

на правах рукописи



БОЖБОВ Владимир Евгеньевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ТРЕЛЕВКИ ПУТЕМ
ОБОСНОВАНИЯ РЕЙСОВОЙ НАГРУЗКИ ФОРВАРДЕРОВ**

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 – **Макуев Валентин Анатольевич**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой колесных и гусеничных машин ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса», 05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства

Галактионов Олег Николаевич,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и организации лесного комплекса ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет», 05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет»

Защита состоится 29 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. Процесс трелевки – один из важнейших и наиболее ресурсоемких в лесозаготовительном производстве. От того, насколько рационально организован первичный транспорт древесины, во многом зависят показатели деятельности всего лесозаготовительного предприятия. При этом уже на стадии проектирования технологического процесса необходима оценка эффективности работы трелевочной техники (производительность, экологичность, эргономичность и т.д.) исходя из комплекса факторов: состава парка машин, условий работы, показателей самого процесса трелевки (среднее расстояние трелевки, рейсовая нагрузка).

Исследованию и совершенствованию процесса трелевки древесины посвящены труды многих ученых: 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. Никифоровой, Ф.В. Пошарникова, П.Б. Рябухина, В.С. Сюнева, И.Р. Шегельмана, Ю.А. Ширнина и многих других.

Вместе с тем, ряд вопросов нуждается в дальнейшей проработке. Сведения об основных показателях процесса первичного транспорта древесины с использованием колесных форвардеров, сравнительно недавно получивших распространение в России, зачастую недостаточно точно отражают сложные взаимосвязи параметров лесной машины, рейсовой нагрузки, почвенно-грунтовых условий лесосеки, с эффективностью первичного транспорта древесины. В частности, наблюдается недостаток в моделях для практической оценки проходимости и производительности колесных форвардеров, исходя из конкретных природно-производственных условий. Указанное затрудняет выработку практических рекомендаций, направленных на дальнейшее совершенствование процесса трелевки древесины колесными сортиментоподборщиками.

В свете этого, тематика настоящей работы, направленная на дальнейшее исследование показателей процесса взаимодействия колесных лесных машин с почвогрунтами лесосек, представляется актуальной как для теории, так и для практики лесозаготовительного производства.

Степень разработанности темы исследования. На настоящий момент в теории лесозаготовительного производства можно отметить недостаток работ, направленных на выявление нелинейного влияния нагрузки со стороны движителя на сопротивление почвогрунта передвижению машины и показатели сцепления. Существующие методики расчета, в основном, учитывают силы сопротивления и сцепления при помощи односложных коэффициентов без привязки к параметрам машины и величине нагрузки. Общие вопросы движения машин с колесными движителями по бездорожью рассмотрены в теории движения вездеходных средств, однако адаптация этих результатов применительно к задачам лесозаготовительного комплекса требует отдельных исследований.

Цель работы: повышение производительности трелевки древесины колесными форвардерами.

Объект исследования: деформируемые под воздействием движителей колесных форвардеров почвогрунты лесосек.

Предмет исследования: процесс трелевки древесины колесными форвардерами.

Задачи исследования:

1. Разработать математическую модель взаимодействия движителя колесного форвардера с почвогрунтом, позволяющую оценить значения сил сопротивления движению и сцепления движителя с поверхностью.
2. Получить зависимости для оценки производительности форвардеров при выполнении операции трелевки с учетом значения рейсовой нагрузки, при которой соблюдается ограничение по глубине колеи.
3. Получить зависимости для оценки производительности форвардеров при выполнении операции трелевки с учетом влияния почвенно-грунтовых условий и веса машины с лесоматериалами на транспортную скорость.
4. Получить зависимости для оценки производительности форвардеров при ограничении веса машины с лесоматериалами по сцеплению на слабых грунтах.
5. Получить зависимости для оценки производительности форвардеров при ограничении веса машины с лесоматериалами по высоте максимального порогового препятствия.

Научная новизна: разработана и исследована математическая модель взаимодействия движителя колесного форвардера с почвогрунтом, отличающаяся уточненным учетом влияния рейсовой нагрузки на показатели сопротивления движению и сцепления и позволяющая в практических расчетах обосновать рациональный объем трелеваемых лесоматериалов исходя из комплекса критериев оценки технологической эффективности процесса трелевки.

Теоретическая значимость работы. Разработанная математическая модель позволяет учесть нелинейное влияние физико-механических свойств лесного почвогрунта и нагрузки со стороны движителя на сопротивление почвогрунта деформированию и силу сцепления движителя с деформируемым почвогрунтом, что развивает теоретические представления о взаимодействии движителей колесных лесных машин с почвогрунтом.

Практическая значимость работы. Результаты реализации математической модели позволяют на практике обосновать допустимую рейсовую нагрузку форвардера с учетом почвенно-грунтовых условий при обеспечении заданных показателей проходимости (выполнение требования о возможности преодоления препятствия заданной высоты, об обеспечении достаточной для исключения буксования силы сцепления), а также прогнозировать транспортную скорость и производительность трелевочной машины в конкретных природно-производственных условиях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель взаимодействия движителя колесного форвардера с лесным почвогрунтом, позволяющая оценить значения сил сопротивления движению и сцепления движителя с поверхностью.
2. Результаты оценки производительности форвардеров при выполнении операции трелевки с учетом значения рейсовой нагрузки, при которой соблюдается ограничение по глубине колеи.
3. Результаты оценки производительности форвардеров при выполнении операции трелевки с учетом влияния почвенно-грунтовых условий и веса машины с лесоматериалами на транспортную скорость.
4. Результаты оценки производительности форвардеров при ограничении веса машины с лесоматериалами по сцеплению на слабых почвогрунтах.
5. Результаты оценки производительности форвардеров при ограничении веса машины с лесоматериалами по высоте максимального порогового препятствия.

Методология и методы исследования. При проведении исследований основой послужили работы признанных ученых в области лесозаготовительного производства. Используются методы сбора и анализа информации. В ходе теоретических исследований применялись методы аппроксимации численных данных и математического анализа. В ходе проведения опытов и обработки опытных данных использовались методы планирования эксперимента и статистической обработки данных.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается использованием в качестве основополагающих разработок признанных ученых в области лесозаготовительного производства, применением современных вычислительных средств и лицензионного программного обеспечения при проведении теоретических исследований и обработке экспериментальных данных, удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация результатов проводилась на ежегодных НТК СПбГЛТУ, ежегодных НТК Лесоинженерного факультета, 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 2 статьях из перечня журналов, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов диссертационных исследований, общее число публикаций по теме работы составляет 5. 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.

Сведения о структуре работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основного текста, общих выводов и рекомендаций, библиографического списка и 2 приложений. Основной текст работы включает в себя 149 страниц основного текста, 48 рисунков, 46 таблиц. Список литературы содержит в себе 100 источников.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрены вопросы использования колесных машин для трелевки древесины. Проанализированы ограничения рейсовой нагрузки: ограничение по грузоподъемности машины, ограничение по касательной силе тяги машины (сопротивление перемещению машины не должно превышать максимальное тяговое усилие форвардера), ограничение по сцеплению движителя с грунтом (касательная сила тяги не должна превышать силу сцепления движителя с поверхностью движения – почвогрунтом лесосеки). В ряде зарубежных источников приводятся рекомендации по ограничению веса трелевочной машины с грузом, исходя из допустимой глубины колеи после первого прохода машины. Так, например, считается, что максимально допустимая глубина колеи после первого прохода форвардера не должна превышать 10 см.

Как показал проведенный в главе анализ состояния вопроса, на настоящем этапе при расчетах используются значения коэффициента сопротивления движению и сцепления безотносительно веса машины, что нуждается в уточнении. Ввиду необходимости учета большого количества факторов (геометрические параметры движителя, нагрузка, физико-механические свойства почвогрунта, скорость движения) при определении сил сопротивления движению и сцепления машины с поверхностью почвогрунта, при разработке модели для оценки проходимости и производительности колесных форвардеров представляется целесообразным воспользоваться положениями, разработанными в рамках механики грунтов и теории движения автомобиля.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОХОДИМОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОЛЕСНЫХ ФОРВАРДЕРОВ

Характеристики форвардеров и расчет производительности. Анализ характеристик колесных форвардеров (данные производителей) показал, что между характеристиками форвардеров присутствуют определенные статистически значимые связи. По результатам статистической обработки сведений производителей при помощи метода наименьших квадратов получены следующие приближенные уравнения:

- для восьмиколесных форвардеров:

$$[M] = 3,6124 \exp(0,0739M) \quad (1)$$

$$N = 8,7318M, \quad (2)$$

$$N = 17,194 M^{0,8315}, \quad (3)$$

$$T = 20,719 M_{-}^{\overline{0,8157}}, \quad (4)$$

- для шестиколесных форвардеров:

$$[M] = 2,5939 \exp(0,1009 M_{-}), \quad (5)$$

$$N = 9,4329 M_{-}, \quad (6)$$

$$N = 10,772 M_{-}^{\overline{1,0012}}, \quad (7)$$

$$T = 28,012 M_{-}^{\overline{0,7032}}, \quad (8)$$

где $[M]$ – максимальная грузоподъемность форвардера [т], M – масса форвардера [т], N – мощность двигателя форвардера [кВт], T – максимальное тяговое усилие форвардера [кН].

С учетом удовлетворительного значения коэффициентов детерминации R^2 уравнений (1) – (8), полученные приближенные зависимости, на наш взгляд, удобно использовать в последующих технических расчетах производительности колесных форвардеров.

Сменная производительность форвардера в общем случае определяется по формуле:

$$P_{CM} = \frac{3600 \varphi_1 T_C Q}{\frac{l_{CP}}{U_X} + t_{ML} + t_{PT} + \frac{Q}{Q_{\Pi}} t_{ДЗВ} + \frac{l_{CP}}{U_{\Gamma}}}, \quad (9)$$

где φ_1 - коэффициент использования времени смены, T_C - продолжительность смены, Q - объем пачки, трелюемой машиной, l_{CP} – среднее расстояние трелевки, t_{ML} - время маневров на лесосеке, t_{PT} - время на приведение технологического оборудования из транспортного в рабочее состояние и наоборот, Q_{Π} - объем древесины, захватываемой и погружаемой в грузовой отсек манипулятором за один прием, $t_{ДЗВ}$ - время на доставку грейферного захвата к сортиментам, их захват и укладку в формировочное устройство, U_X - скорость трелевочной машины без груза, U_{Γ} - скорость трелевочной машины с грузом.

Скорость перемещения машины U_X и U_{Γ} можно рассчитать по формулам:

$$U_X = \frac{N \cdot \eta}{F_{CX}}, \quad (10)$$

$$U_{\Gamma} = \frac{N \cdot \eta}{F_{CT}}, \quad (11)$$

где η – коэффициент полезного действия трансмиссии, F_{CT} , F_{CX} – сила сопротивления движению соответственно груженого форвардера и форвардера без груза.

Определение силы сопротивления движению форвардера. При исследовании влияния почвенно-грунтовых условий на работу колесных форвардеров использована классификации почвогрунтов по механическим свойствам, предложенной проф. Григорьевым, в рамках которой физико-

механические свойства почвогрунта выражаются через модуль деформации E :

$$C_0 = 10,774E^{0,7737} \quad (12)$$

$$\varphi_0 = 13,669E^{0,1818} \quad (13)$$

$$\gamma = 8,4008E^{0,1168} \quad (14)$$

$$H = 0,4714E^{-0,479} \quad (15)$$

$$E_1 = 0,4259E \quad (16)$$

где E – модуль деформации почвогрунта [МПа], C_0 – внутреннее сцепление [кПа], φ_0 – угол внутреннего трения [°], γ – объемный вес почвогрунта естественного сложения [кН/м³], H – толщина деформируемого слоя (глубина распространения деформаций сжатия) [м], ν – коэффициент Пуассона почвогрунта, E_1 – модуль сдвига [МПа].

За основу модели, определяющей осадку почвогрунта под воздействием колесного движителя форвардера (глубину колеи) приняты положения теории проф. Я.С. Агейкина. Глубина колеи h связана с параметрами почвогрунта, движителя и давления на почвогрунт формулой:

$$h = \frac{Jqabq_s}{E \cdot (q_s - q)} \arctan \left(\frac{H - h \frac{q_s - q}{q_s}}{ab} \right) \quad (17)$$

где q_s – несущая способность почвогрунта, b – средняя ширина пятна контакта, q – среднее давление по пятну контакта, коэффициент учета формы пятна контакта, a – коэффициент учета толщины деформируемого слоя почвогрунта, q_s – несущая способность почвогрунта.

Величины J , a , q , входящие в уравнение (17), определяются по известным формулам:

$$J = \frac{0,03 + \frac{l}{b}}{0,6 + 0,43 \frac{l}{b}}, \quad (18)$$

$$a = \frac{1}{0,64 \cdot b \cdot \left(1 + \frac{b}{H}\right)} \quad (19)$$

$$q = \frac{G_w}{F} \quad (20)$$

где l – средняя длина площадки контакта движителя с поверхностью почвогрунта, G_w – нагрузка на одно колесо машины, F – площадь пятна контакта колеса с поверхностью почвогрунта.

Площадь пятная контакта можно в общем виде выразить формулой:

$$F = k_f bl, \quad (21)$$

где k_F – коэффициент формы, зависящий от состояния почвогрунта.

Форма пятна контакта колесного движителя с почвогрунтом варьируется от эллиптической (прочные почвогрунты) до близкой к прямоугольной (слабые почвогрунты). Площадь эллипса определяется перемножением длин осей на $0,25\pi$, площадь прямоугольника – перемножением длин сторон; если принять среднюю ширину площадки контакта b и среднюю длину площадки контакта l за оси эллипса при работе на прочных грунтах ($E = 3$ МПа по принятой классификации) и за длины сторон при работе на слабых почвогрунтах ($E = 0,4$ МПа по принятой классификации), то при допущении о показательном изменении коэффициента формы от модуля деформации почвогрунта, получим следующую формулу для определения коэффициента формы k_F (рисунок 1):

$$k_F = 0,8766E^{0,1199} \quad (22)$$

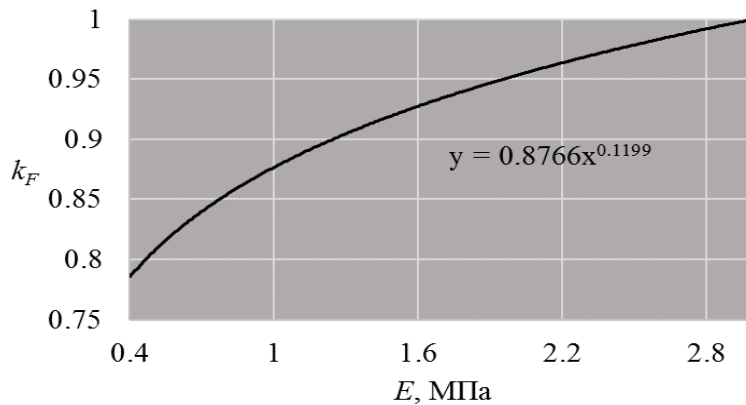


Рисунок 1. Зависимость коэффициента формы пятна контакта от модуля деформации почвогрунта

Длина пятна контакта находится по известной зависимости:

$$l = 2\sqrt{d \cdot h_z - h_z^2} + \sqrt{d \cdot (q_z + h_z) \cdot (q_z - h_z)} \quad (23)$$

где d – диаметр колеса, h_z – осевая деформация колеса.

Для определения осевой деформации колеса принята одна из наиболее распространенных зависимостей, которая получила название формула Хейдекеля:

$$h_z = \frac{G_w}{\pi p_w d} \quad (24)$$

Несущую способность грунта расчетным путем можно определить по следующей формуле:

$$q_s = q_{s0} \alpha_z \quad (25)$$

где q_{s0} – несущая способность слоя грунта неограниченной толщины, α_z – коэффициент учета толщины сжимаемого слоя грунта:

$$q_{s0} = \frac{\gamma b \left(-S^4 \right) l}{2S^5 \left(+0,4b \right)} + \frac{2C_0 \left(+S^2 \right) \left(+b \right)}{S^3 \left(+0,5b \right)} + \frac{\gamma h}{S^2} \quad (26)$$

$$S = \tan \frac{2\pi - \varphi_0}{4}$$

$$\alpha_z = 1 + \frac{\frac{1}{2\sqrt{2}}hb \tan \varphi_0 \cos \frac{3\varphi_0}{4} \exp\left(\frac{\pi + 3\varphi_0}{4} \tan \frac{3\varphi_0}{4}\right)}{H \cdot \left(H - h - \frac{1}{4\sqrt{2}} \tan \varphi_0 \cos \frac{3\varphi_0}{4} \exp\left(\frac{\pi + 3\varphi_0}{4} \tan \frac{3\varphi_0}{4}\right)\right)} \quad (27)$$

Глубина колеи h находится из решения уравнения (17) с учетом формул для входящих в него величин при заданных значениях E , p_w , b , d , G_w . Возможно и решение обратной задачи: по заданному значению h рассчитывается соответствующее ему значение G_w .

Для учета цикличности приложения нагрузки использована эмпирическая формула:

$$h_n = hn^{\frac{1}{a}}, \quad (28)$$

где n – число осей форвардера, a – эмпирический коэффициент, зависящий от свойств и состояния почвогрунта, который принимался на основании обобщения экспериментальных наблюдений М. Саарилахти (таблица 1).

Таблица 1 – Диапазон значений коэффициента учета цикличности приложения нагрузки

Грунт	Коэффициент a
Слабый	2...3
Нормальный	3...4
Прочный	4...5

Если поставить в соответствие качественным характеристикам грунта по таблице 1 значения модуля деформации различных категорий почвогрунтов, то зависимость среднего значения коэффициента a от модуля деформации E можно представить в виде графика на рисунке 2.

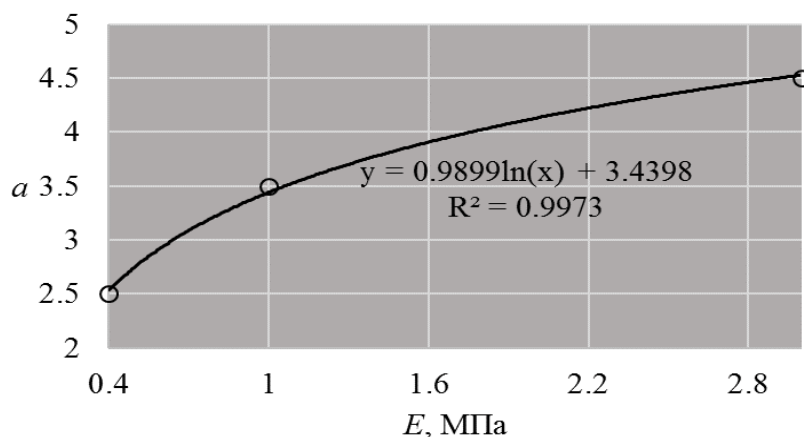


Рисунок 2. Зависимость коэффициента учета цикличности приложения нагрузки от модуля деформации почвогрунта

Зависимость, показанная графически на рисунке 2, с удовлетворительной точностью аппроксимируется следующим выражением:

$$a = 0,9899 \ln E + 3,4398, \quad (29)$$

Сила сопротивления массива почвогрунта деформированию (сила сопротивления качению колеса, обусловленная сопротивлением почвогрунта) определяется по формуле:

$$F_{c,r} = b \int_0^{h_n} q dh = b \int_0^{h_n} \frac{G_w}{F} dh \quad (30)$$

Определение сцепления форвардера с поверхностью почвогрунта. Сцепление колесной машины с поверхностью движения является, помимо сопротивления почвогрунта деформированию, еще одним важным фактором, сказывающимся на производительности колесной трелевочной техники.

Достаточное для движения без пробуксовки сцепление обеспечивается при выполнении условия:

$$R_{сц} = \sqrt{Q_s^2 - G_w^2} > F_{c,r}, \quad (31)$$

где Q_s – допустимая нагрузка на грунт, ограниченная его несущей способностью.

Допустимая нагрузка Q_s определяется по формуле:

$$Q_s = q_{s\beta} F \cos \beta, \quad (32)$$

где $q_{s\beta}$ – несущая способность массива почвогрунта с учетом отклонения вектора результирующей нагрузки от нормали к поверхности движения, β – угол приложения результирующей нагрузки по отношению к нормали к поверхности движения.

С учетом отклонения вектора нагрузки от нормали, несущая способность определяется по формуле:

$$q_{s\beta 0} = \left(\frac{\gamma b \left(-S^4 \left[\frac{1}{2} - 4\beta \tan \varphi \right] l \right)}{2S^5 \left(\frac{1}{2} + 4\beta \tan \varphi \right) + 0,4b} + \frac{2C_0 \left(+S^2 \left[\frac{1}{2} (\pi - \beta) \right] + b \right)}{S^3 \left(\frac{1}{2} (\pi + \beta) \right) + 0,5b} + \frac{\gamma h}{S^2} \right) \cdot \alpha_z \quad (33)$$

прочие величины, входящие в уравнение (33), рассчитываются по приведенным выше формулам.

Угол приложения результирующей нагрузки β определяется, исходя из значения нормальной нагрузки G_w и касательной реакции массива почвогрунта R_K :

$$\beta = \arctan \frac{R_K}{G_w} \quad (34)$$

Касательная сила R_K определяется интегрированием зависимости напряжений сдвига τ от деформаций сдвига j_1 и j_2 :

$$R_K = b \cdot r \cdot \left(\int_{-\alpha_2}^{\alpha_2} \tau \left[\frac{1}{2} \right] d\alpha + \int_{\alpha_2}^{\alpha_1} \tau \left[\frac{1}{2} \right] d\alpha \right) \quad (35)$$

Зависимость $\tau(j)$:

$$\tau = \frac{jE_1 \cdot \left(\frac{1}{2} q \tan \varphi_0 + C_0 \cdot \left(\frac{1}{2} - j \right) \right)}{t_r \left(\frac{1}{2} q \tan \varphi_0 + jE_1 + C_0 \cdot \left(\frac{1}{2} - j \right) \right)} \quad (36)$$

t_r – шаг грунтозацепов, прочие величины находятся по зависимостям:

$$j_1 = r \cdot (\alpha_1 - \alpha) - r \cdot (-\delta) \cdot (\sin \alpha_1 - \sin \alpha) \quad (37)$$

$$j_2 = r \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) - r \cdot (-\delta) \cdot (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2) - (-h_z + h) \cdot \ln \frac{\tan\left(\frac{\pi + 2\alpha_2}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\pi + 2\alpha}{2}\right)} \quad (38)$$

$$\alpha_1 = \arccos\left(1 - \frac{h_z + h}{r}\right) \quad (39)$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(1 - \frac{h_z}{r}\right) \quad (40)$$

Проиллюстрируем зависимость (36) для трех категорий почвогрунта в виде графиков на рисунке 3 ($t_T = 0,14$ м, $q = 50$ кПа).

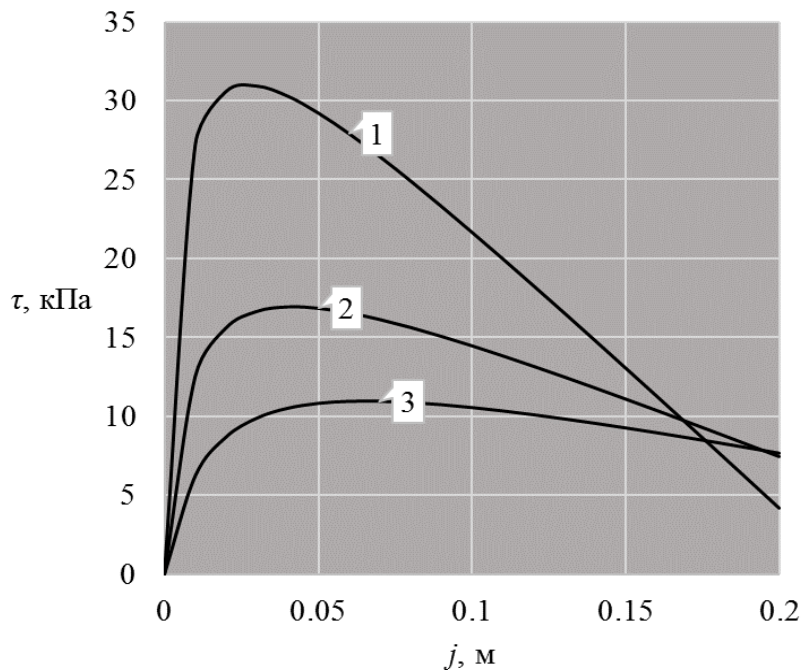


Рисунок 3. Зависимость напряжений сдвига почвогрунта от деформации сдвига: 1 – $E = 3$ МПа, 2 – $E = 1$ МПа, 3 – $E = 0,4$ МПа

После расчета касательной реакции R_K по формуле (35), определение угла приложения результирующей нагрузки β не представляет сложности. Таким образом, возможна проверка выполнения условий обеспечения сцепления движителя с поверхностью почвогрунта по формулам (31).

Еще одним важным показателем является коэффициент тяги по формуле:

$$\varphi_T = \frac{F_{сц} - F_c}{G_K}, \quad (41)$$

С его помощью можно оценить высоту пороговой неровности (т.е. максимальную высоту неровности, которую колесо машины может преодолеть), которую принято оценивать по следующей формуле:

$$h_{\pi} = R \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \varphi_T^2}} \right) \quad (42)$$

где R – радиус колеса, φ_T – коэффициент тяги.

Реализация модели. Исходные данные для расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные для расчета производительности колесных форвардеров на трелевке в зависимости от почвенно-грунтовых условий

Показатель	Минимальное значение	Максимальное значение	Интервал изменения
n	3	4	1
$[M]$, т	10	20	5
K_L , %	50	100	25
B , м	0,6	0,7	0,1

В таблице K_L – коэффициент загрузки кузова (в процентах от грузоподъемности), B – ширина колеса форвардера.

Расчеты произведены для почвогрунтов I, II, III категории (при различных значениях модуля E [МПа]). Мощность двигателя N , максимальное тяговое усилие T и масса форвардера M рассчитывались в зависимости от максимальной грузоподъемности $[M]$ по формулам (1) – (8). Складочная плотность древесины принималась равной 850 кг/м³. Нагрузка на колесо определялась делением общего веса машины с грузом на число колес. Пример результатов реализации составленной модели представлен в таблицах 3, 4.

Таблица 3 – Категории почвогрунта, при работе на которых обеспечена проходимость форвардеров по условию достаточного сцепления с поверхностью

B	n	3			4		
	K_L M	50	75	100	50	75	100
0,7	10	I,II,III	I,II	I,II	I,II,III	I,II,III	I,II
	15	I,II	I,II	I,II	I,II,III	I,II	I,II
	20	I,II	I,II	I,II	I,II	I,II	I,II
0,8	10	I,II,III	I,II,III	I,II	I,II,III	I,II,III	I,II
	15	I,II,III	I,II	I,II	I,II,III	I,II	I,II
	20	I,II	I,II	I,II	I,II,III	I,II	I,II

Как показывает анализ данных таблицы 3, при работе на почвогрунтах I и II категории для всех типов форвардеров (легкий, средних и тяжелых) обеспечивается сила сцепления движителя с поверхностью, достаточная для движения без пробуксовки. При шинах нормальной ширины на почвогрунтах III категории без пробуксовки могут работать легкие 3-осные форвардеры с 50%-ной загрузкой кузова, легкие 4-осные форвардеры с 50 и 75%-ной

загрузкой кузова, а также средние форвардеры с 50%-ной загрузкой кузова. При шинах увеличенной ширины без пробуксовки могут перемещаться легкие 3-осные форвардеры с 50 и 75%-ной загрузкой кузова, а также средние форвардеры с 50%-ной загрузкой кузова, а также легкие 4-осные форвардеры с 50 и 75%-ной загрузкой кузова, средние с 50%-ной загрузкой кузова, тяжелые с 50%-ной загрузкой.

Таблица 4 - Категории почвогрунта, при работе на которых значение глубины колеи не превосходит 0,1 м

		3			4		
B	n	50	75	100	50	75	100
	0,7	10	I, II	I, II	I, II	I, II	I, II
15		I, II	I, II	I	I, II	I, II	I, II
20		I, II	I	I	I, II	I, II	I
0,8	10	I, II	I, II	I, II	I, II	I, II	I, II
	15	I, II	I, II	I	I, II	I, II	I, II
	20	I, II	I, II	I	I, II	I, II	I, II

Данные таблицы 4 показывают, что легкие, средние и тяжелые форвардеры даже при полной загрузке кузова не образуют колею глубже 0,1 м при работе на почвогрунтах I категории. При нормальной ширине шины на почвогрунтах II категории колея превышает 0,1 м при работе 3-осных средних форвардеров с загрузкой кузова 100 %, тяжелых форвардеров с загрузкой кузова более 75 %. При увеличенной ширине шины средние и тяжелые 3-осные форвардеры при загрузке кузова 100 % оставляют колею более 0,1 м, также как и 4-осные тяжелые форвардеры с шинами нормальной ширины при загрузке кузова 100 %.

При помощи метода наименьших квадратов составлено уравнение ($R^2 = 0,9504$) для оценки коэффициента тяги:

$$\varphi_T = 0,58 - 0,024 \cdot \frac{0,01K_L + 0,53(M + 11)(0,99 - B)}{E^{1,1}} \quad (43)$$

Формула (43) позволяет на практике рассчитать коэффициент тяги, служащий для оценки проходимости колесного форвардера по условию достаточной силы сцепления с почвогрунтом, при варьировании грузоподъемности, коэффициента загрузки кузова, ширины колеса машины и модуля деформации почвогрунта. В сумме с уравнением (42), формула (43) может служить для оценки максимальной высоты неровности, которую может преодолеть форвардер при заданных условиях.

При помощи метода наименьших квадратов также составлено уравнение ($R^2 = 0,9205$) для оценки глубины колеи после первого прохода форвардера:

$$h_{(1)} = 0,0799 \cdot \frac{0,01K_L - 0,00616M + 2,8(0,01B + 0,0667)}{E^{1,68}} \quad (44)$$

Формула (44) позволяет на практике оценить глубину колеи после первого прохода форвардера при варьировании грузоподъемности, коэффициента загрузки кузова, ширины колеса машины и модуля деформации почвогрунта. При заданном значении допустимой глубины колеи формула (44) может служить для подбора коэффициента загрузки форвардера исходя из его максимальной грузоподъемности, ширины колеса и модуля деформации почвогрунта.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проверки адекватности разработанной модели были проведены полевые испытания с целью определения транспортной скорости и глубины колеи в зависимости от класса форвардера по грузоподъемности, рейсовой нагрузки и физико-механических свойств (категории) почвогрунта.

Полевые испытания проводились летом 2013 и 2014 года на территории ООО «Купеческий дом» (Псковская обл.). Для опытов предприятием были предоставлены форвардеры компании Ponsse Buffalo King (20,2 т, грузоподъемность 18 т), Wisent (16,3 т, грузоподъемность 14 т) и Gazelle (14 т, грузоподъемность 10 т) (соответственно тяжелый, средний и легкий). Для испытаний были отобраны 9 прямолинейных участков протяженностью 200 м, без препятствий. Трассы были разбиты на пикеты по 10 м, на каждом из которых замерялась скорость форвардера (среднее значение на участке длиной 10 м), а также глубина колеи после одного и десяти проходов форвардера (определялась как среднее арифметическое глубины двух параллельных следов колес).

Для присвоения почвогрунту категории в рамках принятой классификации были проведены лабораторные опыты по определению физико-механических свойств: модуля деформации E , удельного сцепления C_0 , угла внутреннего трения φ_0 и плотности в сухом состоянии γ . Опыты проводились на образцах, отобранных в непосредственной близости от трасс движения форвардеров в ходе экспериментов. Категория почвогрунта II.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Среднее экспериментальное значение транспортной скорости легкого форвардера в зависимости от нагрузки находилось в пределах 4,14 – 7,12 м/с, минимальное значение в опытах составило 3,57 м/с, максимальное – 8,21 м/с. В том же диапазоне нагрузки теоретическое значение транспортной скорости изменяется в пределах от 4,07 до 7,07 м/с. Коэффициент вариации находился в пределах от 0,0924 до 0,1002.

Среднее экспериментальное значение глубины колеи после первого прохода легкого форвардера в зависимости от нагрузки находилось в пределах 2,75 – 5,78 см, минимальное значение в опытах составило 2,5 см, максимальное – 6,5 см. В том же диапазоне нагрузки теоретическое значение глу-

бины колеи после первого прохода изменяется в пределах от 3 до 6 см. Коэффициент вариации находился в пределах от 0,0755 до 0,1030.

Среднее экспериментальное значение глубины колеи после десяти проходов легкого форвардера в зависимости от нагрузки находилось в пределах 6,73 – 11,65 см, минимальное значение в опытах составило 6 см, максимальное – 14 см. В том же диапазоне нагрузки теоретическое значение глубины колеи после первого прохода изменяется в пределах от 7 до 12 см. Коэффициент вариации находился в пределах от 0,0977 до 0,1036.

Среднее экспериментальное значение транспортной скорости среднего форвардера в зависимости от нагрузки находилось в пределах 2,93 – 6,22 м/с, минимальное значение в опытах составило 2,55 м/с, максимальное – 7,21 м/с. В том же диапазоне нагрузки теоретическое значение транспортной скорости изменяется в пределах от 2,96 до 6,05 м/с. Коэффициент вариации находился в пределах от 0,0870 до 0,1068.

Среднее экспериментальное значение глубины колеи после первого прохода среднего форвардера в зависимости от нагрузки находилось в пределах 4,7 – 9,75 см, минимальное значение в опытах составило 4,5 см, максимальное – 11 см. В том же диапазоне нагрузки теоретическое значение глубины колеи после первого прохода изменяется в пределах от 5 до 10 см. Коэффициент вариации находился в пределах от 0,0636 до 0,0824.

Среднее экспериментальное значение глубины колеи после десяти проходов среднего форвардера в зависимости от нагрузки находилось в пределах 9,05 – 18,58 см, минимальное значение в опытах составило 7,5 см, максимальное – 20,5 см. В том же диапазоне нагрузки теоретическое значение глубины колеи после первого прохода изменяется в пределах от 9 до 19 см. Коэффициент вариации находился в пределах от 0,0695 до 0,0991.

Среднее экспериментальное значение транспортной скорости тяжелого форвардера в зависимости от нагрузки находилось в пределах 2,29 – 5,43 м/с, минимальное значение в опытах составило 1,92 м/с, максимальное – 6,33 м/с. В том же диапазоне нагрузки теоретическое значение транспортной скорости изменяется в пределах от 2,36 до 5,51 м/с. Коэффициент вариации находился в пределах от 0,0943 до 0,1055.

Среднее экспериментальное значение глубины колеи после первого прохода тяжелого форвардера в зависимости от нагрузки находилось в пределах 5,73 – 13,88 см, минимальное значение в опытах составило 5,5 см, максимальное – 15,5 см. В том же диапазоне нагрузки теоретическое значение глубины колеи после первого прохода изменяется в пределах от 6 до 14 см. Коэффициент вариации находился в пределах от 0,0445 до 0,0874.

Среднее экспериментальное значение глубины колеи после десяти проходов тяжелого форвардера в зависимости от нагрузки находилось в пределах 10,58 – 26,2 см, минимальное значение в опытах составило 9 см, максимальное – 31 см. В том же диапазоне нагрузки теоретическое значение глубины колеи после первого прохода изменяется в пределах от 11 до 27 см. Коэффициент вариации находился в пределах от 0,0850 до 0,1065.

Среднее экспериментальное значение транспортной скорости среднего форвардера с шинами шириной 0,8 м в зависимости от нагрузки находилось в пределах 3,93 – 7 м/с, минимальное значение в опытах составило 3,43 м/с, максимальное – 8,08 м/с. В том же диапазоне нагрузки теоретическое значение транспортной скорости изменяется в пределах от 3,87 до 6,94 м/с. Коэффициент вариации находился в пределах от 0,0802 до 0,1060.

Среднее экспериментальное значение глубины колеи после первого прохода среднего форвардера с шинами шириной 0,8 м в зависимости от нагрузки находилось в пределах 5,9 – 6,83 см, минимальное значение в опытах составило 5 см, максимальное – 8 см. В том же диапазоне нагрузки теоретическое значение глубины колеи после первого прохода изменяется в пределах от 4 до 7 см. Коэффициент вариации находился в пределах от 0,1008 до 0,1043.

Среднее экспериментальное значение глубины колеи после десяти проходов среднего форвардера с шинами шириной 0,8 м в зависимости от нагрузки находилось в пределах 7,8 – 14,13 см, минимальное значение в опытах составило 6,5 см, максимальное – 16 см. В том же диапазоне нагрузки теоретическое значение глубины колеи после первого прохода изменяется в пределах от 8 до 14 см. Коэффициент вариации находился в пределах от 0,0915 до 0,1048.

При расчете транспортной скорости теоретические результаты отличаются от экспериментальных значений на величину до – 2 % для легкого форвардера, до – 3 % для среднего форвардера, до – 5 % для тяжелого форвардера и до – 2 % для среднего форвардера с шинами шириной 0,8 м.

При расчете глубины колеи после первого прохода теоретические результаты отличаются от экспериментальных значений на величину до 10 % для легкого форвардера, до 7 % для среднего форвардера, до 5 % для тяжелого форвардера и до – 9 % для среднего форвардера с шинами шириной 0,8 м.

При расчете глубины колеи после десяти проходов теоретические результаты отличаются от экспериментальных значений на величину до – 5 % для легкого форвардера, до 5 % для среднего форвардера, до 4 % для тяжелого форвардера и до 7 % для среднего форвардера с шинами шириной 0,8 м.

Во всех опытах число наблюдений, требующееся для получения результатов с доверительной вероятностью 95 %, не превышало 20. Таким образом, можно заключить, что результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований удовлетворительно согласуются между собой.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

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

1. Составленная математическая модель процесса взаимодействия движителя колесного форвардера с почвогрунтом лесосеки, позволяет учесть в комплексе влияние почвенно-грунтовых условий, параметров колесного

двигателя, нагрузки и числа циклов ее приложения, на показатели сопротивления и сцепления двигателя с поверхностью. В рамках составленной модели физико-механические свойства лесного почвогрунта выражены через модуль деформации по выражениям (12) – (16). Основное уравнение, связывающее глубину колеи и давление представлено формулой (17), в которой вспомогательные коэффициенты, давление и площадь пятна контакта рассчитываются по формулам (18) – (24), несущая способность почвогрунта задана формулами (25) – (27). Сила сопротивления качению колеса, обусловленная сопротивлением почвогрунта, рассчитывается по формуле (30). Влияние числа проходов (числа осей форвардера) на показатели процесса оценивается по формулам (28), (29). Силу сцепления двигателя с почвогрунтом по (37) определяет допустимая нагрузка на грунт, ограниченная его несущей способностью по (32) – (40). Высота пороговой неровности, которую машина может преодолеть, рассчитывается по формулам (41), (42).

2. Установлено (таблица 3), что при работе на почвогрунтах I и II категории для всех типов форвардеров (легкий, средних и тяжелых) обеспечивается сила сцепления двигателя с поверхностью, достаточная для движения без пробуксовки. При шинах нормальной ширины на почвогрунтах III категории без пробуксовки могут работать легкие 3-осные форвардеры с 50%-ной загрузкой кузова, легкие 4-осные форвардеры с 50 и 75%-ной загрузкой кузова, а также средние форвардеры с 50%-ной загрузкой кузова. При шинах увеличенной ширины без пробуксовки могут перемещаться легкие 3-осные форвардеры с 50 и 75%-ной загрузкой кузова, а также средние форвардеры с 50%-ной загрузкой кузова, а также легкие 4-осные форвардеры с 50 и 75%-ной загрузкой кузова, средние с 50%-ной загрузкой кузова, тяжелые с 50%-ной загрузкой.

3. Установлено (таблица 4), что легкие, средние и тяжелые форвардеры даже при полной загрузке кузова не образуют колею глубже 0,1 м при работе на почвогрунтах I категории. При нормальной ширине шины на почвогрунтах II категории колея превышает 0,1 м при работе 3-осных средних форвардеров с загрузкой кузова 100 %, тяжелых форвардеров с загрузкой кузова более 75 %. При увеличенной ширине шины средние и тяжелые 3-осные форвардеры при загрузке кузова 100 % оставляют колею более 0,1 м, также как и 4-осные тяжелые форвардеры с шинами нормальной ширины при загрузке кузова 100 %.

4. Формула (43) позволяет на практике рассчитать коэффициент тяги, служащий для оценки проходимости колесного форвардера по условию достаточной силы сцепления с почвогрунтом, при варьировании грузоподъемности, коэффициента загрузки кузова, ширины колеса машины и модуля деформации почвогрунта. В сумме с уравнением (43), формула (42) может служить для оценки максимальной высоты неровности, которую может преодолеть форвардер при заданных условиях.

5. При помощи метода наименьших квадратов составлено уравнение ($R^2 = 0,9205$) для оценки глубины колеи после первого прохода форвардера,

формула (44). Формула (44) позволяет на практике оценить глубину колеи после первого прохода форвардера при варьировании грузоподъемности, коэффициента загрузки кузова, ширины колеса машины и модуля деформации почвогрунта. При заданном значении допустимой глубины колеи формула (44) может служить для подбора коэффициента загрузки форвардера исходя из его максимальной грузоподъемности, ширины колеса и модуля деформации почвогрунта.

6. При расчете транспортной скорости теоретические результаты отличаются от экспериментальных значений на величину до – 2 % для легкого форвардера, до – 3 % для среднего форвардера, до – 5 % для тяжелого форвардера и до – 2 % для среднего форвардера с шинами шириной 0,8 м. При расчете глубины колеи после первого прохода теоретические результаты отличаются от экспериментальных значений на величину до 10 % для легкого форвардера, до 7 % для среднего форвардера, до 5 % для тяжелого форвардера и до – 9 % для среднего форвардера с шинами шириной 0,8 м. При расчете глубины колеи после десяти проходов теоретические результаты отличаются от экспериментальных значений на величину до – 5 % для легкого форвардера, до 5 % для среднего форвардера, до 4 % для тяжелого форвардера и до 7 % для среднего форвардера с шинами шириной 0,8 м. Таким образом, можно заключить, что результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований удовлетворительно согласуются между собой.

Основное содержание диссертационного исследования опубликовано в следующих печатных работах:

1. Божбов В.Е., Калистратов А.В., Степанищева М.В. Исследование модуля деформации лесной почвы в сосновых древостоях с учетом действия боковых корней. Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 187-190.
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. 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.
4. Божбов В. Е., Никифорова А. И., Григорьев Г. В., Дмитриева И. Н. Обзор состояния вопроса и перспективных направлений исследований процессов взаимодействия лесных машин с почвогрунтами лесосек. Материалы РНПК «Наука, образование, инновации в приграничном регионе». Петрозаводск, 2015. С. 18 – 20.
5. 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.