

На правах рукописи

ИВАНОВ Александр Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛЕСОСЕЧНЫХ РАБОТ
ДЛЯ УСЛОВИЙ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ЛЕСОСЕК СЕВЕРО-
ЗАПАДНОГО РЕГИОНА РФ**

05.21.01. – Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Архангельск - 2011

Работа выполнена на кафедре Машины и оборудование лесного комплекса Братского государственного университета

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Григорьев Игорь Владиславович

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Минаев Александр Николаевич

кандидат технических наук, доцент
Дербин Василий Михайлович

Ведущая организация – Карельский научно-исследовательский
институт лесопромышленного
комплекса (КарНИИЛПК)

Защита диссертации состоится 22 декабря 2011 г. в 10 часов на заседании диссертационного Совета 212.008.01 в Северном (Арктическом) федеральном университете по адресу: 163002, Архангельск, набережная Северной Двины 17, , главный корпус, ауд. 1228.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «21» ноября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета



А.Е. Земцовский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. По данным Федерального агентства по лесному хозяйству на 2009 год, на территории Северо-Западного федерального округа (СЗФО) запас спелых и перестойных лесонасаждений, возможных для эксплуатации, составляет 3936,49 млн. м³. Значительная часть этого запаса находится на территориях неудобных для проведения лесосечных работ по почвенно-грунтовым и рельефным условиям. К таким территориям относятся площади с переувлажненными и заболоченными почво-грунтами, а также площади относимые к холмисто-рядовым рельефам.

Традиционная система машин лесозаготовительных предприятий, базирующаяся на тяжелых, колесных или гусеничных, лесопромышленных тракторах и машинах на их базе, не может обеспечить эффективного освоения таких труднодоступных лесосек, что, наряду со слаборазвитой дорожной сетью, приводит к тому, что использование расчетной лесосеки за 2009 год по СЗФО составляет в среднем 40,56%. Причем, наиболее низкие показатели приходятся на области имеющие наибольший процент заболоченных и переувлажненных участков, а также участков с пересеченным рельефом – это Республика Коми – 27,2%, Мурманская область – 12,5%; Псковская область – 31,7%.

Известно, что недоиспользование расчетной лесосеки приводит к накоплению перестойных древостоев, являющихся повышенным источником опасности лесных пожаров, а также возникновения очагов поражения вредителями и болезнями. Кроме этого, лесозаготовки и деревопереработка традиционно занимают значительный удельный вес в экономике субъектов СЗФО. Это позволяет утверждать, что невозможность проведения эффективных лесозаготовительных работ существенно снижает экономическую отдачу от фазы лесозаготовок, и увеличивает себестоимость готовой продукции деревопереработки из-за необходимости закупки сырья далеко за пределами региона, что увеличивает транспортную составляющую себестоимости.

Особо следует подчеркнуть экологический аспект проведения лесосечных работ в условиях заболоченных и переувлажненных почво-грунтов и холмисто-рядовых рельефов. Известно, что биогеоценозы на указанных площадях являются особо ранимыми и чувствительными к сильной экологической нагрузке, каковой, безусловно, являются лесосечные работы. Вместе с тем, первейшим требованием к лесопользованию является его неистощительность, а в перспективе и обязательное содействие расширенному воспроизводству лесных ресурсов – процессу непрерывного расширения производительной способности лесных биогеоценозов, задачей которого является получение через оборот рубки двух кубометров древесины там, где раньше был взят один.

Как было отмечено раньше, на экосистему лесосеки существенное влияние оказывает не только способ и интенсивность рубки, но принятая система машин и режимы их работы. Многочисленные исследования отечественных и зарубежных ученых показывают, что движители лесозаготовительных машин, включая трелевочные тракторы, разрушают структуру почво-грунта лесосек, повреждают корневую систему оставляемых на корню деревьев, что в перспективе приводит водной и ветровой эрозии лесных почво-грунтов, развитию заболачивания, усыханию оставляемых на корню деревьев главных пород, смене пород на малоценные – мягколиственные, и другим негативным, и, зачастую, необратимым процессам.

Вышесказанное показывает, что для повышения эксплуатационной и экологической эффективности лесозаготовительного производства в условиях труднодоступных лесосек необходимо использовать новые системы машин, и обосновать режимы их работы для получения возможности достижения экологического и экономического оптимумов показателей эффективности лесосечных работ.

Цель работы. Повышение эффективности лесозаготовительного производства при проведении лесосечных работ в условиях труднодоступных лесосек за счет обоснования состава и режима работы системы машин, исходя из задачи снижения экологического ущерба и достижения максимальной производительности.

В работе предложена и исследована математическая модель уплотняющего воздействия пачки лесоматериалов на почву лесосеки при полуподвесной трелевке, предложен ряд оригинальных технических решений для проведения лесосечных работ в условиях труднодоступных лесосек.

Объект исследований. Почвогрунты лесосек.

Предмет исследования. Технологический процесс разработки труднодоступных лесосек, а также процесс уплотнения почвогрунтов лесосек под воздействием пачки древесины при полуподвесной трелевке.

Значимость для теории и практики. Разработанная математическая модель воздействия трелеваемой пачки лесоматериалов на почвы лесосек углубляет теорию экологической эффективности трелевочных систем, и технологии лесозаготовительного производства в экологической сфере. Результаты работы позволяют разрабатывать организационные и технологические мероприятия освоения лесосек при разработке труднодоступных лесосек, обеспечивающие снижение отрицательного воздействия на почву.

Достоверность выводов и результатов исследований обеспечена: применением методов математической статистики; проведением экспериментальных исследований в лабораторных и производственных условиях и подтвержденной адекватностью полученных моделей за счет удовлетворительной сходимости экспериментальных и теоретических данных.

На защиту выносятся следующие положения:

- Математическая модель уплотнения почвы лесосеки пачкой лесоматериалов при ее трелевке полуподвесной канатной трелевочной установкой, как при ее прямолинейном движении, так и при поворотах трассы в плане, позволяющая оценивать уплотнение почвы в зависимости от числа пачек и их характеристик.
- Технические решения для проведения лесосечных работ в условиях труднодоступных лесосек.
- Результаты экспериментальных исследований уплотняющего воздействия пачки лесоматериалов на почву лесосеки при полуподвесной трелевке канатными трелевочными установками.

Апробация работы. Основные положения диссертации и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались на первой и второй международных научно-практических Интернет конференциях «Леса России в XXI веке» (Санкт-Петербург, 2009 г.); на Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса» (Вологда, 2009 г.); Межвузовской научной конференции «Молодая мысль: Наука. Технологии. Инновации» (Братск, 2009 г.); Международной научно-практической конференции «Современные проблемы лесозаготовительных производств, производства материалов и изделий из древесины: пиломатериалы, фанера, деревянные дома, заводского изготовления, столярно-строительные изделия» (СПб, 2009 г.) Конференции «Экспериментальные и теоретические исследования в области инженерных наук», в рамках Политехнического симпозиума «Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона» (СПб, 2008 г.); Международной научно-технической конференции молодых ученых «Современные проблемы и перспективы рационального лесопользования в условиях рынка» (СПб, 2011 г.); Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию Лесоинженерного факультета Петрозаводского государственного университета «Опыт лесопользования в условиях Северо-Запада РФ и Фенноскандии» (Петрозаводск, 2011 г.) и ежегодных научно-технических конференциях БрГУ и СПбГЛТА в 2009-2011 гг. Материалы работы входят в проект «Средоошадающие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации», награжденный дипломом III степени Национальной Экологической Премии "ЭкоМир", в номинации «Экологическая наука и технологии», за 2009 г., руководитель проекта – д.т.н., проф. И.В. Григорьев.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в десяти печатных работах, включая монографию и два патента на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы. Общий объ-

ем работы 172 с. Диссертационная работа содержит 55 рисунков, 15 таблиц. Список литературы содержит 159 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы актуальность темы диссертации, цель исследований, изложены научная новизна и практическая ценность работы, сформулированы основные положения выносимые на защиту.

1. Состояние вопроса и задачи исследования. Рассмотрено состояние проблемы, включая характеристику природно-производственных условий рассматриваемых процессов лесосечных работ, особенности технологии рубок леса в условиях заболоченных и переувлажненных лесосек, а также лесосек на холмисто-грядовых рельефах, воздействие техники и технологии на лесную среду и пути повышения экологичности проведения лесосечных работ. Большой вклад в решение технических, экологических и технологических проблем лесозаготовительного производства, оптимизации состава технологических процессов, систем машин и режимов их работы внесли отечественные ученые Г.М. Анисимов, В.И. Пятакин, В.Н. Меньшиков, В.Г. Кочегаров, А.К. Редькин, В.К. Курьянов, А.М. Кочнев, М.М. Овчинников, В.С. Сюнев, И.Р. Шегельман, С.М. Базаров, Э.Ф. Герц, П.Б. Рябухин, О.Н. Бурмистрова, Ю.А. Ширнин, И.В. Григорьев, В.Н. Андреев, Ю.Ю. Герасимов, Ю.А. Добрынин, А.И. Жукова, ученые МГУЛ, СПбГЛТА, ВГЛТА, УГЛТУ, ПетрГУ, САФУ, БрГУ, и др.

Анализ работ показал, что до настоящего времени не разработаны математические модели воздействия пачки древесины на лесную почву при полуподвесной трелевке. На основании анализа исследования сформулированы выводы и следующие задачи исследования:

- Разработать и исследовать математические модели уплотнения лесной почвы пачкой лесоматериалов в процессе полуподвесной трелевки канатной установкой.
- Разработать технические решения для проведения лесосечных работ в условиях труднодоступных лесосек.
- Разработать методику экспериментальных исследований и обосновать необходимое число измерений для проведения экспериментальных исследований.
- Экспериментальным путем исследовать влияние пачки лесоматериалов на уплотнение почвы лесосеки при полуподвесной трелевке канатной трелевочной установкой.
- Получить данные об адекватности разработанных математических моделей.
- Оценить экономическую эффективность предложенных технологических решений.

2. Разработка новых технических решений для повышения эффективности лесосечных работ в условиях труднодоступных лесосек. В условиях разработки труднодоступных лесосек, наиболее предпочтительным видом первичного транспорта леса являются мобильные канатные трелевочные установки (МКТУ). Выполненный анализ различных конструкций мобильных канатных трелевочных установок позволяет утверждать, что ни одна из серийных моделей не соответствует природно-производственным условиям труднодоступных лесосек Северо-Запада РФ, характеризующихся малыми площадями, запасами леса на гектаре и объемом хлыста. Особенность МКТУ состоит в том, что все они являются однопролетными, причем головная мачта (складная или телескопическая) смонтирована на самоходной гусеничной или колесной базе, а тыловая мачта, вместе с канатной оснасткой, переносится и закрепляется различными методами вручную, что требует большого количества тяжелого ручного труда, и существенно снижает производительность МКТУ. Тыловая мачта при разработке лесосеки, расположенной на крутом склоне, требует нескольких перебазировок, число которых зависит от формы и размеров склона.

Для механизации переместительных операций в лесном хозяйстве, как в РФ, так и за рубежом выпускаются малые универсальные лесные тракторы (МУЛ). В работе предложено оригинальное техническое решение (защищенное патентом на полезную модель), заключающееся в оснащении МУЛа специальным приспособлением, в виде мачты с боковым расположением на поворотной цапфе (рис. 1). К шасси посредством цапфы на поворотном круге прикреплена наклонная стойка. К концу наклонной стойки шарнирно крепится вертикальная стойка. Канат наматывается на барабаны и запасовывается в блоки на вертикальной стойке. Во время работы МКТУ вертикальная и наклонная стойки вручную поворачиваются на поворотном круге в нужную сторону. Затем вручную поднимается вертикальная стойка, и выбирается необходимая длина каната с барабана. После разработки ленты, за счет шарнира, вертикальная стойка укладывается на наклонную, и при помощи поворотного круга укладывается в транспортное положение (показано пунктиром). Преимущество бокового расположения мачты, по сравнению с фронтальным, заключается в том, что при освоении лесосеки шасси может перемещаться по коридору, не выполняя технологических маневров.

В диссертации для предложенного технического решения составлены выражения для определения поперечной устойчивости самоходной тыловой мачты на склоне, а также для определения упругости однопролетной канатной трелевочной установки с учетом смещения опор.

Для перспективной технологической схемы разработки лесосек основанной на использовании минитракторов, которая состоит из двух тех-

нологических цепочек – это трелевка, которая осуществляется мини трелевочными тракторами и транспортировка, которая ведется по принципу замкнутой канатной магистрали (ЗКМ) в диссертации выполнены обоснование угла перегиба несущего каната КТУ на поворотных опорах.

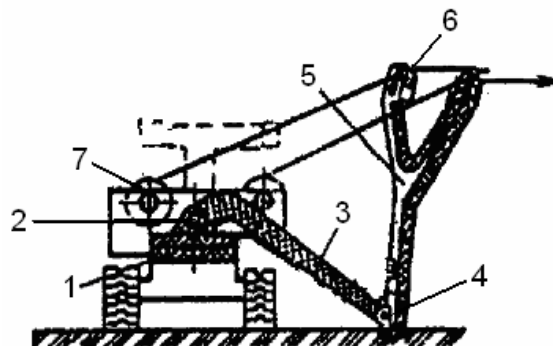


Рис. 1. Самоходная тыловая мачта для МКТУ (вид трактора сзади): 1 – поворотный круг; 2 – цапфа; 3 – наклонная стойка; 4 – шарнир; между наклонной и вертикальной стойками; 5 – вертикальная стойка; 6 – блоки; 7 – барабан для каната

В качестве перспективы развития первичного транспорта леса для рассматриваемых условий лесозаготовки в работе предложена новая конструкция трелевочного оборудования – мобильная канатно-рельсовая установка, имеющая минимальное воздействие на почво-грунты лесосек, по сравнению с трелевкой тракторами, и повышенную производительность, по сравнению с КТУ.

Еще одной проблемой лесозаготовительного производства является оперативный учет заготавливаемой древесины, который производится в нескольких точках пути, что снижает производительности технологической цепочки в целом. Кроме этого, оперативный и точный учет лесоматериалов является одним из аспектов эффективной борьбы с незаконными рубками леса. В настоящее время одним из наиболее распространенных способов учета лесоматериалов является весовой, т.е. через измерение веса, при известной плотности лесоматериалов определяют их объем. Этот метод является одним из наиболее точных, простых, и дешевых. Для этого на лесопромышленных складах устанавливаются специальные устройства, взвешивающие груженный лесовоз, и после разгрузки. Использование данного метода в условиях лесосеки (погрузочного пункта) является в настоящее время невозможным, а для мелких складов взвешивающие устройства слишком дороги. В этой связи предлагается следующее техническое решение - оснащать лесовозы несложной измерительной системой, позволяющей автономно определять вес вывозимого груза. Измерительная система состоит из следующих элементов: на верхних пластинах рессор каждой оси автолесовоза размещены тензоизмерительные мосты, фикси-

рующие их деформации под нагрузкой. Электрический сигнал подается на усилитель. Усиленные сигналы подаются на вибраторы регистрирующего устройства, которое производит запись силы веса груза при стоящем автолесовозе. Электропитание усилителя и осциллографа осуществляется от соответствующих блоков питания, которые получают энергию от бортовой электросети автолесовоза. Данное техническое решение защищено патентом РФ на полезную модель.

3. Математическая модель уплотнения почвы лесосеки пачкой лесоматериалов при полуподвесной трелевке канатной трелевочной установкой. Благодаря минимальному «коэффициенту тары» во время работы КТУ на почву лесосеки оказывает влияние исключительно трелеваемая пачка лесоматериалов, поскольку масса перемещающегося с пачкой каната и прицепного устройства много меньше массы самой пачки. При работе КТУ, в большинстве случаев, производится трелевка хлыстов за вершины, это связано с тем, что за счет большой разницы в сопротивлении волочению вершины и комлей, вершинная часть пачки начинает приподниматься, помогая преодолевать встречающиеся препятствия. В отличие от тракторной трелевки угол наклона пачки к горизонту будет не постоянным, а, следовательно, и пятно контакта и давление пачки на почву лесосеки будут переменными. По мере приближения к мачте пачка будет все больше приподниматься, а давление на почву увеличиваться. При приближении к мачте давление пачки на почву будет максимальным и комлевая часть пачки будет сильно переуплотнять почву. Исходя из этих соображений можно сделать вывод о том, что чем меньше поднимется пачка – тем лучше, а, следовательно, и высоту мачты желательно иметь наименьшей. С другой стороны перемещение пачки при ее полном контакте с поверхностью движения приводит к значительным энергозатратам, что привело к отказу от использования безмачтовых КТУ.

Задача теоретического исследования заключается в разработке и исследовании математической модели воздействия комлей или вершин на лесную почву с целью определения ее уплотнения при полуподвесной трелевке пачки лесоматериалов по почве с определенной плотностью естественного сложения почвы ρ_0 .

Задача о воздействии пачки лесоматериалов на почву лесосеки при тракторной трелевке в полупогруженном положении была рассмотрена И.В. Григорьевым в 2000 г. Однако, ее решение не приемлемо для полуподвесной трелевки КТУ, поскольку не учитывает возможность изменения пятна контакта пачки с почвой из-за изменения угла наклона во время трелевки, а также влияние поворотов пачки при изменении направления движения. Вместе с тем, результаты, полученные И.В. Григорьевым, могут

положены в основу при разработке математической модели рассматриваемого процесса.

При составлении эквивалентной расчетной схемы системы «пачка – почва» принимаем следующие допущения: контакт пачки с точкой подвеса заменяем точкой крепления древесины «а», которая находится над опорной поверхностью на расстоянии h (рис 2); древесина хлыста по своей структуре и физико-механическим свойствам однородна по всей длине; сбег ствола равномерный и поддается детерминированному описанию; пачка движется равномерно. Расчетная схема для моделирования прогиба хлыста при трелевке за вершину приведена на рис 2.

Составим математическую модель, позволяющую прогнозировать уплотнение почвы при полуподвесной трелевке в зависимости от параметров пачки лесоматериалов и высоты головной мачты канатной трелевочной установки. А также получим выражение для определения оптимальной высоты головной мачты, исходя из требований минимизации уплотнения почвы. Высота мачты влияет на устойчивость самоходного шасси, нагрузки в трансмиссии лебедки, грузоподъемность канатов и производительность. Для определения высоты мачты используем формулу:

$$H = \left(G + G_1 + \frac{2\zeta q_k}{\cos \xi} \right) \frac{L}{4T_{\max}} - b - l_n \operatorname{tg} \gamma + 2c, \quad (1)$$

где: H - высота головной мачты, м; ζ - длина хорды канатов, м; l_n - длина погрузочной площадки, м; b - высота тыловой мачты, м; $(G+G_1)$ - грузоподъемность канатов, кН; q_k - распределенная нагрузка от собственного веса тягово-несущего каната, кН/м; ξ - угол наклона хорды, рад; c - расстояние от пачки деревьев до поверхности склона, 0,5 м; γ - угол наклона лесосеки, рад; T_{\max} - наибольшее натяжение в ветвях тягово-несущего каната, кН.

$$T_{\max} = \left(G + G_1 + \frac{2\zeta q_k}{\cos \xi} \right) \left(1 - \frac{x}{L} \right) \frac{x}{2f_x}, \quad (2)$$

где: x - координата приложения нагрузки, м; f_x - стрела провеса каната, м.

$$f_x = \frac{(H + l_n \operatorname{tg} \gamma) \cdot (\zeta - x) + x \cdot b}{L} - c, \quad (3)$$

Наибольшее значение f_x достигает при $x = \zeta/2$.

Средний угол наклона пачки определяется по выражению:

$$\alpha_{cp} = \frac{\pi}{2} \frac{h\beta}{l}, \quad (4)$$

где: β - параметр ($\beta=1, 2, 3$); l - длина пачки; h - высота подъема пачки при трелевке.

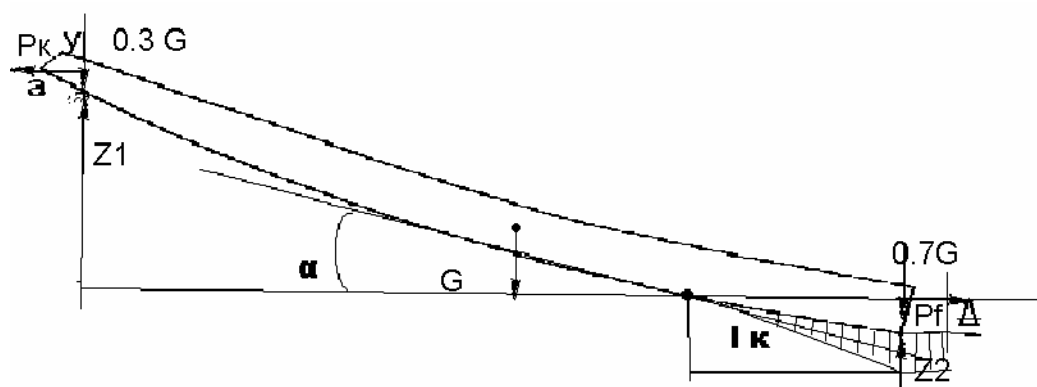


Рис. 2. Расчетная схема с погружением комлевой части хлыста в почву

С учетом угла наклона поверхности движения, угол подъема пачки относительно горизонта определится как:

$$\alpha_{cp} = \frac{\pi}{2} \frac{h\beta}{l} \pm \gamma. \quad (5)$$

В рассматриваемом случае высота подъема пачки может быть определена из выражения:

$$h = \frac{H}{L} l \sqrt{1 + \frac{2H}{L} \sin \gamma + \left(\frac{H}{L}\right)^2}, \quad (6)$$

где: L – расстояние до махты.

При $\gamma=0$, тогда можно записать, что $h = \frac{H}{L} l$.

$$\alpha_{cp} = \frac{\pi\beta}{2} \frac{H}{L} \sqrt{1 + \frac{2H}{L} \sin \gamma + \left(\frac{H}{L}\right)^2} \pm \gamma. \quad (7)$$

Максимальная глубина погружения комлевой части пачки составит:

$$\Delta = \frac{\pi\beta h}{2l} l_k = \frac{\pi\beta}{2} \frac{H}{L} l_k \sqrt{1 + \frac{2H}{L} \sin \gamma + \left(\frac{H}{L}\right)^2}, \quad (8)$$

здесь l_k – длина касания хлыстом (пачкой) лесной почвы (рис. 2).

При трелевке за вершины (рис. 2) давление комлевой части пачки на почву составит:

$$P = \frac{0,7G}{l_k \sqrt{2r_k \Delta}} \cos \alpha_{cp} = A \left(\frac{1}{3} \Delta\right)^n, \quad (9)$$

$$\cos \alpha_{cp} = \cos \left(\frac{\pi\beta}{2} \frac{H}{L} \sqrt{1 + \frac{2H}{L} \sin \gamma + \left(\frac{H}{L}\right)^2} \pm \gamma \right), \quad (10)$$

где: r_k – условный радиус комлей получаемый по таксационному описанию; A , n – характеристические параметры лесной почвы; Δ – максимальная глубина погружения комлевой части хлыста в почву.

С учетом (8) формула (10) примет вид:

$$\frac{0,7G \cdot \cos \alpha_{cp} \cdot \pi \beta h}{\sqrt{2r_k \Delta \cdot 2L\Delta}} \sqrt{1 + \frac{2H}{L} \sin \gamma + \left(\frac{H}{L}\right)^2} = A \left(\frac{1}{3} \Delta\right)^n \quad (11)$$

Связь между плотностью почвы и ее деформацией имеет известный вид:

$$\frac{\Delta}{B} = \frac{\rho_{max} - \rho_0}{\rho_0}, \quad (12)$$

где: B – глубина распространения деформации; ρ_0 – плотность естественного сложения лесной почвы до приложения нагрузки, ρ_{max} – максимальная плотность почвы под комлевой частью пачки.

Значение B можно оценить формулой:

$$B = \frac{\sqrt{2r_k \Delta \cdot l_k}}{\sqrt{2r_k \Delta + 2l_k}}, \quad (13)$$

или

$$B = \frac{\sqrt{2r_k \Delta \cdot 2L\Delta}}{\pi \beta h \sqrt{1 + \frac{2H}{L} \sin \gamma + \left(\frac{H}{L}\right)^2}} \times \frac{1}{\sqrt{2r_k \Delta + 2} \frac{4L\Delta}{\pi \beta h \sqrt{1 + \frac{2H}{L} \sin \gamma + \left(\frac{H}{L}\right)^2}}}. \quad (14)$$

Система уравнений (11), (12) и (14) по заданным значениям веса пачки G , γ , r_k , ρ_0 , ρ_{max} позволяет найти предельное расстояние трелевки полуподвесной КТУ, исходя из требования сохранения плодородия лесной почвы.

Также практический интерес представляет решение обратной задачи, позволяющее минимизировать отрицательное уплотняющее воздействие волочащейся пачки на почву лесосеки: по конечному углу подъема пачки к горизонту. Тогда может быть определен предельно допустимый вес пачки, а при наличии мачты с регулируемой высотой подвеса блока требуемый постоянный угол подъема пачки по критерию предотвращения переуплотнения почвы.

При $\gamma=0$ и $\frac{H}{L} \ll 1$ получим:

$$\tilde{\rho}_{max} = \frac{\rho_{max} - \rho_0}{\rho_0} = \frac{\pi \beta H}{2L \sqrt{2r_k \Delta}}, \quad (15)$$

поэтому:

$$\Delta = \frac{\pi^2}{8} \frac{\beta^2 H^2}{r_k L^2 \tilde{\rho}_{max}}, \quad (16)$$

В свою очередь из (12) следует

$$\Delta = \left[\frac{3^n}{A} \frac{0,7G\pi\beta H}{2\sqrt{2r_k} \cdot L} \right]^{\frac{2}{2n+3}}. \quad (17)$$

Приравняв (16) и (17), находим оптимальную величину расстояния трелевки по критерию воздействия на почву:

$$L_{np} = \left[\frac{\pi^2}{8} \frac{\beta^2 H^2}{r_k \tilde{\rho}_{np}} \left(\frac{A \cdot 2\sqrt{2r_k}}{3^n 0,7G\pi\beta H} \right)^{\frac{2n+3}{4n+8}} \right]^{\frac{2n+3}{4n+8}}. \quad (18)$$

Основываясь на вышеприведенных методических положениях, на рис. 3 представлена расчетная схема с погружением комлевой части хлыста в почву, дополненная учетом возможного поворота трелеваемой пачки на угол θ .

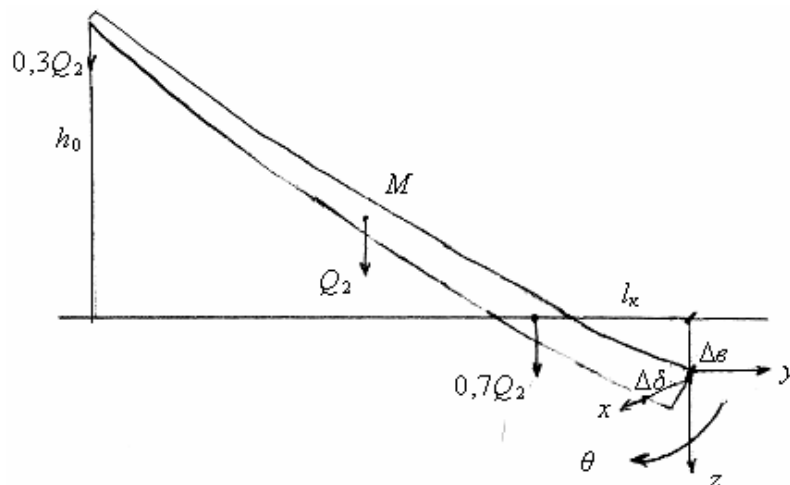


Рис. 3. Расчетная схема при погружении комлевой части хлыста в почву

На рис. 3 обозначено: Q_2 – вес хлыста, приложенный к центру масс M пачки; h_0 и l_k – соответственно высота подъема пачки и длина касания почвы комлевой частью; $\Delta\epsilon$ и $\Delta\delta$ – соответственно глубины погружения комлевой части в вертикальном и боковом в момент поворота направлениях.

Величина вертикального погружения подробно рассмотрена выше. Величина погружения $\Delta\delta$ с учетом коэффициента бокового распора (коэффициент Пуассона, ν) $\kappa_{\delta} = \nu/(1-\nu)$ может быть определена по формуле:

$$\Delta\delta = \left(\frac{0,7\pi 3^n \nu Q_2 h_0 \beta}{AL(1-\nu)\sqrt{2r_t}} \right)^{\left(\frac{1}{n+3/2} \right)}, \quad (19)$$

где A и n - параметры грунта в зависимости, представленной в известной степенной форме $q=Ah^n$; L - длина хлыста; $\beta=1, 2, 3$ - параметр синусоиды в зависимости $h = h_0 \left(1 - \sin \frac{\pi x \beta}{2L}\right)$ с текущей координатой x по длине хлыста; r_t - условный радиус комля, определяемый на основании таксационных зависимостей как $r_t = d\sqrt{K/2}$, где K - коэффициент, учитывающий форму ствола (для сосны - 0,45; ели - 0,50; березы - 0,40; осины - 0,41).

Расчет величины $\Delta\delta$ по формуле (19) произведен при трелевке хлыстов сосны и следующих значениях входящих параметров: $Q_2=20$ кН; $A=0,1$ м.е.; $n=0,7$; $v=0,35$; $d=0,18$ м; $r_t=0,19$ м; $\beta=1$; $L=8$ м; $h_0=2,7$ м. В результате расчетов получено значение $\Delta\delta=0,184$ м.

Тогда максимальная плотность ρ_{\max} почвы в пределах боковой поверхности трассы трелевки пачки определим как:

$$\rho_{\max} = \rho_0 \left(1 + \frac{\Delta\delta}{B}\right). \quad (20)$$

При $B=0,38$ м (грунты достаточно низкой несущей способности) величина ρ_{\max} составила $1,33 \rho_0$, т.е. величина относительного уплотнения $\bar{\rho}_o=1,33$. Выполненные расчеты свидетельствуют о том, что наряду с оценкой величины уплотнения почвогрунта в вертикальном направлении необходимо при поворотах трелюемой пачки учитывать развитие процесса уплотнения в перпендикулярном направлении, т.е. в пределах боковой поверхности.

4. Методика и аппаратура экспериментальных исследований. Для изучения влияния трелюемой пачки древесины на лесные почвы была создана экспериментальная установка, состоящая из лебедки, мачты, троса, растяжек, якорей и блоков.

Эксперимент проводился следующим образом: трос разматывался на всю длину (150 м) и к нему прицеплялась пачка лесоматериалов, после чего включалась лебедка, которая дотаскивала пачку до мачты. Перед началом трелевки по всей трассе движения при помощи оригинального прибора, на пикетах через 1 м, брались пробы естественного сложения почвы, затем после каждого прохода пачки на пикетах брались пробы почвы в следе пачки. Пачка оттаскивалась трактором сбоку от трассы движения. После пяти протаскиваний пачки трасса смещалась на $65-70^\circ$ и эксперимент повторялся. Всего было выполнено три серии (деревья за комли, хлысты за вершины, хлысты за комли), по 15 протаскиваний каждой. Образцы (керны) почвы помещались каждый в герметично закрывающийся пакет и снабжались биркой с указанием номера пикета, номера прохода, и в дальнейшем взвешивались в лабораторных условиях, что позволило свести к минимуму погрешности, неизбежно возникающие в полевых условиях.

Экспериментальные исследования влияния поворота пачки лесоматериалов на уплотнение почвы проводились в лабораторных условиях на базе кафедры СТЛ СПбГЛТА совместно с аспирантом кафедры Технологии лесозаготовительных производств Д.В. Лепилиным. Для контроля за ходом нагружения использовался датчик прибора (динамометр) ДОС-3-2И.

5. Результаты экспериментальных исследований. После взвешивания всех кернов в лабораторных условиях, и определения плотности полученных образцов получалась выборка или статистический ряд для построения гистограммы. Данные статистического ряда вносились в ПЭВМ и при помощи таких прикладных программ, как Microsoft Excel 7.0 и Mathcad 8.0 рассчитывались выравнивающие частоты и статистики закона распределения. В результате обработки экспериментальных исследований было определено, что комли пачки хлыстов при трелевке за вершины и вершины хлыстов при трелевке за комли оказывают уплотняющее воздействие на почву.

Таблица 1. Статистики закона распределения плотности почвы

Плотность почвы	Статистики, т/м ³			
	Математическое ожидание		Среднее квадратичное	
	\bar{X}	%	$\bar{\sigma}$	%
Естественного сложения	0,87	100	0,063	100
Плотность под комлями хлыстов	1,11	126	0,074	117
Плотность под вершинами хлыстов	0,89	102	0,088	140
Плотность под кронами деревьев	0,86	99	0,088	140

Из анализа представленных в таблице 1 экспериментальных данных видно, что наибольший ущерб лесной почве наносит волочащаяся комлевая часть пачки при трелевке хлыстов за вершины. Это объясняется достаточно малым пятном контакта комлей с почвой. Кроме того, результаты экспериментальных исследований показывают, что волочащиеся кроны пачки деревьев не уплотняют почву, а в некоторой степени даже разуплотняют ее. Так математическое ожидание плотности почвы в следе волочащихся крон трелемой пачки деревьев оказалась на 0,5% меньше чем плотность почвы естественного сложения. Математическое ожидание плотности почвы под комлем на 41-50% больше математического ожидания плотности почвы естественного сложения.

Соответствие экспериментальных значений плотности распределения теоретическому закону, то есть адекватности математических моделей объекту, определялась критерием согласия Пирсона. Оценка расхождения между наблюдаемыми или полученными экспериментально и выравнивающими частотами проводилась по критерию Романовского. Расчеты по-

казали, что критерий Романовского по всем исследованиям находится в диапазоне 2,7–2,9.

В таблице 2 приведены усредненные по 5-6 измерениям (с разбросом не более 15%) значения силы P_1 (Н), действующей на рабочую поверхность датчика с площадью s_1 для двух указанных состояний удаления тензодатчика от поверхности штампа.

Таблица 2. Экспериментальные данные при повороте штампа

Угол поворота штампа θ°	Диапазон значений P_1 при удалении датчика от штампа, мм	
	$r_1=8$	$r_1=16$
0	0-1	0-0,5
5	3-5	1-3
10	5-7,5	2-4
15	8-10	3-5

После обработки в Excel 2007 была получена эпюра изменения величины P_1 во времени в непосредственной близости датчика от штампа при повороте последнего на угол $\theta=15^\circ$. Ее анализ показал, что эпюра изменения величины P_1 описывается нормальным законом распределения. Кроме этого, было установлено, что время нагружения почвы боковых полос трассы движения от касательных напряжений, возникающих при углах поворота пачки от 0 до 15° , подчиняется нормальному закону распределения, и соизмеримо со временем разгрузки, что позволяет производить оценку влияния цикличности нагружения на уплотнение почвы от поворотов трелевочной пачки.

6. Экономическая оценка предложенных технологических решений.

Оценка экономической эффективности применения КТУ в условиях холмисто-рядовых рельефов производится применительно к условно-сплошным рубкам на склонах крутизной: 20-40%, свыше 40%. Расстояние транспортирования канатными трелевочными установками в рассматриваемых условиях составляет 100-250 м по пересеченному рельефу, применение трелевочных тракторов на котором не допустимо. Рубке подвергаются до 62-65% первоначального запаса древесины.

Исследования рассматривают широкий диапазон природно-производственных условий применения КТУ: по объему хлыста в древостоях 0,22-0,29 м³; 0,30-0,39 м³; 0,40-0,49 м³; по породному составу древостоев: смешанные; по объему лесозаготовок на предприятии: 50 тыс. м³, 100 тыс. м³, 150 тыс. м³; по годам применения: 1-й год, 2-й год, 3-й год, 4-й год, 5-й год; по ликвидному запасу древесины на 1 га: до 100 м³, 150 м³ и более 150 м³.

В составе комплекса работ рассмотрены основные и вспомогательные работы, выполняемые основными и вспомогательными рабочими ле-

созаготовок. Цены на КТУ были приняты по 2009 году на основе опубликованных материалов официальных дилеров, ОАО «Велмаш». В расчетах капиталовложений учтено сокращение расходов по строительству усов лесовозных дорог.

Удельные капитальные вложения связанные с применением КТУ определены по годам эксплуатации по уравнению:

$$K_{y\partial} = K_{КТУ} : \sum_{t=1}^T \Pi - K_{дор} : \sum_{t=1}^T \Pi, \quad (21)$$

где $K_{КТУ}$ – балансовая стоимость КТУ; $K_{дор}$ – стоимость строительства лесовозных дорог (усов, веток); $\sum_{t=1}^T \Pi$ – суммарная выработка КТУ за период наработки ресурса (Т).

Зависимость удельных капитальных вложений связанных с применением самоходных КТУ в зависимости от объема хлыста в древостое ($V_{хл}$) и расстояния трелевки ($L_{тр}$):

$$\text{Для КТУ ЛЛ-20} \quad K_{y\partial} = 11,75 + \frac{0,86}{V_{хл}} + 0,0095L_{тр} + \frac{0,0135L_{тр}}{V_{хл}}$$

$$\text{Для КТУ ЛЛ-27} \quad K_{y\partial} = 10,92 + \frac{0,78}{V_{хл}} + 0,0086L_{тр} + \frac{0,0124L_{тр}}{V_{хл}}$$

В расчетах производственной себестоимости трелевки КТУ и работ, связанных с обеспечением операции трелевка в комплексе лесосечных работ участвуют следующие затраты: основная и дополнительная заработная плата производственных рабочих; отчисления во внебюджетные фонды; расходы на подготовку и освоение производства; расходы на содержание и эксплуатацию КТУ; экономия расходов по содержанию лесовозных дорог; прочие производственные расходы.

Зависимость эксплуатационных затрат на трелевку древесины КТУ (С) от среднего объема хлыста в древостое ($V_{хл}$) и расстояния трелевки ($L_{тр}$) выглядит следующим образом:

$$\text{Для КТУ ЛЛ-20} \quad C_{y\partial} = 22,5 + \frac{0,65}{V_{хл}} + 0,0235L_{тр} + \frac{0,0225L_{тр}}{V_{хл}}$$

$$\text{Для КТУ ЛЛ-27} \quad C_{y\partial} = 24,7 + \frac{0,56}{V_{хл}} + 0,0205L_{тр} + \frac{0,0217L_{тр}}{V_{хл}}$$

Для последующих лет эксплуатации КТУ удельные эксплуатационные затраты возрастают. Полная себестоимость 1 м³ лесопродукции за 2009 год в предприятиях Ленинградской области составила 824,4 руб. Товарность хлыстов древостоя СЗФО определена исходя из их характери-

стик: среднего состава древостоя, среднего диаметра и высоты деревьев в каждой градации среднего объема хлыста. Выход сортиментов из одного хлыста принят по литературным данным с учетом их возможных поломок в процессе валки деревьев.

Результативная оценка работ «трелевка КТУ» по сравниваемым вариантам применения КТУ устанавливает их ценность, которая определяется разностью между ценностью положительных результатов или выгод, обеспечивающих вариантом применения КТУ, и отрицательных результатов по этим вариантам, т.е. *ценность=выгоды-затраты*.

В результате расчетов установлено, что КТУ ЛЛ-20 за период применения на трелевке древесины в сложных рельефных условиях при объеме хлыста 0,255 м³ обеспечивает чистый дисконтированный доход 412,5 руб./м³, а в древостоях с объемом хлыста 0,625 м³ – 670,6 руб. на м³; КТУ ЛЛ-27 соответственно: 451,2 и 694,9 руб/м³.

Основные выводы и рекомендации:

1. В настоящее время на переувлажненных, заболоченных и холмисто-грядовых местностях Северо-Запада РФ сосредоточен значительный объем спелой и перестойной древесины, требующей неотложной рубки. Вышеперечисленные условия являются особо ранимыми, с точки зрения экологических последствий, и требуют особых систем машин и технологий для проведения лесосечных работ.
2. Предложенная конструкция самоходной тыловой мачты канатной трелевочной установки (защищенная патентом на полезную модель) позволит значительно сократить трудоемкость разработки лесосек с использованием мобильных канатных трелевочных установок.
3. Разработанные устройства предотвращающие перегруз лесовозного транспорта и производящие автоматический учет лесоматериалов (защищенные патентами на полезную модель) позволяют повысить эффективность выполнения вспомогательных работ на лесозаготовках, предотвратить чрезмерные нагрузки на лесовозные дороги и их подвижной состав.
4. При повороте пачки на угол 15° на почвогрунтах низкой несущей способности величина относительного уплотнения почвогрунта боковой поверхности волока волочащейся комлевой частью пачки достигает $\bar{\rho}_6 = 1,33$. Следовательно, наряду с оценкой величины уплотнения почвогрунта в вертикальном направлении необходимо при поворотах трелевочной пачки учитывать развитие процесса уплотнения в перпендикулярном направлении, т.е. в пределах боковой поверхности.
5. Получены основные зависимости, позволяющие определять оптимальную величину расстояния трелевки по критерию воздействия на почву,

а также оптимальный угол подъема пачки к горизонту при трелевке полуподвесными КТУ.

6. Время нагружения почвы боковых полос трассы движения от касательных напряжений, возникающих при углах поворота пачки от 0 до 15°, подчиняется нормальному закону распределения, и соизмеримо со временем разгрузки, что позволяет производить оценку влияния цикличности нагружения на уплотнение почвы от поворотов трелюемой пачки.
7. Комли пачки хлыстов при трелевке за вершины и вершины хлыстов при трелевке за комли оказывают уплотняющее воздействие на почву. Математическое ожидание плотности почвы под комлем на 41-50% больше математического ожидания плотности почвы естественного сложения. Крона при трелевке деревьев незначительно разуплотняет почву.
8. КТУ ЛЛ-20 за период применения на трелевке древесины в сложных рельефных условиях при объеме хлыста 0,255 м³ обеспечивает чистый дисконтированный доход 412,5 руб./м³, а в древостоях с объемом хлыста 0,625 м³ – 670,6 руб. на м³; КТУ ЛЛ-27 соответственно: 451,2 и 694,9 руб/м³.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В. Средооадающие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации. СПб.: Издательство ЛТА, 2008. 176 с.
2. Григорьев И.В., Жукова А.И., Иванов А.В., Рудов М.Е., Свойкин Ф.В. **Результаты экспериментальных исследований воздействия древесины на почву при различных способах трелевки // Системы. Методы. Технологии. 2011, № 4. С. 68-72.**
3. Григорьев И.В., Жукова А.И., Иванов А.В., Лепилин Д.В. **Математическая модель влияния маневрирования трелюемой пачки древесины на почву лесосек // Системы. Методы. Технологии. 2011, № 4. С. 57-61.**
4. Иванов В.А., Иванов А.В. Определение упругости однопролетной канатной трелевочной установки с учетом смещения опор / Материалы первой международной научно-практической Интернет конференции «Леса России в XXI веке». СПб.: ЛТА, 2009. С. 170-174.
5. Иванов А.В. Обоснование угла перегиба несущего каната канатной трелевочной установки на поворотных опорах / Материалы второй международной научно-практической интернет-конференции "Леса России в XXI веке". СПб.: ЛТА, 2009. С. 184-192.
6. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Жукова А.И., Иванов А.В., Рудов С.Е. Показатели качества процесса лесозаготовки // Материалы Междуна-

родной научно-практической конференции «Современные проблемы лесозаготовительных производств, производства материалов и изделий из древесины: пиломатериалы, фанера, деревянные дома, заводского изготовления, столярно-строительные изделия». СПб.: НП «НЦО МТД», 2009. Том. 2. С.155-163.

7. Иванов А.В., Киселев Д.С. Разработка труднодоступных лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации / Политехнический симпозиум «молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона». Материалы конференции «Экспериментальные и теоретические исследования в области инженерных наук» СПб.: ГПУ 2008 г. С. 50-51.
8. Тихонов И.И., Григорьев И.В., Жукова А.И., Лепилин Д.В., Киселев Д.С., Иванов А.В. Устройство учета веса лесоматериалов при проведении транспортных работ. Патент на полезную модель № 86135 опубл. 27.08.2009 Бюлл. № 24.
9. Григорьев И.В., Жукова А.И., Иванов А.В., Григорьева О.И. Тыловая мачта для мобильной канатной трелевочной установки. Патент на полезную модель № 84181 опубл. 10.07.2009 Бюлл. № 19.
10. Григорьев И.В., Жукова А.И., Иванов А.В., Есин Г.Ю. Новое техническое решение для трелевки лесоматериалов в условиях заболоченных и переувлажненных лесосек // Опыт лесопользования в условиях Северо-Запада РФ и Фенноскандии. Материалы международной научно-технической конференции посвященной 60-летию Лесоинженерного факультета Петрозаводского государственного университета -Петрозаводск.: ПетрГУ, 2011. С. 8–10.

Просим принять участие в работе диссертационного Совета Д.212.008.01 или прислать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 163002, Архангельск, набережная Северной Двины 17 Северный (Арктический) федеральный университет.