\right) - H_{2i} \operatorname{He}\left(\frac{(i-1) \cdot l_i}{V} - t\right) \cdot \operatorname{He}\left(t - \frac{(i-2) \cdot l_i}{V}\right) \quad (86)$$

i – индекс, соответствующий номеру опоры (отсчет ведется от самой удаленной от берега опоры, нумерация начинается с единицы).

Процесс развития поперечных колебаний плавающих опор (вершин их мачт) также описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка, уравнения в общем виде задаются следующим образом:

$$m_i \frac{d^2 CY_i}{dt^2} + \gamma_i \frac{dCY_i}{dt} + K_{Y_i} \cdot CY_i = f(CY) + f(FY) \quad (87)$$

где CY_i – перемещение вершины мачты по оси y ; K_{Y_i} аналог коэффициента жесткости, связывающий сопротивление перемещению вершин опор по оси y и усилия, им противодействующие (обусловлены действием якорей и сил Архимеда при отклонении оси опоры от вертикали):

$$K_{Y_i} = \frac{1}{A_{Y_i} F_{1iY} + B_{Y_i} \cdot F_{2iY}} \quad (88)$$

$$A_{Y_i} = 127 \frac{H_{OII}^{0,894}}{R_i^{0,796} LY_i^{0,94} LX_i^{1,764}}, \quad B_{Y_i} = 9,53 \frac{1}{R_i^{0,796} LY_i^{0,801} LX_i^{0,203}}$$

$f(CY)$ – функция, характеризующая влияние усилия со стороны растянутого несущего каната за счет смещения вершин опор друг относительно друга:

$$f(CY) = C_{iY} \operatorname{He}(CY_{i+1} - CY_i) - C_{(i-1)Y} \operatorname{He}(CY_i - CY_{i-1}), \quad (89)$$

C_{iY} – усилие сопротивления растяжению каната при смещении вершин опор друг относительно друга:

$$C_{Y_i} = \frac{EA}{l_i} \cdot (CY_{(i+1)Y} - CY_i) \cdot \left(\frac{CY_i + CY_{i+1}}{l_i}\right), \quad (90)$$

введение множителя $\left(\frac{CY_i + CY_{i+1}}{l_i}\right)$ в формулу (90) обусловлено необходимостью

учесть влияние угла ψ_i (схема на рисунке 12) на составляющие натяжения несущего каната по оси y при поперечных колебаниях вершин плавучих опор;

$f(FX)$ – функция, характеризующая влияние ветровой и волновой нагрузок на колебания опоры:

$$f(FY) = F_{1iY} + F_{2iY} \quad (91)$$

$$F_{2iy} = F_{ЭКВВОЛНУ} = 9,547 \cdot \frac{R^2 h}{\lambda} \quad (92)$$

Где значение F_{1iy} определяется по формуле (64).

Для решения систем уравнений вида (78), (87) используем численные методы решения с последующей аппроксимацией расчетных данных. Пример результатов расчета амплитуд продольных колебаний (СХ) канатной лесотранспортной системы на базе плавающих пневматических опорах при внезапном порыве ветра в процессе перемещения каретки с грузом. Пример результата расчета представлен на рисунке 14 для: количество опор – 6, вес груза – 35 кН, высота опоры 10 м, ширина опоры – 7 м, пролет – 50 м, скорость порыва ветра – 5 м/с, скорость движения каретки с грузом – 2 м/с. Цвета линий соответствуют номерам опор (нумерация начинается от наиболее удаленной от берега опоры): черный – 1, красный – 2, зеленый – 3, синий – 4, желтый – 5, оранжевый – 6.

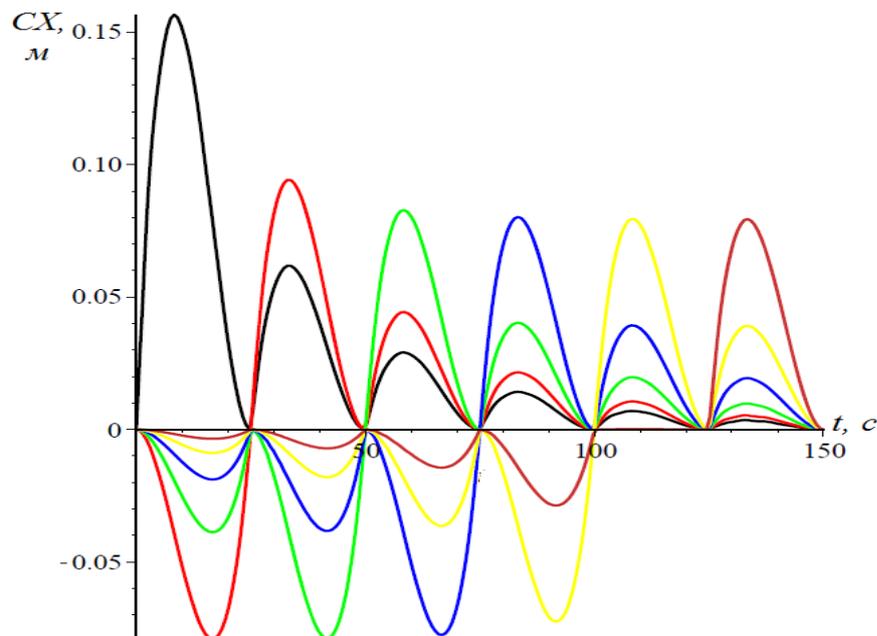


Рис. 14. Изменение амплитуды продольных колебаний канатной лесотранспортной системы на базе плавающих пневматических конструкций.

Отмечено, что с увеличением скорости движения каретки происходит повышение амплитуды колебаний и, как следствие, увеличение провиса несущего каната (рис. 15). Исходя из этого, сформулирована технологическая рекомендация по определению допустимой скорости каретки с грузом по условию ограничения максимального провиса каната.

Задаваясь допустимой величиной провиса каната $[z]$ в 10 % (по конструктивным расчетам) от длины пролета l , система уравнений, определяющая ограничения скорости V и веса каретки G , будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} z_{MAX} = 0,0223 \cdot l_i \cdot \sqrt[3]{\frac{G \cdot V^2 \cdot \cos^4 \alpha}{EA}} \\ \Delta_{iMAX} = \frac{0,0265 \cdot V^{1,326} (G+1)^{0,533} (F_1 + F_2 + 1)^{0,817} l^{0,262}}{LX^{1,198} \exp(-0,119 \cdot [N - n + 1])} \cos \alpha \\ z_{MAX,ДОП} = 0,5 \sqrt{\Delta_i \cdot (2l_i - \Delta_i)} \\ [z] = z_{MAX} + z_{MAX,ДОП} = 0,1l_i \end{array} \right. \quad (93)$$

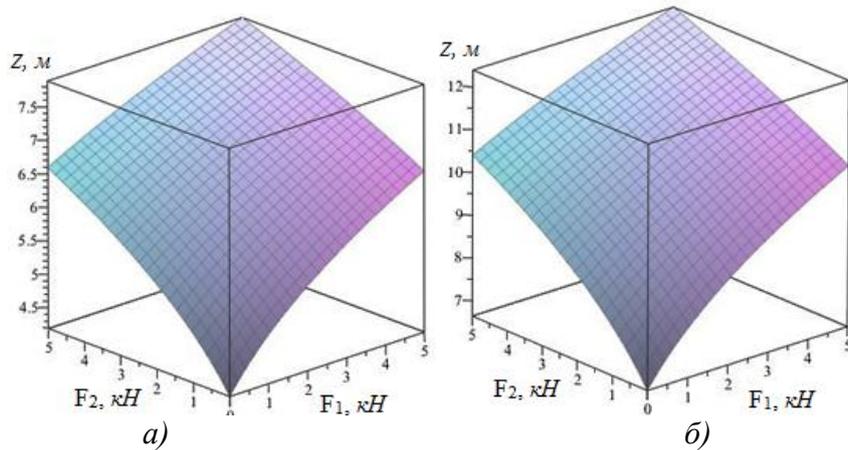


Рис. 15. Максимальный провис каната на первом (дальнем) пролете, F_1 – эквивалент ветровой нагрузки, F_2 – эквивалент волновой нагрузки:
 а) скорость движения каретки – 2 м/с; б) скорость движения каретки – 4 м/с.

Для определения изменений тягового усилия в несущем канате при реализации «эффекта плетки» предложена система уравнений следующего вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_{дин} = H_1 + F_{ЭКВВЕТР} \\ F_{ЭКВВЕТР} = 0,00052 d_{ОП}^{1,158} H_{ОП}^{1,117} v_0^{1,979} \\ H_1 = \frac{k}{1+k} H \\ k = \sqrt{\frac{(l-x)^2 + z^2}{x^2 + z^2}} \\ H = \frac{\sqrt{x^2 + z^2} + \sqrt{(l-x)^2 + z^2} - l}{l} EA \\ z_{MAX} = 0,0223 \cdot l \cdot \sqrt[3]{\frac{G \cdot V^2}{EA}} \\ z = \frac{-4z_{MAX}}{l^2} \cdot x^2 + \frac{4z_{MAX}}{l} \cdot x \\ V = [V] = 3,04l^{0,35} G^{-0,44} \end{array} \right. \quad (94)$$

В результате выполненных работ определены диапазоны возможных продольных и поперечных колебаний, приводящих к динамическим напряжениям в

несущем канате, что даёт возможность оптимизировать скоростные и весовые параметры грузовой каретки, а также конструктивные особенности канатной лесотранспортной системы.

Шестая глава посвящена разработке и описанию технологических процессов при разработке лесосек с использованием лесотранспортных канатных систем на базе пневматических конструкций. Определено, что технологические особенности применения данных систем заключаются не только в использовании их различных модификаций, но и в возможности комбинированного совмещения процесса с другими видами лесозаготовительных, транспортных машин и механизмов.

Модификации КЛТС на базе ППК зависят от основы поверхности. Для водной поверхности, в том числе и болот, включая береговую часть, в основе лежит пневматическая арочная конструкция, которая базируется на отдельных плавающих надувных платформах (рис.16).

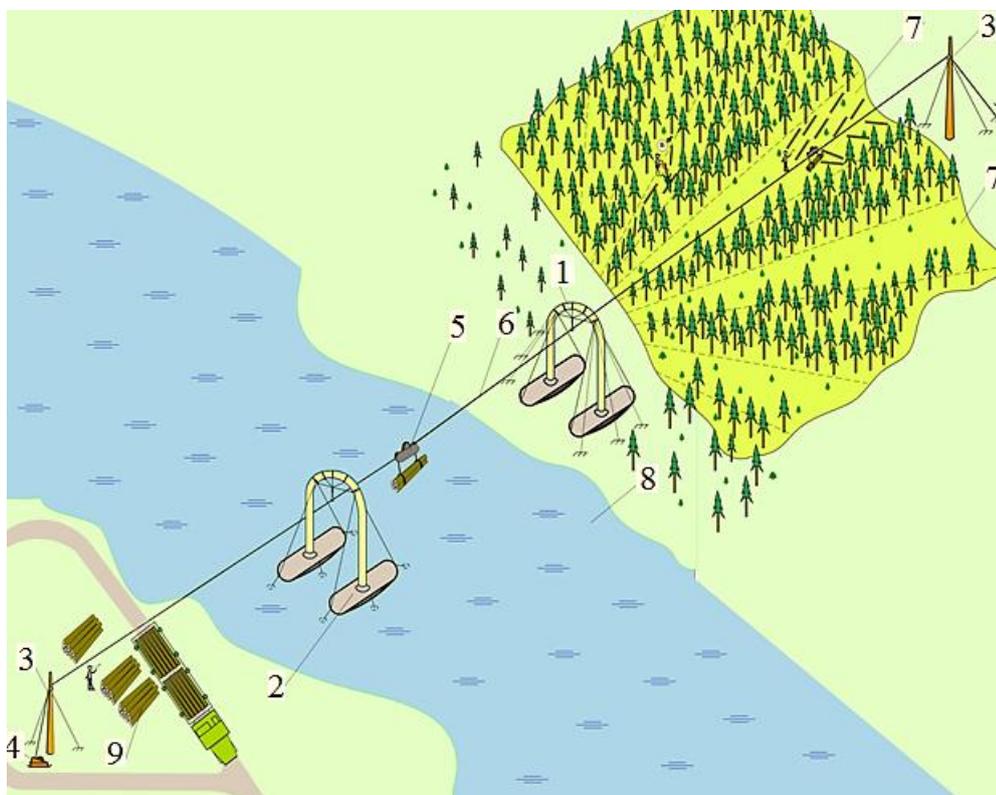


Рис. 16. Технологическая схема разработки лесосеки канатной лесотранспортной системой на базе арочных пневматических конструкций с одновременной обработкой склона и транспортировкой древесины через водную преграду:

1 – береговая пневматическая опора; 2 – пневматическая плавающая опора; 3 – жесткие опоры; 4 – наземная лебедка; 5 – самопередвигающаяся каретка; 6 – несущий канат; 7 – пилорама; 8 – водная преграда; 9 – погрузочный пункт.

Комбинированные технологии, где применяются пневматические конструкции, можно разделить на несколько групп:

- переместительные операции через водные преграды предварительно стрелеванной к берегу древесины с целью её дальнейшей погрузки на водный транспорт;

- переместительные операции через водные преграды с одновременной обработкой горного склона с использованием самопередвигающейся трелевочной каретки;

- переместительные операции через водные преграды с предварительной обработкой лесного участка наземной мини-техникой и трелевкой древесины к пневматической конструкции, расположенной на погрузочном пункте;

- переместительные операции через рельефные преграды с одновременной обработкой горного склона или впадины.

На твердой поверхности могут использоваться пневматические конструкции, конусного типа, служащие для подъема и удержания несущего каната на высоте свыше 20 метров.

В седьмой главе с использованием разработанной методики проведена оценка экономической эффективности применения канатных лесотранспортных систем на базе аэростатических и пневматических конструкций при освоении горных лесных массивов. Выполнены расчеты позволяющие сравнить затраты времени на разработку участка и приведенные затраты на заготовку 1 м^3 древесины с учетом эксплуатационных, технологических и экологических показателей.

Полученные результаты подтвердили экономическую целесообразность использования данных систем в условиях труднодоступности и экологической зависимости лесных территорий.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.

Выполненные в данной научной работе теоретические и практические исследования процесса лесозаготовок с применением лесотранспортных канатных систем на базе аэростатических и пневматических конструкций позволили сделать следующие выводы:

1. Анализ состояния лесного фонда Дальневосточного региона показывает, что в ближайшей перспективе лесопромышленный комплекс ДФО столкнется с острым дефицитом качественной и доступной древесины, это аргументировано следующими показателями:

- основные запасы спелых и качественных древостоев эксплуатационных пород сосредоточены на территориях с характерными признаками труднодоступности и экологической зависимости, где около 34,6% лесных площадей сосредоточено на склонах свыше 20° с примыканием плотной гидрологической сети, болот и влажных грунтов;

- потенциальное качество и продуктивность спелых и перестойных древостоев на территории ДФО представлены преимущественно IV, V классом бонитета, который с учетом времени, будет переходить в более низкий класс Va и Vб;

- запасы приспевающих древостоев по основным эксплуатационным породам по ДФО сравнительно малы для того, чтобы в будущем достичь положительной динамики, заменив, тем самым, иссякающие запасы спелых и перестойных древостоев.

2. Результаты аналитических и натурных исследований показали, что для обеспечения снижения энергетических и финансовых затрат, а так же максимального сохранения лесной среды при изъятии спелых древостоев необходимо применять наиболее эффективный и максимально щадящий вид лесозаготовок, основанный на подвесном или воздушном способе транспортировки древесины с использованием канатных лесотранспортных систем на базе аэростатических и пневматических конструкций (гибридные системы), которые имеют ряд преимуществ над традиционными трелевочными средствами:

- возможность эксплуатации в лесорастительных условиях ДФО с крутыми склонами, с развитой гидрологической сетью и сильно переувлажненными грунтами;

- способность обеспечивать временную оперативную переброску древесины с необорудованных сложных участков суши, где нет возможности строительства причалов и подхода водного транспорта близко к береговой линии;

- уменьшение финансовых и временных затрат на разработку лесного участка за счет снижения количества монтажных и демонтажных операций.

3. Экспериментальными наблюдениями за работой аэростатно-канатной системы МТА-500 установлено, что напряжения удерживающих канатов АКС могут меняться в течение короткого периода времени технологического цикла, вызывая дополнительные особенности колебательных процессов грузовой подвески, что влияет на точность и оперативность наведения ГЗМ на вертикально стоящее дерево.

4. Реализация разработанной методики определения параметров колебаний трех взаимосвязанных точек грузовой подвески АКС позволила:

- описать условия равновесия точки стыковки канатов АКС и её перемещения при приложении произвольных нагрузок в различных режимах эксплуатации;

- определить, что динамические нагрузки, возникающие в тягово-возвратных канатах АКС-5 при идентичных условиях эксплуатации, в среднем на 10-15% выше статических нагрузок, что соответствует условиям прочности синтетических канатов;

- установить, что уменьшение длины верхней части грузовой подвески не приводит к снижению амплитуды колебаний её нижней составляющей с ГЗМ;

- определить, что для повышения устойчивости системы и снижения амплитуды колебаний, диапазон значений длины нижней подвески для транспортной системы АКС-5 должен находиться в пределах 100-150 метров;

- установить, что максимальная амплитуда колебаний нижней подвески постоянной длины с ГЗМ массой 500 кг при критических условиях эксплуатации (порывы ветра от 14 до 18 м/с) может находиться в диапазоне от 1 до 6

метров в течение 50 – 70 секунд; а при благоприятных условиях (порывы ветра от 3 до 5 м/с) – в диапазоне от 0,3 до 1,2 метра в течение 20 – 30 секунд;

5. При исследовании расположения и перемещения ГЗМ нижней грузовой подвески при наведении на вертикально стоящее дерево, установлено:

- при использовании бортовой грузовой лебедки, расположенной под оболочкой аэростата, происходит уменьшение амплитуды и времени колебаний нижней подвески, что повышает точность и оперативность наведения ГЗМ;

- максимальный диапазон отклонений (колебаний) подвижной нижней подвески при использовании бортовой лебедки со скоростью опускания ГЗМ 1 м/с при порывах ветра 10 м/с составит 0,2-0,8 метров, а при ветре 3-5 м/с 0,05-0,1 метра.

6. Разработанный алгоритм для определения размеров внешнего контура лесоэксплуатационного участка позволяет:

- обеспечить минимизацию нагрузок, их распределение между канатами АКС и повысить устойчивость АКС;

- обеспечить эффективную работу ГЗМ в любой точке обрабатываемого лесоэксплуатационного участка за счет устранения недоступных зон.

7. Предлагаемые технологии лесозаготовок на базе аэростатно-канатных систем с использованием разработанных модификаций инерционных срезающих ГЗМ, работающих по принципу вертикального изъятия древостоев, позволяют максимально приблизить процесс заготовки древесины к рациональному и щадящему лесопользованию.

8. Теоретические исследования различных пневматических арочных опор показали, что применение конструкций с внутренними надувными сферами позволяет:

- снизить общую деформацию опоры от воздействия полезной нагрузки и внутреннее рабочее давление в 1,5-2,1 раза, что повысит ресурс конструкции.

9. Разработанные математические модели продольных и поперечных колебаний несущего каната КЛТС на базе ППК позволяют оценить значения перемещений вершин пневматических опор при воздействии ветровой и волновой нагрузок, а также усилий, возникающих в несущем канате при взаимном смещении этих опор. При этом установлено, что скорость перемещения каретки оказывает более существенное влияние на колебания системы и величину провиса несущего каната, чем масса перемещаемого груза – при прочих равных условиях и увеличении массы груза в 2 раза и неизменной скорости перемещения каретки провис каната увеличивается на 15,4%, а при неизменной массе груза и увеличении скорости перемещения в 2 раза провис увеличится на 59%.

10. Разработанная математическая модель в виде системы уравнений для расчета натяжения каната при нахождении грузовой каретки в любой точке канатной лесотранспортной системы позволяет определять внезапные динамические нагрузки в несущем канате, вызванные колебаниями каретки с грузом и внешним воздействием. Установлено, что динамические нагрузки в несущем канате можно значительно снизить за счет увеличения угла его наклона к гори-

зонту (увеличение угла наклона несущего каната к горизонту от 0^0 до 45^0 приводит к снижению динамического напряжения несущего каната в 2 раза).

11. Разработанные технологии освоения лесосек с использованием пневматических конструкций являются техническим симбиозом воздушных, водных и наземных транспортных систем и позволяют обеспечить:

- рациональное освоение ранее недоступных лесных территорий с большой плотностью гидрологических систем и наличием влажных грунтов и болот, сопряженных с горными склонами;

- оперативную переброску заготовленной древесины с необорудованных береговых территорий на водные транспортные средства без использования кранового и причального оборудования;

- возможность использования гидрологических систем для оперативной доставки лесозаготовительной техники и рабочего персонала;

- возможность использования гидрологических систем (с учетом болот и не судоходных рек) в качестве транспортного коридора для подвесной трелевки и транспортировки древесины, что дает значительное сокращение времени и затрат на строительстве временных дорог (усов, веток) и подъездных путей, и, как следствие, понижение общей себестоимости лесозаготовительных работ.

12. Выполненные исследования показали, что эффективное использование КЛТС грузоподъемностью 35кН на базе ППК целесообразно при следующих условиях эксплуатации:

- скорость ветра до 14 м/с;

- средняя длина пролета (расстояние между пневматическими опорами) 50-75 метров;

- скорость перемещения каретки с грузом не более 4 м/с;

- высота пневматической арки с внутренними сферами – от 10 до 12 м при диаметре основания 1,5 м.

13. Экономический эффект использования АКС-5 с чокерной или грейферной оснасткой при сравнении с СКУ наступает при расстоянии трелевки свыше 650 метров и составляет до 993 рублей на 1 м^3 . При использовании АКС-5 в режиме вертикального изъятия деревьев экономический эффект увеличивается за счет минимизации экологических издержек и составляет до 1230 руб. на 1 м^3 .

14. Экономический эффект использования КЛТС на базе ППК при разработке лесного участка без строительства и использования лесовозной дороги составит 543 руб. на 1 м^3 . При этом общее время разработки участка, учитывающее строительство подъездных путей, сокращается в 1,8 раза.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах из списка ВАК

1. **Абузов, А.В.** Аэростатные системы трелевки – второе рождение / А.В. Абузов // Лесной вестник: Изд-во Московского государственного университета леса. – 2006. – №1(43). – С. 78-84.
2. **Абузов, А.В.** Агроэкология: формирование лесозаготовительных операций с учетом экологических требований / А.В. Абузов // Инженерная экология. – 2012. – №1(103). – С. 24 – 31.
3. Рябухин, П.Б. Математическое моделирование в решении задач лесопромышленного комплекса / П.Б. Рябухин, А.П. Козорез, **А.В. Абузов** // Вестник КрасГАУ. – 2012. – №5. – С.76-83.
4. **Абузов, А.В.** Технические и конструктивные особенности современной аэростатно-канатной системы для трелевки древесины / А.В. Абузов // Лесной вестник: Изд-во Московского государственного университета леса. – 2013. – №1(93). – С. 5-9.
5. Рябухин, П.Б. Метод комплексного анализа систем устойчивого лесопользования / П.Б. Рябухин, Н.В. Казаков, **А.В. Абузов** // Лесной вестник: Изд-во Московского государственного университета леса. – 2013. – №1(93). – С. 129-132.
6. **Абузов, А.В.** Методика определения рейсовой нагрузки и мощности лебедочных механизмов аэростатно-канатных систем на примере АКС-5 / А.В. Абузов, Н.В. Казаков // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2013. – №1(28). – С. 149-158.
7. **Абузов, А.В.** Основные технологические направления по освоению горных лесов Дальневосточного региона / А.В. Абузов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2013. – №3(30). – С. 91-100.
8. **Абузов, А.В.** Математическое моделирование основных параметров аэростатно-канатной системы для трелевки древесины АКС-5 / А.В. Абузов // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – №2(22). – С. 136-140.
9. **Абузов, А.В.** К вопросу определения среднего расстояния трелевки и производительности трехлинейной аэростатно-канатной системы / А.В. Абузов, П.Б. Рябухин // Лесной вестник: Изд-во Московского государственного университета леса. – 2014. – Том 18, №2-S. – С. 42-46.
10. **Абузов, А.В.** Методика определение усилий, возникающих в канатах трехлинейной аэростатно-канатной транспортной системы / А.В. Абузов // Лесотехнический журнал. – 2014. – Том 4, №3(15). – С. 140-153.
11. **Абузов, А.В.** Исследование колебательных процессов в несущем канате лесотранспортной системы на базе плавающих воздухоопорных конструкций / А.В. Абузов // Вестник КрасГАУ. – 2014. – №10. – С. 165-172.
12. Казаков, Н.В. Автоматизированные системы управления процессами промышленного лесопользования / Н.В. Казаков, **А.В. Абузов** // Инже-

- нерный вестник Дона. – 2014. – №2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2426>.
13. **Абузов, А.В.** Особенности использования вертолета на лесозаготовительных операциях / А.В. Абузов, Н.В. Казаков, И.Н. Дмитриева // Инженерный вестник Дона. – 2014. – №3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2014/2469>.
14. **Абузов, А.В.** Особенности динамических напряжений, возникающих в верхней подвеске аэростатно-канатной системы / А.В. Абузов, Н.В. Казаков, В.И. Иванов // Инженерный вестник Дона. – 2014. – №3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2014/2493>.
15. Казаков, Н.В. Моделирование производственных процессов промышленного лесопользования / Н.В. Казаков, **А.В. Абузов** // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №4. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/118-14366>.
16. **Абузов, А.В.** Исследование продольных колебаний в канатной лесотранспортной системе на базе воздухоопорных плавающих конструкций / А.В. Абузов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2014. – №4(35). – С. 143-152.

Патенты

17. Пат. 31481 Российская Федерация, МПК⁷ А01G 23/02, В 64В 1/50. Аэростатно-тросовая система для трелевки леса и перемещения груза / **А.В. Абузов**; заявитель и патентообладатель Абузов Александр Викторович. – № 2003112375/20; заявл. 30.04.03. опубл.: 20.08.03 – Бюл. № 23.
18. Пат. 120058 Российская Федерация, МПК⁷ В61В 12/00, В61В 7/00. Канатная система транспортировки древесины / **Абузов А.В.**, Абузова К.Р.; заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет. – № 2012112694/11; заявл. 02.04.12. опубл.: 10.09.12. – Бюл. № 25.
19. Пат. 118268 Российская Федерация, МПК⁷ В61В 7/00. Подвесная канатная система для трелевки древесины / **Абузов А.В.**, Абузова К.Р.; заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет. – № 2012112699/11; заявл. 02.04.12. опубл.: 20.07.12. – Бюл. № 20.
20. Пат. 118303 Российская Федерация, МПК⁷ В66С 21/00. Канатный кран с грейферным захватом / **Абузов А.В.**, Абузова К.Р.; заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет. – № 2012112607/11; заявл. 30.03.12. опубл.: 20.07.12. – Бюл. № 20.
21. Пат. 118598 Российская Федерация, МПК⁷ В61В 12/00, В66С 21/00. Полуподвесная канатная система для трелевки древесины / **Абузов А.В.**, Абузова К.Р.; заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет. – № 2012112697/11; заявл. 02.04.12. опубл.: 27.07.12. – Бюл. № 21.
22. Пат. 121482 Российская Федерация, МПК⁷ В61В 7/00, В61В 12/00. Полуподвесная канатная грейферная система для трелевки древесины / **Абу-**

- зов А.В.**, Абузова К.Р.; Заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет. – № 2012112696/11; заявл. 02.04.12. опубл.: 27.10.12. – Бюл. № 30.
23. Пат. **121692 Российская Федерация, МПК⁷ А01G 23/081**. Лесозаготовительная машина / **Абузов А.В.**, Пак С. С.; Заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет. – № 2012125315/13; заявл. 18.06.12. опубл.: 10.11.12. – Бюл. № 31.
24. Пат. **2499706 Российская Федерация, МПК⁷ В61В 7/00**. Аэростатно-канатная система для воздушной заготовки и транспортировки древесины / **Абузов А.В.**, Абузова К.Р.; Заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет. – № 2012118845/11; заявл. 05.05.12 опубл.: 27.11.13. – Бюл. № 33.
25. Пат. **2503562 Российская Федерация, МПК⁷ В61В 7/00**. Способ разработки лесосек с использованием воздушно-транспортной установки / **Абузов А.В.**; Заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет. – № 2012122970/11; заявл. 04.06.12. опубл.: 10.01.14. – Бюл. № 1.
26. Пат. **2503172 Российская Федерация, МПК⁷ А01G23/00, А01G23/06**. Установка для заготовки древесных ресурсов / Казаков Н. В., **Абузов А. В.**; Заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет. – № 2012117945/13; заявл. 28.04.12. опубл.: 10.01.14. – Бюл. №1.
27. Пат. **2504145 Российская Федерация, МПК⁷ А01G23/00, А01G23/06**. Способ заготовки древесных ресурсов / Казаков Н. В., **Абузов А. В.**; Заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет. – № 2012117934/13; заявл. 28.04.12. опубл.: 20.01.14. – Бюл. № 2.
28. Пат. **2512190 Российская Федерация, МПК⁷ А01G 23/00**. Способ транспортировки щепы с лесосеки до мест её переработки / Абузов А.В., Абузова К.Р.; Заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет. – № 2012133126/13; заявл. 01.08.12. опубл.: 10.04.14. – Бюл. № 10.
29. Пат. **2512167 Российская Федерация, МПК⁷ А01G 23/02**. Способ выборочной заготовки и транспортировки древесины / **Абузов А.В.**; Заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет. – № 2012133141/13; заявл. 01.08.12. опубл.: 10.04.14. – Бюл. № 10.
30. Пат. **2531322 Российская Федерация, МПК⁷ А01G 23/02**. Механизм наведения и стабилизации грейферного захвата для воздушных систем трелевки / **Абузов А.В.**, Бернотас Р.В.; Заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет. – № 2013114951/13; заявл. 03.04.13. опубл.: 20.10.14. – Бюл. № 29.
31. Пат. **2531319 Российская Федерация, МПК⁷ А01G 23/02**. Система наведения и стабилизации грузозахватного механизма для аэростатно-канатной системы / **Абузов А.В.**, Бернотас Р.В.; Заявитель и патентообла-

- датель Тихоокеанский государственный университет. – № 2013114948/13; заявл. 03.04.13. опубл.: 20.10.14. – Бюл. № 29.
32. Пат. **2531649 Российская Федерация, МПК⁷ В63В 35/00, В63В 27/30, В61В 7/06**. Способ транспортировки древесины с использованием надувных плавающих опор / **Абузов А.В.**, Абузова К.Р.; Заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет. – № 2013121242/11; заявл. 07.05.13. опубл.: 27.10.14. – Бюл. № 30.
33. Пат. **2531778 Российская Федерация, МПК⁷ E04G 11/04, В63В 35/71, E04H 15/20**. Надувная плавающая опора для удержания несущего каната / **Абузов А.В.**, Абузова К.Р.; Заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет. – № 2013121199/11; заявл. 07.05.13. опубл.: 27.10.14. – Бюл. № 30.
34. Пат. **2538825 Российская Федерация, МПК⁷ A01G 23/02, В66С 21/00**. Способ заготовки древесины на крутых склонах с использованием валочно-пакетирующей машины и аэростатно-канатной системы / **Абузов А.В.**, Бернотас Р.В.; Заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет. – № 2013114949/13; заявл. 03.04.13. опубл.: 10.01.15. – Бюл. № 1.

Монографии

35. **Абузов, А.В.** Аэростатный транспорт для горных лесозаготовок в условиях Дальнего Востока / А.В. Абузов, П.Б. Рябухин. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. – 199 с.
36. Рябухин, П.Б. Анализ состояния и перспектив развития лесопромышленного комплекса Дальневосточного федерального округа / П.Б. Рябухин, Н.В. Казаков, **А.В. Абузов**. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. – 207 с.

В сборниках трудов конференций

37. **Абузов, А.В.** Перспективность внедрения и эксплуатации современных аэростатных систем трелевки / А.В. Абузов // Наука – Хабаровскому краю: материалы восьмого краевого конкурса-конференции молодых ученых и аспирантов (Секция технических наук). – Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2006. – С. 144-154.
38. Ловцов, А.Д. Определение усилий натяжения канатов аэростатных трелевочных систем / А.Д. Ловцов. **А.В. Абузов** // Новые идеи нового века 2007: материалы седьмой международной научной конференции ИАС ТОГУ. – Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2007. – С. 466-474.
39. **Абузов, А.В.** Альтернативные транспортные системы как направление рационального лесозаготовительного процесса / А.В. Абузов // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы международной научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2012. – С. 60-63.

40. **Абузов, А.В.** Экология лесозаготовок: основные направления и перспективы развития / А.В. Абузов // Кедр – хозяин дальневосточной тайги: сборник докладов международного экологического семинара / под ред. П.Б. Рябухина. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. – С. 20-27.
41. **Абузов, А.В.** Технологии освоения труднодоступных лесных территорий на принципах сохранения экосистемы региона / А.В. Абузов // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона: материалы Международного научно-практического форума. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. – С. 36-41.
42. Бернотас, Р.В. Использование комплексных систем для освоения лесного фонда / Р.В. Бернотас, **А.В. Абузов** // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона: материалы Международного научно-практического форума. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. – С. 56-59.
43. Пак, С.С. Анализ лесозаготовительных механизмов, способных работать в режиме валки и раскряжевки дерева без его предварительного падения / С.С. Пак, **А.В. Абузов** // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона: материалы Международного научно-практического форума. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. – С. 142-147.
44. **Абузов, А.В.** Лесотранспортные системы: новые возможности и перспективы развития / А.В. Абузов // Состояние лесов и актуальные проблемы лесопромышленности: материалы Всерос. конф. с междунар. участием / отв. ред. А.П. Ковалев. – Хабаровск: Изд-во ФБУ «ДальНИИЛХ», 2013. – С. 101-104.
45. **Абузов, А.В.** О целесообразности и необходимости применения в лесозаготовительном процессе малогабаритных мобильных комплексов [Текст] / А.В. Абузов, П.Б. Рябухин, К.Р. Абузова // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы международной научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2014. – С. 109-111.
46. **Абузов, А.В.** К вопросу особенностей воздушной транспортировки древесины / А.В. Абузов // Философия современного природопользования в бассейне реки Амур: сб. докл. междунар. экол. семинара (Хабаровск 4-11 мая 2014 г.) / под ред. проф. П.Б. Рябухина. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2014. – С. 37-42.
47. **Абузов, А.В.** Особенности лесозаготовительного процесса при вертикальном изъятии и транспортировке деревьев воздушным способом / А.В. Абузов, Р.В. Бернотас // Философия современного природопользования в бассейне реки Амур: сб. докл. междунар. экол. семинара, Хабаровск 6 – 8 мая 2015 г. / под ред. проф. П.Б. Рябухина. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – С. 67-70.

Публикации в сборниках ведущих НИИ, ВУЗов и других изданиях

48. Рябухин, П.Б. Аэростатические аппараты и их применение в лесной промышленности / П.Б. Рябухин, **А.В. Абузов** // Вопросы совершенствования технологий и оборудования в лесопромышленном комплексе и строительстве: Юбилейный сб. науч. тр. Дальневосточного Лесотехнического Института. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 1998. – С. 75-80.
49. **Абузов, А.В.** Целесообразность применения аэростатов на лесозаготовках / А.В. Абузов // Воздухоплаватель, 2000. – №3(21). – С. 36-38.
50. Рябухин П.Б. Идентификация рельефа лесосек методом математического моделирования / П.Б. Рябухин, Н.В. Казаков. **А.В. Абузов** // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2007. – Вып. 179. – С. 59-63.
51. **Абузов, А.В.** Экспериментальные исследования аэростатно-канатной системы / А.В. Абузов, К.В. Рудица // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2008. – №1(8). – С. 259-274.
52. Рябухин, П.Б. Горным лесоразработкам – средосберегающее технологическое оборудование / П.Б. Рябухин, **А.В. Абузов** // Лесное хозяйство. – 2008. – №6. – С. 36-37.
53. Морозов, Л.И. Вариант расширения области применения канатных установок / Л.И. Морозов, **А.В. Абузов** // Электронное научное издание «Научные заметки ТОГУ». – 2014. – Том 5, №4. – С.868-871. – Режим доступа: <http://pnu.edu.ru/ejournal/pub/articles/804/> .

Подписано в печать 00.10.15. Формат 60 × 84 ¹/₁₆.

Бумага писчая. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая. Усл. печ. л. 2,4.

Тираж 100 экз. Заказ .

Отдел оперативной полиграфии издательства
Тихоокеанского государственного университета
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.