

на правах рукописи



ХИТРОВ Егор Германович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРЕЛЕВКИ ОБОСНОВАНИЕМ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ЛЕСНЫХ МАШИН ПРИ ОПЕРАТИВНОМ
КОНТРОЛЕ СВОЙСТВ ПОЧВОГРУНТА**

05.21.01 – «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства»

автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Архангельск
2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Григорьев Игорь Владиславович

Официальные оппоненты – **Шегельман Илья Романович**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой технологии и организации лесного комплекса ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет», 05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства

Сушков Сергей Иванович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия», 05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»

Защита состоится 30 июня 2015 года в 13 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.008.01 на базе ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» по адресу: 163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17, ауд. 1220.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» и на сайте www.narfu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета



Земцовский Алексей
Екимович

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Трелевка древесины является одной из важнейших технологических операций лесосечных работ. Вместе с тем, работа лесных машин зачастую наносит окружающей среде заметный ущерб. В этой связи внимание многих ученых как в нашей стране, так и за рубежом, сосредоточено на исследовании и технологическом совершенствовании, а также минимизации экологических последствий первичного транспорта леса.

Среди наиболее известных отечественных ученых, изучавших трелевку древесины, необходимо отметить Г.М. Анисимова, Ю.Ю. Герасимова, Э.Ф. Герца, И.В. Григорьева, В.А. Иванова, В.М. Котикова, В.Г. Кочегарова, А.М. Кочнева, В.К. Курьянова, В.А. Макуева, В.Н. Меньшикова, А.И. Никифорову, Ф.В. Пошарникова, П.Б. Рябухина, В.С. Сюнева, И.Р. Шегельмана, Ю.А. Ширнина и многих других. Более общие вопросы движения машин в условиях бездорожья рассматривались в работах Я.С. Агейкина, Д. Адамса, В.Ф. Бабкова, М.Г. Беккера, Дж. Вонга, В.В. Горячкина, В.В. Гуськова, В.В. Кацыгина, И.П. Ксеновича, М.Н. Летошнева, В.В. Ларина, М.И. Ляско, В.А. Скотникова, Е.А. Чудакова, Б.Л. Шапошника, С.А. Шуклина, С.Б. Шухмана.

Неоднократно указывалось на то, что вопрос взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесосек, являющийся одним из важнейших в рамках исследований по совершенствованию операции трелевки древесины, изучен не полно. В частности, сравнительно слабо проработаны модели, учитывающие взаимное влияние эластичности движителя, геометрических параметров пятна контакта, нагрузки и физико-механических (либо прочностных) свойств лесного почвогрунта на развитие его деформаций. Вариативность свойств почвогрунта подчеркивает сложность этого вопроса.

Анализ литературных источников по тематике исследования показывает, что зачастую авторы используют различные приемы для описания свойств почвогрунта. В отечественных исследованиях чаще используются значения физико-механических свойств, определяемые по ГОСТ в лаборатории или полевых условиях, а в зарубежных (чаще построенных непосредственно на экспериментальных данных) – показатели сопротивления грунта вдавливанию штампов определенной геометрической формы, среди которых наибольшее распространение получила величина сопротивления вдавливанию стандартного конусного пенетromетра (конусный индекс). При этом отметим недостаток в практических соотношениях для сопоставления результатов, полученных при разных подходах, что осложняет обмен информацией между коллегами.

В связи с изложенным, считаем тематику исследований, направленную на дальнейшее изучение и уточнение описания процесса взаимодействия лесных машин с почвогрунтами лесосек и совершенствование технологической операции трелевки древесины, актуальной как для теории, так и для практики лесозаготовительного производства.

Степень разработанности темы исследования. Распространенные в настоящее время модели нуждаются в уточнении в части учета взаимного влияния эластичности движителя лесной машины, геометрических параметров пятна контакта, нагрузки, физико-механических и прочностных свойств лесного почвогрунта на развитие его деформаций. Отмечается недостаток в соотношениях для оценки физико-механических свойств почвогрунтов по прочностным показателям (определяемым пенетрационными испытаниями).

Цель работы: повышение эффективности трелевки древесины колесными лесными машинами.

Объект исследования: деформируемые под воздействием движителей колесных лесных машин почвогрунты лесосек.

Предмет исследования: процесс трелевки древесины колесными лесными машинами.

Задачи исследования:

1. Составить математическую модель для прогнозирования основных показателей процесса трелевки древесины в зависимости от свойств почвогрунта и параметров движителя машины.
2. Получить зависимости для расчета величины конусного индекса по значениям физико-механических свойств почвогрунта.
3. Составить методику оценки физико-механических свойств лесного почвогрунта по величине конусного индекса.
4. Провести реализацию математических моделей и сравнить результаты моделирования с данными независимых источников.
5. Провести экспериментальную проверку составленных моделей и методик расчета.
6. Сформулировать рекомендации по практическому использованию полученных результатов при проектировании технологического процесса заготовки древесины.

Научная новизна: разработана математическая модель взаимодействия движителя колесной лесной машины с почвогрунтом лесосеки, отличающаяся учетом взаимного нелинейного влияния геометрических и жесткостных параметров движителя и физико-механических и прочностных свойств почвогрунта на деформации уплотнения и сдвига почвогрунта, позволяющая в широком диапазоне почвенно-грунтовых условий подбирать параметры движителя с целью снизить экологический ущерб и повысить эффективность трелевки древесины.

Теоретическая значимость работы. Предложенные в работе модели и соотношения позволяют уточнить описание нелинейного развития деформаций сжатия и сдвига лесного почвогрунта под воздействием эластичного колесного движителя. Модели позволяют в последующих исследованиях проводить оценку соотношения расчетных значений деформаций сжатия и сдвига при образовании колеи под воздействием движителя машины с учетом влияния геометрические и жесткостные параметров штампа-движителя,

нагрузки и свойств почвогрунта, развивают методические положения теории взаимодействия лесных машин с поверхностью движения.

Практическая значимость работы:

1. Получены упрощенные соотношения для расчета осадки массива почвогрунта под действием эластичного колесного движителя, которые могут быть использованы в практических расчетах на начальном этапе подбора параметров движителя (диаметр колеса, ширина колеса, внутреннее давление в шине и нагрузка на колесо) в зависимости от модуля деформации почвогрунта.
2. Полученные зависимости, связывающие конусный индекс и физико-механические свойства лесного почвогрунта, позволяют на практике осуществлять взаимную конверсию моделей, построенных с использованием физико-механических свойств почвогрунта либо конусного индекса и, тем самым, обеспечивают возможность оперативного сопоставления результатов отечественных и зарубежных исследователей.
3. Разработанная и проверенная экспериментально методика оценки удельного сцепления, угла внутреннего трения и модуля сдвига почвогрунта по величине конусного индекса упрощает сбор сведений о состоянии почвогрунта, необходимых в практических расчетах основных параметров процесса взаимодействия движителя лесной машины с почвогрунтом лесосеки.
4. Для оперативной оценки основных показателей процесса трелевки древесины форвардером в зависимости от свойств почвогрунта и параметров движителя машины, а также приведенной нагрузки на колесо и подбора рациональных параметров движителя и нагрузки в зависимости от свойств почвогрунта (либо обоснования диапазона свойств почвогрунта, в котором имеющиеся параметры движителя и нагрузки будут удовлетворять представлениям о рациональности), на базе теоретических исследований создана программа для ОС MS-Windows на языке программирования C#.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель взаимодействия эластичного движителя колесной лесной машины с почвогрунтом лесосеки и соотношения, полученные на основе ее реализации.
2. Упрощенная математическая модель взаимодействия движителя колесной лесной машины с почвогрунтом лесосеки.
3. Теоретические и экспериментальные зависимости для расчета конусного индекса по физико-механическим свойствам лесного почвогрунта.
4. Методика и результаты экспериментальной оценки физико-механических свойств лесного почвогрунта по значению конусного индекса.

Методология и методы исследования. При проведении исследований базой послужили работы признанных ученых в области лесозаготовительного производства и движения машин по бездорожью. Используются методы сбора и анализа информации. В ходе теоретических исследований применялись численные методы решения уравнений (трансцендентных и интегральных), аппроксимации численных данных, математического анализа. В ходе

обработки опытных данных использовались классические методы статистической обработки данных.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается применением в качестве базовых зависимостей, апробированных авторитетными учеными, применением современных вычислительных средств и лицензионного программного обеспечения при проведении теоретических исследований и обработке экспериментальных данных, удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, проверкой согласования результатов исследований со сведениями независимых источников.

Апробация результатов проводилась на ежегодных НТК СПбГЛТУ в 2012 – 2015 гг., ежегодных НТК Лесоинженерного факультета в 2012 – 2015 гг., Международной научно-технической интернет-конференции «Леса России в XXI веке», Международной научной конференции SGEM-2014 (Болгария) (материалы конференции индексируются в базе Scopus). Основное содержание работы опубликовано в 7 статьях из перечня журналов, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов диссертационных исследований, общее число публикаций по теме работы составляет 12. Результаты исследований также отражены в отчетах по НИР.

Исследования выполнялись в створе Перечня Приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ, (от 07.07.2011 г.) пункт «Рациональное природопользование». Часть материалов работы получена при выполнении НИР № 01201255482 «Разработка теоретических основ сквозных технологических процессов и модульных систем машин лесозаготовительного производства», руководитель, проф. И.В. Григорьев. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства», которая включена в реестр ведущих научных и научно-педагогических школ Санкт-Петербурга распоряжением Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга от 13.12.2013 № 99. Руководитель школы – проф. И.В. Григорьев.

Сведения о структуре работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основного текста, общих выводов и рекомендаций, библиографического списка (включает 138 наименований) и двух приложений. Основной текст работы включает в себя 193 страницы основного текста, 59 рисунков, 27 таблиц.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Показано, что на настоящем этапе важна комплексная оценка эффективности лесозаготовительного производства. При этом важно изучение как российского, так и зарубежного опыта работы по использованию новой техники и технологии лесосечных работ.

Проанализированы модели, представленные в работах российских ученых, которые строятся с использованием экспериментальных данных по фи-

зико-механическим свойствам грунтов и ряда эмпирических зависимостей по вдавливаю штампов в грунт.

Рассмотрен *WES*-метод, распространенный за рубежом. Модели в его рамках строятся с использованием конусного индекса *CI* (параметров сопротивления грунта вдавливаю стандартного конусного пенетрометра) и параметров колеса машины.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основная модель для описания процесса взаимодействия эластичного колесного движителя с деформируемым массивом почвогрунта строится на соотношении, полученном на основе положений проф. Я.С. Агейкина:

$$P = \frac{G_w K_d}{K_{\Pi} b l} = \frac{P_s E h}{K_1 P_s a b \arctg \left(\frac{H - h}{a b} \right) h E}, \quad (1)$$

где P – осредненное давление на почвогрунт со стороны движителя; G_w – расчетное значение нагрузки на колесо лесной машины; K_d – коэффициент учета скорости машины; K_{Π} – коэффициент учета формы пятна контакта; b – осредненное значение ширины пятна контакта; l – осредненное значение длины пятна контакта; K_1 – коэффициент учета соотношения осредненной ширины и длины пятна контакта; P_s – несущая способность массива почвогрунта; E – модуль деформации массива; h – осадка массива под воздействием движителя (глубина колеи); a – коэффициент учета влияния толщины деформируемого слоя на распространение нормальных напряжений по глубине массива; H – толщина деформируемого слоя массива.

Для оценки несущей способности почвогрунта под воздействием колесного движителя использованы соотношения, предложенные В.В. Лариным:

$$P_s = P_{s0} \alpha_z \quad (2)$$

где P_{s0} – несущая способность слоя грунта неограниченной толщины; α_z – коэффициент учета толщины деформируемого слоя грунта.

Величина p_{s0} находится по следующей формуле:

$$P_{s0} = 0,5 J_1 N_1 \gamma b + N_2 \gamma h + J_3 N_3 C \quad (3)$$

где J_1, J_3 – коэффициенты учета геометрических параметров пятна контакта при расчете несущей способности; N_1, N_2, N_3, S – вспомогательные коэффициенты, зависящие от угла внутреннего трения грунта; C – внутреннее сцепление почвогрунта; γ – объемный вес почвогрунта.

Формулы для определения коэффициентов J_1, J_3 следующие:

$$J_1 = l / \left(\frac{+ 0,4b}{-} \right) \quad (4)$$

$$J_3 = \left(\frac{+ b}{-} \right) \left(\frac{+ 0,5b}{-} \right) \quad (5)$$

Формулы для расчета коэффициентов N_1, N_2, N_3, S имеют вид:

$$N_1 = \left(\frac{- S^4}{-} \right) S^5 \quad (6)$$

$$N_2 = 1 / S^2 \quad (7)$$

$$N_3 = 2 \left(\frac{+ S^2}{-} \right) S^3 \quad (8)$$

$$S = \operatorname{tg} \left(\frac{0,25\pi - 0,5\varphi}{-} \right) \quad (9)$$

где φ – угол внутреннего трения почвогрунта.

Коэффициент учета толщины деформируемого слоя рассчитывается по формуле:

$$\alpha_z = 1 + 0,5hH^* / \left[H \cdot \left(H - h - 0,25H^* \right) \right] \quad (10)$$

где H^* , ε – вспомогательные величины, определяемые по формулам:

$$H^* = 0,707b \tan \varphi \cos \varepsilon \exp \left[0,25\pi + \varepsilon \tan \varepsilon \right] \quad (11)$$

$$\varepsilon = 0,75\varphi \quad (12)$$

Формулы для определения коэффициентов K_1 и a следующие:

$$K_1 = \frac{0,03 + l/b}{0,6 + 0,43 \cdot l/b}, \quad (13)$$

$$a = 0,64 \cdot \left(1 + b/H \right), \quad (14)$$

Коэффициент динамичности K_D оценивался по зависимости:

$$K_D = t / \left(1 + t_p \right) \approx lv^{-1} / \left(v^{-1} + t_p \right) \quad (15)$$

где t – суммарное время воздействия на почвогрунт, t_p – время релаксации напряжений почвогрунта (экспериментальная величина), v – скорость движения машины.

Для учета эластичности движителя при определении b и l использованы соотношения:

$$b = B + 10h \cdot h_z / \left(-h + H_T - h_z \right) \quad (16)$$

$$l = l_1 + l_2 = 2\sqrt{Dh_z - h_z^2} + \sqrt{D \cdot \left(h_z + h \right) \cdot \left(h_z - h \right)} \quad (17)$$

где B – ширина колеса; H_T – высота шины (для колес лесных машин $H_T \approx 0,75B$); h_z – радиальная деформация колеса; D – диаметр ненагруженного колеса.

Анализ формул (1) – (17) показывает, что зависимости содержат величины E , C , φ , γ , H , t_p (свойства грунта), D , B , G_w (параметры движителя), K_D , h , h_z , v (параметры, определяющиеся комплексом свойств грунта и параметров движителя), причем первые две группы параметров являются исходными данными к решению уравнения (1).

Из теории движения вездеходных транспортных средств известно выражение для связи осредненного значения давления по пятну контакта и деформации шины:

$$P = G_w / \left(K_D b \right) \approx 0,5 \cdot \left(p_w + P_0 \right) \cdot \pi h_z \cdot \left(B / H_T + 3H_T / B \right) \cdot \left(-h_z / B \right) \cdot B^{-1}, \quad (18)$$

где P_0 – среднее давление по пятну контакта колеса с недеформируемой поверхностью, которое находится по формуле:

$$P_0 = G_w / F_0 \quad (19)$$

где F_0 – площадь пятна контакта колеса с жесткой поверхностью:

$$F_0 = K_D b_0 l_0 = K_D B \sqrt{Dh_{z0} - h_{z0}^2} \quad (20)$$

где h_{z0} – деформация колеса при контакте с жесткой поверхностью.

Значение h_{z0} для колес лесных машин определяется по величинам нагрузки на колесо G_w и внутреннего давления в камере шины p_w по эмпирической зависимости:

$$h_{z0} = 0,008 + 0,001 \cdot \left(0,000365 + 170/p_w \right) \cdot G_w \quad (21)$$

Уравнения (18) – (21) объединяются в систему, причем переменных шесть: B, D, p_w, G_w, h, h_z . Была проведена серия численных решений уравнений (18) – (21) при варьировании величин B, D, p_w, G_w, h . По итогам обработки решений при помощи метода наименьших квадратов получено следующее выражение для h_z ($R^2 = 0,9775$):

$$h_z = f(B, D, p_w, G_w) \cdot h^{g(B, D, p_w, G_w)} \quad (22)$$

где $f(B, D, p_w, G_w) = 0,0715 \cdot \frac{G_w^{0,691} B^{0,305}}{p_w^{0,677} D^{0,394}}$; $g(B, D, p_w, G_w) = -0,0891 \cdot \frac{p_w^{0,193} D^{0,558}}{G_w^{0,201} B^{0,057}}$

Проф. И.В. Григорьевым предложена классификация лесных почвогрунтов, в рамках которой можно проследить зависимости физико-механических свойств почвогрунтов $C, \varphi, \gamma, H, \nu$ (коэффициент Пуассона) от модуля деформации E [МПа]. При помощи метода наименьших квадратов получим степенные зависимости ($R^2 > 0,9$):

$$C = 10,774E^{0,7737} \quad (23)$$

$$\varphi = 13,669E^{0,1818} \quad (24)$$

$$\gamma = 8,4008E^{0,1168} \quad (25)$$

$$H = 0,4714E^{-0,479} \quad (26)$$

$$\nu = 0,242E^{-0,422} \quad (27)$$

Для определения t_p принята следующая зависимость:

$$t_p = 0,0083\varphi^{-1}, \quad (28)$$

Система формул (1) – (17), (22) – (26), (28) содержит величины $E, D, B, p_w, G_w, K_{II}, h, \nu$, причем первые шесть параметров являются исходными данными (K_{II} выражается через E). Скорость ν определяется комплексом факторов: типом машины, ограничениями, связанными с параметрами колеса (например, паспортное значение максимальной скорости при заданной нагрузке и давлении в камере), а также соотношением мощности двигателя машины N , КПД трансмиссии η_T и силы сопротивления движению машины F_{RR} :

$$\nu = N\eta_T / F_{RR}, \quad (29)$$

Для силы сопротивления почвогрунта качению колеса известна следующая зависимость:

$$F_{RR} = \int_0^h b \cdot P dh, \quad (30)$$

После подстановки в (30) выражений для P, b, F_{RR} по (1), (2) – (17), (22) – (26), (28), и (29), при заданных $E, D, B, p_w, G_w, K_{II}, N, \eta_T$ получим интегральное уравнение относительно h и ν с переменными пределами интегрирования. После получения численного решения относительно ν для ряда значений h и аппроксимации результатов при помощи метода наименьших квадратов зависимость для скорости будет выражаться некоторой функцией:

$$\nu = Q_2(B, D, B, p_w, G_w, E), \quad (31)$$

конкретный вид которой определяется для каждого сочетания $E, D, B, p_w, G_w, K_{II}, h, N, \eta_T$. Тогда система формул (1) – (17), (22) – (26), (28) – (31), обра-

зующая основную математическую модель, предлагаемую в работе, будет решаться относительно h при заданных значениях $E, D, B, p_w, G_w, K_{II}, N, \eta_T$.

Результаты реализации основной модели в показали, что на почвогрунтах III категории сопротивление движению машины существенно ограничивает скорость ее перемещения, однако на почвогрунтах II и, в особенности I категории, расчетные значения предельной скорости перемещения, ограниченной соотношением мощности двигателя и сопротивления почвогрунта деформированию, превышают 5 м/с, то есть скорость ограничена только технологическими соображениями. В этом случае для получения адекватных расчетных показателей процесса взаимодействия движителя машины с почвогрунтом в расчетах следует задаваться предельным значением v , ограниченным технологическими соображениями (5 м/с) и принимать K_D в пределах 0,8 – 0,9.

Для построения **упрощенной модели** была проведена аппроксимация составляющих уравнения (1). С использованием формул (14), (16), (22), (26) и обозначения $ab \arctg \left(\frac{H-h}{ab} \right)$ символом K_H , получим:

$$K_H = 0,607 - 0,123E - 1,26hE^{0,479} + 0,248hE^{1,48} \quad (32)$$

Выражения для осредненной ширины и длины пятна контакта (16), (17) после аппроксимации зависимостей (16), (17), (22):

$$b = f_1(B, D, p_w, G_w) \cdot h^{g_1(B, D, p_w, G_w)}$$

$$f_1(B, D, p_w, G_w) \cong 1,105 \cdot G_w^{0,0175} B^{0,977} p_w^{-0,0203} D^{-0,0118} \quad (33)$$

$$g_1(B, D, p_w, G_w) \cong 0,0128 \cdot G_w^{0,678} B^{-0,445} p_w^{-0,667} D^{-0,364}$$

$$l = f_2(B, D, p_w, G_w) \cdot h^{g_2(B, D, p_w, G_w)}$$

$$f_2(B, D, p_w, G_w) \cong 1,196 \cdot G_w^{0,0961} B^{0,0321} p_w^{-0,103} D^{0,632} \quad (34)$$

$$g_2(B, D, p_w, G_w) \cong 0,0528 \cdot G_w^{-0,227} B^{-0,283} p_w^{0,239} D^{0,549}$$

По результатам аппроксимации формул (2) – (12), (16), (17) и осреднения по величине осадки h значение P_S (при $h < 0,5H$) от модуля деформации почвогрунта получим в виде линейной функции ($R^2 = 0,9994$):

$$\overline{p_s} = 0,0995E \quad (35)$$

Выражения для K_1, K_H, b, l, P_S по (13), (32) – (35) после подстановки в (1) образуют упрощенную математическую модель взаимодействия движителя с почвогрунтом.

На рисунке 1 представлены в виде графика расчетные значения глубины колеи под воздействием колесного движителя по основной и упрощенной моделям.

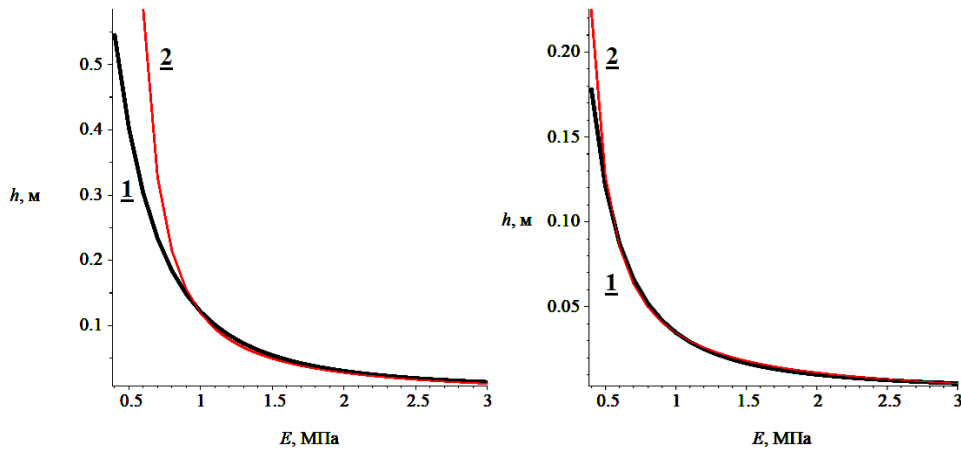


Рисунок 1. Результаты расчета глубины колеи при воздействии колесного движителя: а) $B = 0,7$ м, $D = 1,5$ м, $p_w = 400000$ Па, $G_w = 45000$ Н, $K_{II} = 1$, $K_D = 1$; б) - $B = 0,7$ м, $D = 1,5$ м, $p_w = 400000$ Па, $G_w = 45000$ Н, $K_{II} = 1$, $K_D = 1$ (1 – основная модель; 2 – упрощенная модель)

Результаты расчетов согласуются практически точно при условии, что расчетное значение глубины колеи не превышает половину толщины деформируемого слоя почвогрунта. В связи с этим, упрощенную модель расчета осадки рекомендуется использовать в практических расчетах на начальном этапе подбора параметров движителя (диаметр колеса, ширина колеса, внутреннее давление в шине и нагрузка на колесо) в зависимости от модуля деформации почвогрунта.

Отметим, что в рамках основной модели возможна оценка отношения суммарной деформации сжатия h_0 и h по формуле:

$$K_C = \frac{1}{h_0} \int_0^h \frac{h_0}{h} dh \cdot 100\% = \frac{1}{h_0} \int_0^h \frac{P_s - P}{P_s} dh \cdot 100\% \quad (36)$$

Предварительная серия расчетов в широком диапазоне исходных данных показала, что на K_C помимо свойств почвогрунта, оказывают влияние геометрические и жесткостные параметры штампа-движителя и нагрузка на колесо (даже при одинаковом расчетном P). На базе разработанной модели представляется перспективным провести отдельные исследования закономерностей изменения K_C в рамках развития и совершенствования моделей для прогнозирования параметров технологической операции трелевки древесины в зависимости от числа проходов лесной машины по волоку.

Зависимости для расчета конусного индекса по физико-механическим свойствам лесного почвогрунта получены из известного решения задачи механики деформируемых сред о вдавливании конического штампа в полупространство (схема на рисунке 2).

Конусный индекс определяется через усилие вдавливания F_Z по формуле:

$$CI = \frac{4F_Z}{\pi d^2} = \frac{4}{\pi d^2} \int_0^L \left[\sigma \operatorname{tg} \alpha + \tau \right] 2\pi \eta \operatorname{tg} \alpha d\eta \quad (37)$$

где d – диаметр основания конуса, L – длина конической части пенетрометра, Z – расстояние от поверхности грунта до начала конической части прибо-

ра, α – угол заточки конуса, σ – нормальная к плоскости конуса составляющая сопротивления вдавлыванию, τ – касательная к плоскости конуса составляющая сопротивления вдавлыванию, η – координата элементарного поперечного сечения конуса.

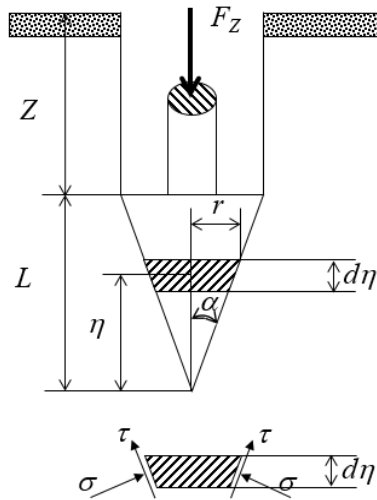


Рисунок 2. Расчетная схема процесса вдавлывания конусного пенетromетра в грунт

С учетом известных формул для σ и τ при вдавлывании конуса в полупространство, после интегрирования (37) получена система зависимостей для расчета конусного индекса (не приводится ввиду ограниченного объема автореферата), которая без существенной потери точности упрощена:

$$CI = \frac{4 \cdot (A_2 C_2 + A_3 C_3)}{\pi d^2}$$

$$A_2 = \frac{6\pi (\sin\varphi + 1) (\gamma \alpha + \text{tg}\varphi) (\text{ctg}\varphi + (\epsilon + Z) \gamma \text{tg}\alpha)}{3 - \sin\varphi}$$

$$A_3 = -2\pi C \text{tg}^2 \alpha \text{tg}\varphi$$

$$C_2 = \frac{X_1 \cdot (\epsilon - \gamma (\epsilon - 2) Z \text{tg}\varphi) - 2X_2 (\epsilon + (\epsilon + Z) \gamma \text{tg}\varphi)}{(\epsilon - 1) (\epsilon - 2) (\epsilon - 3) \gamma^3 \text{tg}^3 \varphi} + \frac{X_2 (\epsilon + (\epsilon + Z) \gamma \text{tg}\varphi)}{(\epsilon - 1) (\epsilon - 2) \gamma^2 \text{tg}^2 \varphi} \quad (38)$$

$$X_1 = G / [\epsilon + Z \gamma \text{tg}\varphi]; X_2 = G / [\epsilon + (\epsilon + L) \gamma \text{tg}\varphi];$$

$$C_3 = 0,5L^2$$

$$k = 4\sin\varphi / (\epsilon + 3\sin\varphi)$$

где G – модуль сдвига почвогрунта по зависимости:

$$G = 2,5E / (\epsilon + \nu) \quad (39)$$

При помощи метода наименьших квадратов и выражений (23) – (25), (27), (39) при стандартных параметрах конуса получено приближенное уравнение ($R^2 = 0,9994$):

$$CI = 0,4042E \quad (40)$$

С использованием формул (38) и (40) можно на практике конвертировать модели, полученные с использованием E , C , φ в модели, использующие CI .

Формула (40) обеспечила **возможность сопоставления результатов расчетов по основной модели с данными независимых источников**. Пример результатов расчетов по основной модели (линия 10), девяти независимым WES-моделям (линии 1 – 9) по М. Саарилахти представлен в виде графиков на рисунке 3.

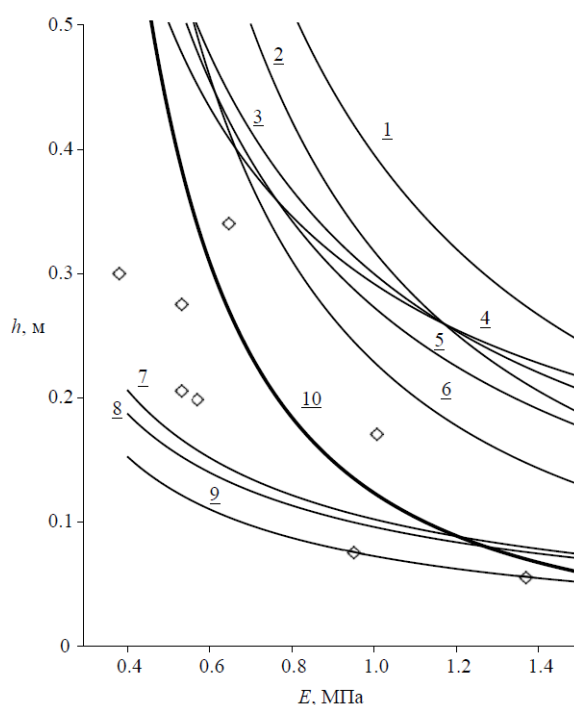


Рисунок 3. Сопоставление результатов расчета глубины колеи после прохода трехосного форвардера ($G_w = 40$ кН, $D = 1,333$ м, $B = 0,7$ м, $p_w = 400$ кПа):

Результаты расчетов по предлагаемой в работе модели на всех категориях почвогрунта находятся между двумя группами WES-моделей, причем качественно отражают экспериментальные данные о глубине колеи. WES-модели могут обеспечить удовлетворительные результаты только в комбинации, ни одна из них сама по себе не дает близкой к опытным данным (маркеры) оценки во всем спектре почвенно-грунтовых условий.

Предлагаемая модель обеспечивает удовлетворительно точные результаты при сравнении с практическими рекомендациями М. Саарилахти: h не превышает 0,1 м при работе на почвогрунтах с $E = 1,247$ МПа ($CI = 0,504$ МПа, что отличается от рекомендуемого значения 0,55 МПа на 9 %), h не превышает 0,25 м при работе на с $E = 0,799$ МПа ($CI = 0,373$ МПа, что отличается от рекомендуемого значения 0,35 МПа не более, чем на 2 %).

Основная модель была реализована в виде программы на языке программирования С#. Программа позволяет оперативно оценить основные показатели процесса трелевки древесины форвардером в зависимости от свойств почвогрунта и параметров движителя машины, а также приведенной нагрузки на колесо и, таким образом, подобрать рациональные (с индивиду-

альной точки зрения) параметры движителя и нагрузки в зависимости от свойств почвогрунта (либо обосновать диапазон свойств почвогрунта, в котором имеющиеся параметры движителя и нагрузки будут удовлетворять представлениям о рациональности). Результаты расчета оформляются, в том числе, в виде графика поверхности при варьировании двух выбранных пользователем параметров в интересующем диапазоне, что облегчает анализ связей исходных данных с результатами расчета. Расчет может вестись как с использованием физико-механических свойств почвогрунта, так и показателя CI , таким образом, интерпретация результатов возможна в рамках обоих устоявшихся подходов к описанию свойств почвогрунта.

3. МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В главе рассматривается методика организации, проведения и обработки результатов экспериментальных исследований. Целью экспериментов являлось: проверка взаимных связей E , C , φ , G лесного почвогрунта, апробация методики определения величины CI по значениям C , φ , G , апробация методики оценки величин C , φ , G по значению CI , а также проверка результатов реализации основной модели взаимодействия колесного движителя с почвогрунтом лесосеки.

Если задаться стандартными значениями диаметра основания конуса d и глубины вдавливания (в долях от L), а также учесть, что величина L при постоянном диаметре основания конуса d представляет собой функцию угла конуса α , то функцию (38) можно записать в следующем виде:

$$CI = q \Psi(C, \varphi, G) \quad (41)$$

Для решения обратной задачи (оценки C , φ , G по экспериментальным значениям CI) необходимо подобрать такие значения \tilde{C} , $\tilde{\varphi}$, \tilde{G} , при которых будет выполняться соотношение метода наименьших квадратов:

$$\Phi = [I_{1,\text{exp}} - q \Psi_1(\tilde{C}, \tilde{\varphi}, \tilde{G})]^2 + [I_{2,\text{exp}} - q \Psi_2(\tilde{C}, \tilde{\varphi}, \tilde{G})]^2 + [I_{3,\text{exp}} - q \Psi_3(\tilde{C}, \tilde{\varphi}, \tilde{G})]^2 \rightarrow \min, \quad (42)$$

решение которого сводится к численному решению системы уравнений, составленной из частных производных целевой функции Φ :

$$\begin{cases} \frac{\partial [I_{1,\text{exp}} - q \Psi_1(\tilde{C}, \tilde{\varphi}, \tilde{G})]^2 + [I_{2,\text{exp}} - q \Psi_2(\tilde{C}, \tilde{\varphi}, \tilde{G})]^2 + [I_{3,\text{exp}} - q \Psi_3(\tilde{C}, \tilde{\varphi}, \tilde{G})]^2}{\partial \tilde{C}} \Big|_0 \\ \frac{\partial [I_{1,\text{exp}} - q \Psi_1(\tilde{C}, \tilde{\varphi}, \tilde{G})]^2 + [I_{2,\text{exp}} - q \Psi_2(\tilde{C}, \tilde{\varphi}, \tilde{G})]^2 + [I_{3,\text{exp}} - q \Psi_3(\tilde{C}, \tilde{\varphi}, \tilde{G})]^2}{\partial \tilde{\varphi}} \Big|_0 \\ \frac{\partial [I_{1,\text{exp}} - q \Psi_1(\tilde{C}, \tilde{\varphi}, \tilde{G})]^2 + [I_{2,\text{exp}} - q \Psi_2(\tilde{C}, \tilde{\varphi}, \tilde{G})]^2 + [I_{3,\text{exp}} - q \Psi_3(\tilde{C}, \tilde{\varphi}, \tilde{G})]^2}{\partial \tilde{G}} \Big|_0 \end{cases} \quad (43)$$

Экспериментальные значения конусного индекса получали в соответствии со стандартной методикой, вдавливание осуществлялось на глубину $Z = 2L$. Для проведения исследований были изготовлены три съемных наконечника с углами конуса 15° (стандартный угол), $22,5^\circ$ и 30° (рисунок 4). Усилие

вдавливания регистрировалось при помощи поверенного динамометра сжатия ДОС – 3 – 2 – И.



Рисунок 4. Наконечники экспериментального пенетрометра

С целью проверки связей физико-механических свойств почвогрунта, а также апробации методики определения величины конусного индекса по их значениям и обратной ей методики оценки физико-механических свойств почвогрунта, в непосредственной близости от мест замера конусного индекса проводился отбор образцов почвогрунта с целью лабораторных испытаний его физико-механических свойств в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оценка значимости коэффициентов корреляции E , C , φ , G и CI (при вдавливании пенетрометра с углом конуса 15°) показала, что между E , C , φ , G , CI прослеживаются статистически значимые связи.

Для C , φ , G , CI получены следующие уравнения:

$$C = 10,9015 \cdot E^{0,7521} \cdot (\pm 0,0762) \quad (44)$$

$$\varphi = 13,7618 \cdot E^{0,1654} \cdot (\pm 0,0592) \quad (45)$$

$$G = 2,0320 \cdot E^{1,0513} \cdot (\pm 0,0890) \quad (46)$$

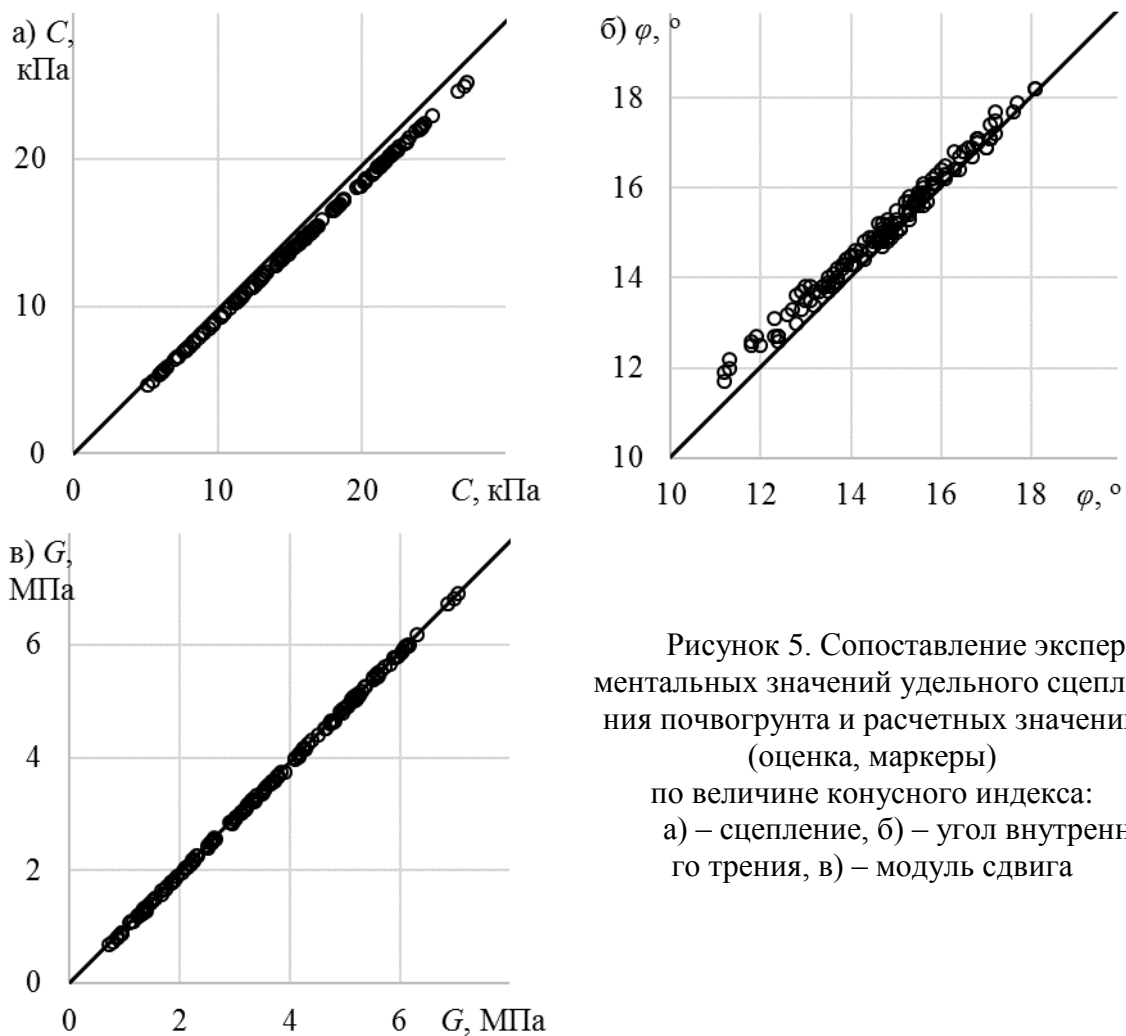
$$CI = 0,4039 \cdot E^{0,9988} \cdot (\pm 0,1389) \quad (47)$$

Расчетные значения CI по формуле (40), полученной в ходе теоретических исследований, отличаются от значений, получаемых по уравнению (47), на величину, находящуюся в пределах от -12 до 16 %.

После проведения опытов по исследованию вдавливанию пенетрометра с различными углами конуса была решена задача оценки физико-механических свойств почвогрунта по значениям конусного индекса. На рисунке 5 в виде графиков представлены результаты сопоставления экспериментальных значений физико-механических свойств почвогрунта и их оценок по экспериментальным значениям конусного индекса CI .

Полученные по значениям CI оценки C , φ , G (отличия составляют: для C в среднем $8,5$ % (до 10 %) в меньшую сторону; для φ 2 % (до 6 %), в большую сторону; для G $3,5$ % (до 7 %), в меньшую сторону). Оценки физико-механических свойств почвогрунта, получаемые с использованием разрабо-

танной методики с использованием пенетрометра, могут в практических расчетах заменить значения указанных физико-механических свойств при расчете основных параметров процесса взаимодействия движителя лесной машины с почвогрунтом лесосеки. Использование оценок позволит существенно сократить трудозатраты на получение экспериментальных сведений о состоянии почвогрунта лесосеки, что, в конечном итоге, позволит получить за сравнительно короткое время более подробное представление о почвенно-грунтовых условиях работы лесных машин и, таким образом, сформулировать адекватные рекомендации по организации технологической операции первичного транспорта древесины.



В ходе проведения экспериментальных исследований на участках, с которых отбирались образцы почвогрунта с целью определения их физико-механических характеристик, были также дополнительно проведены замеры глубины колеи после однократного прохода колесного форвардера Ponsse Winsent с колесной формулой 8x8, параметрами колеса $D = 1,6$ м $B = 0,6$ м и $p_w = 230$ кПа. Расчетное значение G_w составляло 35 кН. Длины участков составляли 150 м, причем замеры глубины колеи проводили через каждые 10 м (в сумме по всем трем участкам число замеров составило 45). Для тех же ус-

ловий были произведены расчеты с использованием основной теоретической модели. На рисунке 6 представлены результаты экспериментов и расчетов глубины колеи в зависимости от модуля деформации почвогрунта.

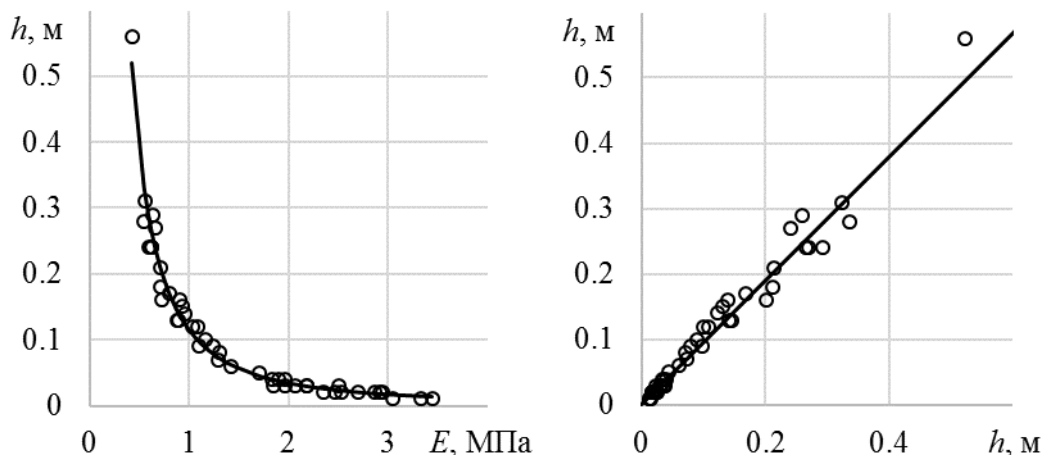


Рисунок 6. Экспериментальные и расчетные значения глубины колеи после однократного прохода форвардера 8x8, $d=1,6$ м, $B=0,6$ м, $p_w=230$ кПа, $G_w=35$ кН

Результаты теоретических исследований отличаются от экспериментальных в среднем на величину порядка 13 %, причем большие в процентном отношении расхождения отмечаются при меньших значениях глубины колеи, что, вероятно, связано с погрешностью измерения в полевых условиях.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

По результатам выполненных в работе исследований сделаны следующие основные выводы и рекомендации:

1. Несущая способность лесного почвогрунта является функцией переменных параметров движителя (диаметр колеса, ширина колеса, внутреннее давление в шине и нагрузка на колесо), а также физико-механических свойств почвогрунта и оценивается по формулам (2) – (12), (16) – (17), (22). С учетом параметров движителя колесной лесной машины, расчетное значение несущей способности у почвогрунтов I, II и III категории находится в пределах соответственно 0,25 – 0,30, 0,90 – 0,105, 0,42 – 0,46 МПа (при величине осадки до половины толщины деформируемого слоя). Зависимость осредненного значения несущей способности всех категорий почвогрунтов от модуля деформации почвогрунта имеет линейный характер и представлена в виде формулы (35) ($R^2 = 0,9994$).

2. На почвогрунтах III категории сопротивление движению машины существенно ограничивает скорость ее перемещения, однако на почвогрунтах II и, в особенности I категории, расчетные значения предельной скорости перемещения, ограниченной соотношением мощности двигателя и сопротивления почвогрунта деформированию, превышают 5 м/с. Это позволяет утверждать, что при работе на почвогрунтах I и II категории фактическая скорость перемещения колесного форвардера ограничена только технологическими соображениями.

3. Упрощенная математическая модель взаимодействия движителя с почвогрунтом составляется с использованием выражений (1), (13), (32) – (35). Анализ сходимости результатов расчетов с использованием упрощенной модели и основной модели (состоящей из уравнений (1) – (17), (22) – (26), (28) – (31), показал, что результаты расчетов согласуются практически точно при условии, что расчетное значение глубины колеи не превышает половину толщины деформируемого слоя почвогрунта. Упрощенную модель расчета осадки рекомендуется использовать в практических расчетах на начальном этапе подбора параметров движителя в зависимости от модуля деформации почвогрунта.

4. По результатам численного анализа теоретических соотношений для расчета конусного индекса по физико-механическим свойствам почвогрунта получено упрощенное уравнение (38). Функция, связывающая конусный индекс и модуль деформации лесного почвогрунта, полученная с учетом зависимостей физико-механических свойств почвогрунта по формулам формулами (23) – (25), (27), (39), является линейной и представлена уравнением (40).

5. Сопоставление результатов расчета с использованием WES-моделей для слабых и прочных грунтов и по предлагаемой основной модели, а также экспериментальных данных независимых источников показало, что результаты расчетов по составленной модели во всем спектре почвенно-грунтовых условий находятся между результатами по двум группами WES-моделей, при этом качественно отражают экспериментальные данные о глубине колеи. Предлагаемая модель обеспечивает удовлетворительно точные результаты при сравнении с практическими рекомендациями независимых источников.

6. Оценка значимости коэффициентов корреляции модуля деформации, удельного сцепления, угла внутреннего трения и конусного индекса показала, что между этими величинами прослеживаются тесные, статистически значимые связи. Зависимость удельного сцепления почвогрунта, угла внутреннего трения и модуля сдвига, с учетом доверительных интервалов значений, представлены показательными функциями (44) - (46).

7. Экспериментальная зависимость конусного индекса почвогрунта (при угле конуса 15°) от модуля деформации выражается показательным уравнением (47). Расчетные значения конусного индекса по формуле (40), полученной в ходе теоретических исследований, отличаются от значений, получаемых по уравнению (47), на величину, находящуюся в пределах от – 12 до 16 %.

8. Полученная по значениям конусного индекса оценки удельного сцепления, угла внутреннего трения и модуля сдвига почвогрунта близки к экспериментальным значениям во всем исследованном диапазоне (отличия составляют: для сцепления в среднем 8,5 % (до 10 %), в меньшую сторону; для угла внутреннего трения 2 % (до 6 %) в большую сторону; для модуля сдвига 3,5 % (до 7 %), в меньшую сторону) Оценки физико-механических свойств почвогрунта, получаемые с использованием разработанной методики с ис-

пользованием пенетрометра, могут в практических расчетах заменить значения указанных физико-механических свойств при расчете основных параметров процесса взаимодействия движителя лесной машины с почвогрунтом лесосеки.

9. Результаты теоретических исследований в части расчета глубины колеи удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными (рисунок 6). Например, при работе форвардера 8x8 с диаметром колеса 1,6 м при ширине 0,6 м, внутреннем давлении 230 кПа и расчетном значении нагрузки на колесо, теоретически спрогнозированные значения глубины колеи отличаются от экспериментальных в среднем на величину порядка 13 %, причем большие в процентном отношении расхождения отмечаются при меньших значениях глубины колеи.

10. Для оперативной оценки основных показателей процесса трелевки древесины форвардером в зависимости от свойств почвогрунта и параметров движителя машины, а также приведенной нагрузки на колесо и подбора рациональных параметров движителя и нагрузки в зависимости от свойств почвогрунта (либо обоснования диапазона свойств почвогрунта, в котором имеющиеся параметры движителя и нагрузки будут удовлетворять представлениям о рациональности), основная модель и зависимость (40) для конверсии физико-механических свойств почвогрунта в конусный индекс были реализованы в виде программы для ОС MS-Windows на языке программирования C#.

11. Оценка соотношения расчетных значений деформаций сжатия и сдвига при образовании колеи под воздействием движителя машины (процентное соотношение суммарной деформации сжатия в зависимости от величины общей осадки) по формуле (36) показала, что соотношение деформации сжатия к деформации сдвига на различных категориях почвогрунтов различно и зависит, в том числе, от соотношения суммарной деформации массива (осадки штампа) и толщины деформируемого слоя. Предварительная серия расчетов в более широком диапазоне исходных данных показала, что на соотношение деформации сжатия и общей деформации массива (осадки) оказывают влияние также геометрические и жесткостные параметры штампа параметры штампа-движителя. С учетом этих сведений, на базе предложенного подхода, формула (36), представляется перспективным провести отдельные исследования по выявлению закономерностей, описывающих соотношение деформаций сжатия и сдвига почвогрунтов в рамках развития и совершенствования моделей для прогнозирования параметров технологической операции трелевки древесины в зависимости от числа проходов лесной машины по волоку.

Основное содержание диссертационного исследования опубликовано в следующих печатных работах:

1. Хитров Е.Г., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н., Ильюшенко Д.А. Расчет конусного индекса по величине модуля деформации лесного почвогрунта. Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4(24). С. 127 – 131.
2. Хитров Е.Г., Божбов В.Е., Ильюшенко Д.А. Расчет несущей способности лесных почвогрунтов под воздействием колесных движителей. Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4(24). С. 122 – 126.
3. Григорьев И.В., Макуев В.А., Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Устинов В.В., Калинин С.Ю. Исследование коэффициента сопротивления передвижению колесных лесных машин. Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2014. № S2. С. 36-41.
4. Григорьев И.В., Хитров Е.Г., Никифорова А.И., Григорьева О.И., Куницкая О.А. Определение энергоемкости продуктов лесопользования в рамках методики оценки экологической эффективности лесопользования. Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2014. Т. 19. № 5. С. 1499-1502.
5. Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Пельмский А.А., Григорьева О.И. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию. Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. 2014. № 2 (139). С. 87-91.
6. Калистратов А.В., Иванов В.А., Коротков Р.К., Хитров Е.Г., Григорьев Г.В. Исследование коэффициента фильтрации лесной почвы (случай дерново-подзолистой почвы). Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 190-193.
7. Григорьев И.В., Никифорова А.И., Пельмский А.А., Хитров Е.Г., Хахина А.М. Экспериментальное определение времени релаксации напряжений лесного грунта. Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. № 8 (137). С. 77-80.
8. Божбов В.Е., Хитров Е.Г., Дмитриева И.Н., Григорьев Г.В. Обзор технических характеристик современных четырехосных колесных форвардеров. Материалы МНТИК «Леса России в XXI веке». Санкт-Петербург, 2015. С. 17 – 20.
9. I. Grigorev, E. Khitrov, A. Kalistratov, M. Stepanishcheva. Dependence of filtration coefficient of forest soils to its density // 14th SGEM geoconference on water resources. Forest, marine and ocean ecosystems, SGEM2014 conference proceedings, June 19-25, 2014, vol. 2, 339-344 pp.
10. I. Grigorev, V. Ivanov, G. Gasparian, A. Nikiforova, E. Khitrov. Softwood harvesting and processing problem in russian federation // 14th SGEM geoconference on water resources. Forest, marine and ocean ecosystems, SGEM2014 conference proceedings, June 19-25, 2014, vol. 2, 443-446 pp.
11. I. Grigorev, E. Khitrov, V. Ivanov, A. Kalistratov, V. Bozhbov. New approach for forest production stocktaking based on energy cost // 14th SGEM geoconference on water resources. Forest, marine and ocean ecosystems, SGEM2014 conference proceedings, June 19-25, 2014, vol. 2, 407-414 pp.
12. Пельмский А. А., Хитров Е.Г., Фролов И.С., Никифорова А.И. Определение влияния влажности и температуры на развитие деформации сжатия лесного почвогрунта. Технология и оборудование лесопромышленного комплекса. - СПб, 2013, № 6, С.142-147.