

Задача оптимизации шага грунтозацепов гусеничных лесных машин для чувствительных почвогрунтов

Д.В. Болотин^{1a}, М.А. Кокшаров^{2b}, А.Ю. Жук^{2c}, А.В. Андронов^{1d}

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, пер. Институтский, 5У, г. Санкт-Петербург, Россия

² Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, г. Братск, России

^a bolotin97@internet.ru, ^b maksont_koksharov@mail.ru, ^c ftslk@brstu.ru, ^d andronovalexandr@gmail.com

^a <https://orcid.org/0009-0008-4015-9661>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1708-7873>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-1035-9231>

Статья поступила 16.01.2026, принята 05.02.2026

Статья посвящена вопросу обоснования шага грунтозацепов гусеничных лесных машин, максимизирующего сцепление при предотвращении среза чувствительного почвогрунта. Результаты получены на основе вычислительного эксперимента с уточнённой математической моделью, учитывающей нелинейную функцию сцепления от сдвига и буксования. Согласно полученным расчётным данным, для гусеничных движителей со средним давлением на почвогрунт 0,025 МПа оптимальное значение шага грунтозацепов составляет 0,306–0,336; при этом прогнозируется коэффициент сцепления 0,32 для случая работы на слабонесущих лесных почвогрунтах и 0,49 и 0,79 для почвогрунтов средней прочности и прочных соответственно; расчётное среднее значение коэффициента буксования на допустимом отрезке, не приводящее к срезу чувствительной почвы, составляет 0,035–0,042. Для гусеничных движителей со средним давлением на почвогрунт 0,045 МПа оптимальное значение шага грунтозацепов составляет 0,241–0,299; при этом прогнозируется коэффициент сцепления 0,25 для случая работы на слабонесущих лесных почвогрунтах и 0,36 и 0,60 для почвогрунтов средней прочности и прочных соответственно; расчётное среднее значение коэффициента буксования составляет 0,051–0,053. Для гусеничных движителей со средним давлением на почвогрунт 0,065 МПа оптимальное значение шага грунтозацепов составляет 0,185–0,268; при этом прогнозируется коэффициент сцепления 0,23 для случая работы на слабонесущих лесных почвогрунтах и 0,31 и 0,48 для почвогрунтов средней прочности и прочных соответственно; расчётное среднее значение коэффициента буксования составляет 0,058–0,067. Для практических расчётов при заданных значениях среднего давления и несущей способности почвогрунта получена квадратичная функция оптимального шага грунтозацепов от среднего давления движителя и несущей способности почвогрунта.

Ключевые слова: коэффициент сцепления; коэффициент буксования; сдвиг; срез почвы; давление на грунт.

Problem of optimizing the lug pitch of tracked forestry machines for sensitive soils

D.V. Bolotin^{1a}, M.A. Koksharov^{2b}, A.Yu. Zhuk^{2c}, A.V. Andronov^{1d}

¹ St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov; 5U, Institutsky Lane, St. Petersburg, Russia

² Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^a bolotin97@internet.ru, ^b maksont_koksharov@mail.ru, ^c ftslk@brstu.ru, ^d andronovalexandr@gmail.com

^a <https://orcid.org/0009-0008-4015-9661>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1708-7873>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-1035-9231>

Received 16.01.2026, accepted 05.02.2026

The article examines the rationale for the lug pitch of tracked forestry vehicles, maximizing traction while preventing shear of sensitive soil. The results are obtained on the basis of a computational experiment with a refined mathematical model that takes into account the nonlinear function of adhesion from shear and slip. According to the obtained calculation data, for tracked drives with an average pressure on the soil of 0,025 MPa, the optimal value of the lug pitch is 0,306–0,336; while the predicted adhesion coefficient is 0,32 for the case of operation on weak-bearing forest soils and 0,49 and 0,79 for medium-strength and strong soils, respectively; the calculated average value of the slip coefficient on the permissible segment, which does not lead to shear of sensitive soil, is 0,035–0,042. For tracked drives with an average pressure on the soil of 0,045 MPa, the optimal value of the lug pitch is 0,241–0,299. The predicted adhesion coefficient is 0,25 for operation on soft forest soils and 0,36 and 0,60 for medium-strength and strong soils, respectively; the calculated average value of the slip coefficient is 0,051–0,053. For tracked drives with an average ground pressure of 0,065 MPa, the optimal lug pitch is 0,185–0,268; the predicted adhesion coefficient is 0,23 for operation on soft forest soils and 0,31 and 0,48 for medium-strength and strong soils, respectively; the calculated average value of the slip coefficient is 0,058–0,067. For practical calculations with given values of average pressure and bearing capacity of the soil, a quadratic function of the optimal lug pitch from the average pressure of the propeller and the bearing capacity of the soil is obtained.

Keywords: net thrust coefficient; slip coefficient; shear; soil shear; ground pressure.

Введение. Гусеничные лесные машины широко распространены в нашей стране и используются для выполнения самых разнообразных видов лесозаготовительных и лесохозяйственных работ. Представлены образцы гусеничных машин, хорошо зарекомендовавшие себя в сложных почвенно-грунтовых условиях, отличающиеся повышенной, по сравнению с колёсными машинами, проходимостью и в меньшей степени повреждающие чувствительную лесную почву [1]. Отечественная научная и конструкторская школа предложила множество вариантов перспективных образцов гусеничной лесной техники, велись и продолжают вестись исследования в области обоснования оптимальных параметров движителей машин, совместимых с природно-производственными условиями [2, 3].

Разработаны и исследованы математические модели, прогнозирующие колееобразование и тягово-сцепные свойства движителей лесных машин при работе на лесных почвогрунтах, а также на снегу [3, 4]. Представлены разработки в области моделирования сцепления движителей с почвогрунтами склонов [5–7], прошедшие верификацию [8], что особенно важно в контексте предотвращения среза чувствительных почвогрунтов. Известные математические модели, как правило, используют линейное выражение сдвиговой деформации от коэффициента буксования [2, 3]. За рубежом также распространены линейные модели сдвига [9, 10]. При этом отмечено, что это не позволяет в полной мере учесть влияние шага грунтозацепа и коэффициента буксования на оценку сцепных свойств гусеничного движителя [2, 3, 11–15]. Однако, в рамках научной школы «Инновационные разработки в лесном хозяйстве» (АГАТУ), был представлен уточнённый подход [16] в оценке напряжения сдвига с учётом нелинейности. Подход сравнительно нов, и наша статья посвящена вопросу обоснования оптимального шага грунтозацепов гусеничных лесных машин на основе вычислительного эксперимента с уточнённой моделью [16], учитывающей нелинейную функцию сцепления от сдвига и буксования.

Материалы и методы исследования. В статье реализуется модель [16], составленная с учётом физической картины распространения сдвиговой деформации, вызванной касательным воздействием движителя, с затуханием по длине пятна контакта. Реализация математической модели и получение практических зависимостей выполнены на основе компьютерного моделирования и вычислительных экспериментов; при обработке полученных данных использованы методы приближения функций.

Постановка задачи. Для пояснения сути проводимой работы кратко изложим теоретические положения, введённые ранее в работе [16]. Выражение для коэффициента сцепления μ общеизвестно:

$$\mu = \frac{b}{w} \int_0^l \tau(x) dx, \quad (1)$$

где w – вес единичного движителя гусеничной машины, x – продольная координата, b , l – ширина и длина пятна контакта, τ – касательное напряжение.

Важно, что в большинстве случаев ранее функция касательного напряжения составлялась относительно линейного выражения деформации сдвига:

$$j = Sx, \quad (2)$$

но при этом известно, что затухание напряжений в грунте описывается нелинейными зависимостями. Например, затухание нормального напряжения σ по глубине массива грунта z :

$$\sigma = \frac{Jp}{1 + \left(\frac{z}{ab}\right)^2}, \quad (3)$$

где J , a – коэффициенты, учитывающие геометрические параметры пятна контакта и толщину деформируемого слоя грунта:

$$J = \frac{0,03 + \frac{b}{l}}{0,43 + 0,6 \frac{b'}{l}}, \quad (4)$$

$$a = 0,64 \left(1 + \frac{b}{H}\right), \quad (5)$$

где H – толщина деформируемого слоя почвогрунта.

В рассматриваемом случае использованы следующие соображения (схема на рис. 1).

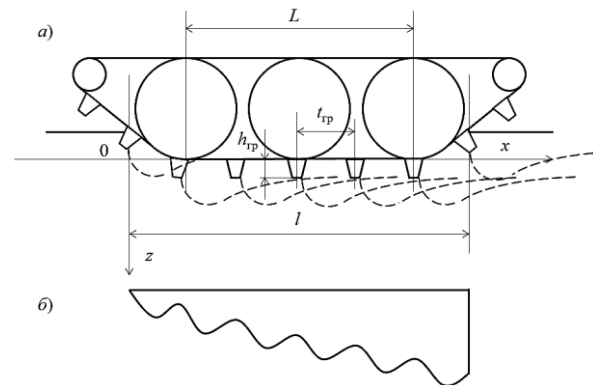


Рис. 1. Схема к модификации функции сдвиговой деформации с учётом затухания по горизонтальной оси: *a* – затухающие сдвиговые деформации, вызванные касательным воздействием грунтозацепов (пунктир); *б* – эпюра суммарной деформации сдвига почвогрунта [16]

В модификации [16] выдвигается положение, что деформация сдвига, вызванного воздействием i -го грунтозацепа, определяется не по линейной зависимости (2), а с коэффициентом затухания по формуле [16]:

$$j_i = \zeta_i S \cdot (x - i \cdot t_{гр})(x - i \cdot t_{гр})_+ \quad (6)$$

где ζ_i – коэффициент, учитывающий затухание деформации вдоль пятна контакта, i – индекс, соответствующий порядковому номеру грунтозацепа, участвующего в контакте движителя с почвогрунтом, и отсчитываемый вдоль пятна контакта, $i = 0 \dots N - 1$ ($i = 0$ для первого грунтозацепа, $i = N - 1$ для последнего), N – число грунтозацепов, участвующих в контакте движителя с почвогрунтом, целая часть отношения:

$$N = \left\lceil \frac{t_{гр}}{l} \right\rceil. \quad (7)$$

Коэффициент затухания для касательного напряжения вводится по аналогии со случаем, рассмотренным при изучении глубины образующей колеи, для i -го грунтозацепа [16]:

$$\zeta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - i \cdot t_{гр}}{ab}\right)^2}. \quad (8)$$

Для деформации сдвига, вызванной воздействием i -го грунтозацепа [16]:

$$j_i = S \frac{x - i \cdot t_{гр}}{1 + \left(\frac{x - i \cdot t_{гр}}{ab}\right)^2} (x - i \cdot t_{гр})_+ \quad (9)$$

Для гусеничного движителя возможно принять $H \gg b$, тогда [16]:

$$\zeta_i = \frac{J^*}{1 + \left(\frac{x - i \cdot t_{гр}}{0.64b}\right)^2} \quad (10)$$

$$j_i = S \frac{x - i \cdot t_{гр}}{1 + \left(\frac{x - i \cdot t_{гр}}{0.64b}\right)^2} (x - i \cdot t_{гр})_+ \quad (11)$$

В формулах (9), (11) функция $(\theta)_+$ как индикатор учитывает координату i -го грунтозацепа вдоль пятна контакта, то есть координату, соответствующую началу воздействия i -го грунтозацепа на почвогрунт.

Функция сдвиговой деформации находится как сумма деформаций, вызванных каждым из грунтозацепов, с учётом затухания:

$$j = \sum_{i=0}^{N-1} j_i. \quad (12)$$

На рис. 2 показано изменение сдвиговой деформации, вызванной воздействием i -го грунтозацепа движителя, по координате x вдоль пятна контакта. Пример рассчитан при $t_{гр} = 0,2032$ м, $B = 0,61$ м, $L = 3,81$ м, $S = 0,05$ при свойствах почвогрунта по табл. 1.

Таблица 1. Сдвиговые свойства лесного почвогрунта по категориям прочности [3, 17, 18]

Категория	C , МПа	φ , °	G , МПа
I (прочный)	0,0252	16,7	2,77
II (средн.прочности)	0,0108	13,7	2,44
III (слабонесущий)	0,0053	11,6	2,19

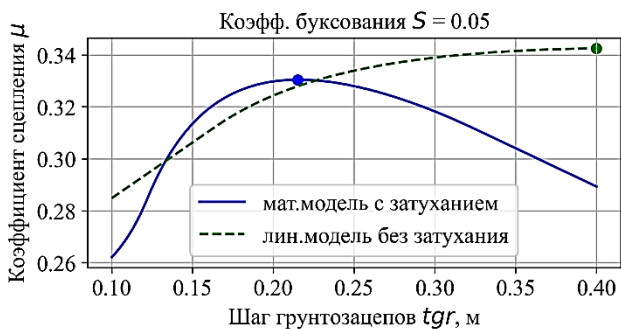


Рис. 2. Коэффициент сцепления при варьировании шага грунтозацепов (лесной почвогрунт средней прочности)

Важным различием линейной и модифицированной модели является то обстоятельство, что, по мере увеличения шага $t_{гр}$, оценки μ , полученные без учёта затухания с использованием формулы (2), монотонно возрастают в рассмотренных границах шага $t_{гр}$. Таким образом, для параметра $t_{гр}$ последовала бы рекомендация о максимально возможном его увеличении.

Результаты, полученные с использованием предложенных в [16] формул (10)–(12), учитывающих затухание сдвиговых деформаций в почвогрунте, позволяют выделить диапазоны изменения $t_{гр}$, в которых отмечаются максимальные расчётные значения μ . Например, при коэффициенте буксования $S = 0,05$, максимум μ наблюдается при $t_{гр}$ в пределах 0,20 – 0,25 м. Таким образом, введение в математическую модель выражения, учитывающего затухание, позволило раскрыть качественно иначе характер функции $\mu(t_{гр})$ и отметить оптимальную область значений $t_{гр}$.

Однако, коэффициент буксования S рассматривается, как правило, как входной параметр математической модели. При этом на практике он не является управляемым параметром. По определению, коэффициент буксования S характеризует долю потери скорости машины, а в выражении касательного напряжения τ , через связь с деформацией j – характеризует сопротивление почвогрунта сдвигу и, как следствие, сцепление по формулам (1). В определённом смысле коэффициент буксования S можно рассматривать как своего рода «меру ответной реакции» грунта на касательное напряжение, вызванное движителем, преодолевающим сопротивление движению. Тем не менее, буксование может быть обусловлено конструктивными параметрами движителя и его эксплуатационными свойствами, и притом – с учётом особенностей трассы движения. Фактическое значение S в таком случае будет не только «ответной реакцией» почвогрунта, но и функцией иных факторов, что, в свою очередь, скажется на сцеплении μ . В этой связи, авторам настоящей статьи представляется целесообразным вместо теоретического значения μ воспользоваться его усреднённой оценкой в некотором диапазоне изменения S , например, по формуле среднего функции:

$$\bar{\mu} = \frac{1}{S_{max} - S_{min}} \int_{S_{min}}^{S_{max}} \mu(S) dS \quad (13)$$

причём по физическому смыслу в контексте нашего исследования $S_{min} = 0$, а значение S_{max} следует принять на уровне, соответствующем срезу – в таком случае верхняя граница будет отражать требование экологичности движителя [2, 3]. Таким образом, будет намечен «рабочий» диапазон изменения буксования, в котором, при обеспечении проходимости, и будет находиться оценка коэффициента сцепления $\bar{\mu}$, передающая сцепные свойства почвогрунта и особенности движения лесной машины по нему с учётом требования о предотвращении среза.

Результаты исследования. В рамках вычислительного эксперимента исследуем функцию коэффициента сцепления $\mu(\text{var})$, в связи с чем вначале проиллюстриру-

ем результаты расчётов для двух случаев: почвогрунт средней прочности при $p = 0,0724$ МПа, чувстви-

тельный слабонесущий почвогрунт при $p = 0,0415$ МПа. Результаты приведены на рис. 3, 4.

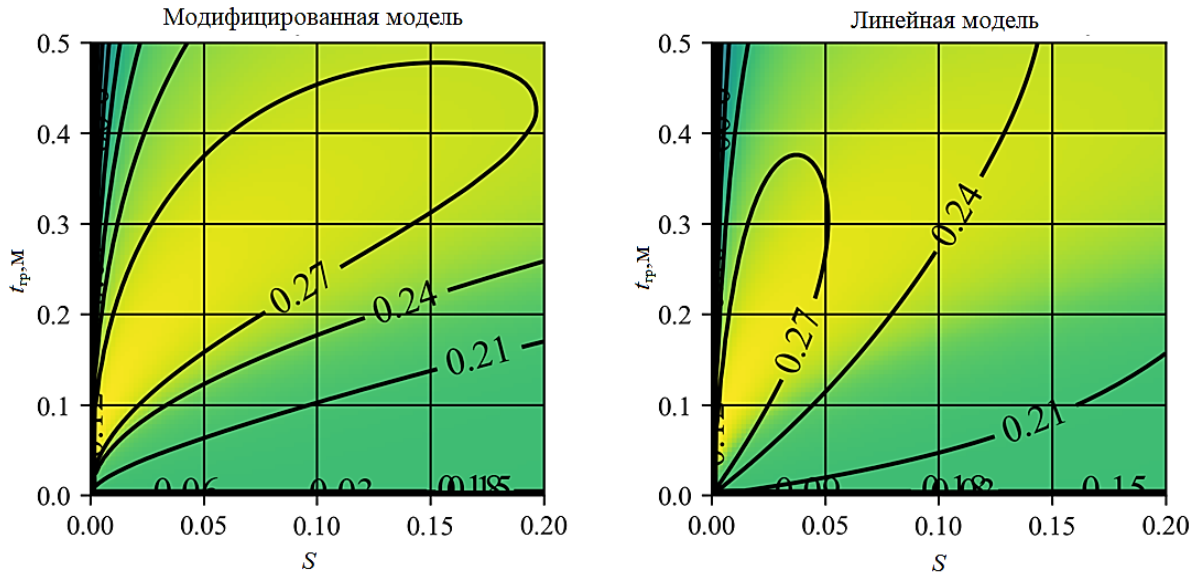


Рис. 3. Линии уровня коэффициента сцепления в зависимости от шага грунтозацепов и буксования, слабонесущий лесной почвогрунт

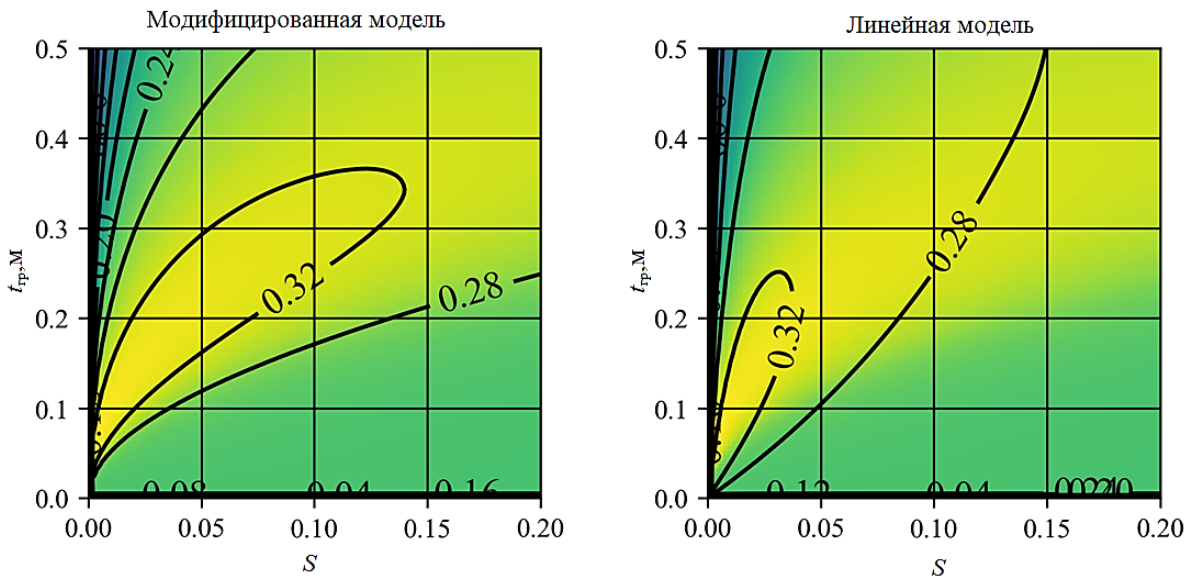


Рис. 4. Линии уровня коэффициента сцепления в зависимости от шага грунтозацепов и буксования, лесной почвогрунт средней прочности

Из приведённых результатов видно, что области максимума μ соответствуют различные сочетания значения шага $t_{гр}$ и коэффициента S , причём области связаны с физико-механическими свойствами почвогрунта (определяются категорией, что видно из сравнения рис. 3, 4), а также по структуре математической модели с параметрами движителя b, l, p .

При каждом значении шага грунтозацепов, рассматриваемом в вычислительном эксперименте, найдём оценку $\bar{\mu}$ по (13) и сопоставим полученные результаты с заданными значениями шага $t_{гр}$. Пример представлен на рис. 5, 6.

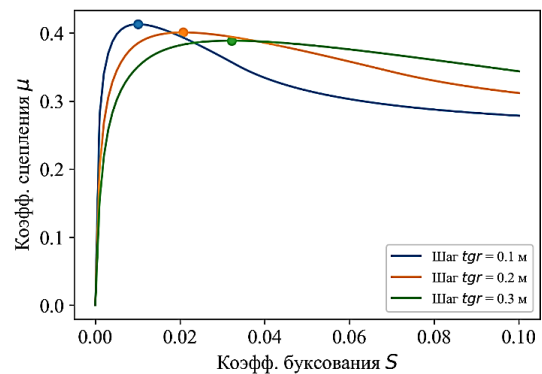


Рис. 5. Пример расчёта коэффициента сцепления по предлагаемой модели

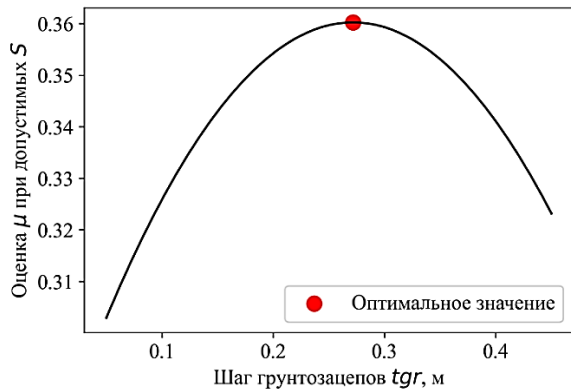


Рис. 6. Пример определения оптимального шага по оценке коэффициента сцепления на допустимом интервале варьирования буксования (почвогрунт средней прочности, давление 0,045 МПа)

Аналогичные расчёты повторим при всех оставшихся сочетаниях категорий почвогрунта и класса тяжести гусеничных лесных машин, в результате вычислительного эксперимента получим расчётные значения оптимального шага грунтозацепов, приведенные в табл. 2. Непосредственно оценки коэффициента сцепления $\bar{\mu}$ по (13) при оптимальном шаге приведены в табл. 3.

Таблица 2. Расчётные значения оптимального шага грунтозацепов (максимизация среднего значения коэффициента сцепления на допустимом интервале варьирования буксования)

Почвогрунт / Класс машины	Тяжёлый (А) $p = 0,065$ МПа	Средний (В) $p = 0,045$ МПа	Легкий (С) $p = 0,025$ МПа
Прочный (I)	0,268	0,299	0,336
Средний (II)	0,235	0,276	0,328
Слабонесущий (III)	0,185	0,241	0,306

Таблица 3. Расчётные средние значения коэффициента сцепления при оптимальном шаге грунтозацепов гусеничного движителя

Почвогрунт / Класс машины	Тяжёлый (А) $p = 0,065$ МПа	Средний (В) $p = 0,045$ МПа	Легкий (С) $p = 0,025$ МПа
Прочный (I)	0,48	0,60	0,79
Средний (II)	0,31	0,36	0,49
Слабонесущий (III)	0,23	0,25	0,32

В табл. 4 указаны средние значения коэффициента буксования на допустимом отрезке варьирования, которые могут использоваться в практических расчётах.

Таблица 4. Средние значения коэффициента буксования на допустимом отрезке варьирования

Почвогрунт / Класс машины	Тяжёлый (А) $p = 0,065$ МПа	Средний (В) $p = 0,045$ МПа	Легкий (С) $p = 0,025$ МПа
Прочный (I)	0,058	0,051	0,042
Средний (II)	0,060	0,051	0,036
Слабонесущий (III)	0,067	0,053	0,035

Для практического применения получим формулу, приближающую данные табл. 2:

$$t_{гр}^* = 0,334 - 3,10p + 0,939p_S + 6,15p_S p + 3,29p_S^2 \quad (14)$$

В формуле используется значение несущей способности почвогрунта p_S в качестве интегрального показателя прочности по [19, 20], что на практике удобнее, чем использование нескольких характеристик сцепных и фрикционных свойств почвогрунта. Сходимость результатов расчётов по формуле (14) с данными вычислительного эксперимента удовлетворительна, что иллюстрирует рис. 7.

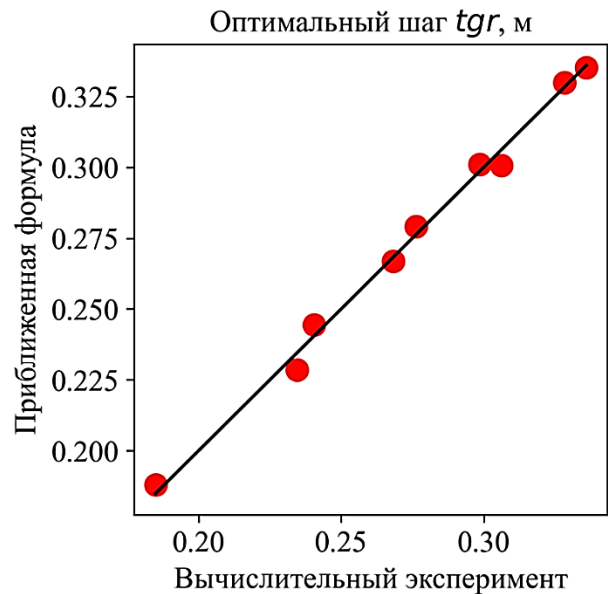


Рис. 7. Сходимость результатов вычислительного эксперимента и расчётов по приближенной практической формуле (13)

Дополнительной иллюстрацией функции оптимального шага грунтозацепов $t_{гр}^*$ от физико-механических свойств почвогрунта (несущей способности p_S) и среднего давления гусеничного движителя p служит рис. 8.

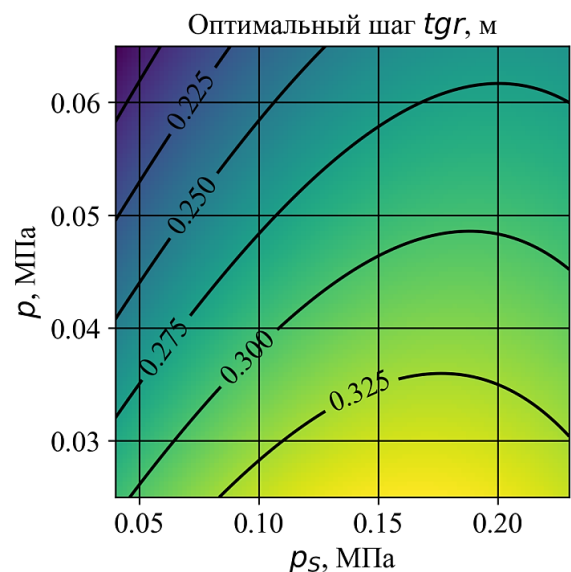


Рис. 8. Оптимальный шаг грунтозацепов гусеничного движителя лесной машины в зависимости от среднего давления по пятну контакта и несущей способности почвогрунта

Заключение. В результате выполненных исследований сделаны следующие основные выводы:

1. На основе результатов анализа численного интегрирования (13) сформулирована задача оптимизации и реализован вычислительный эксперимент, в результате которого установлена нелинейная связь оптимального расчётного значения шага грунтозацепа с физико-механическими свойствами почвогрунта и параметрами воздействия на него гусеничного движителя.

2. Согласно полученным расчётным данным, для гусеничных движителей со средним давлением на почвогрунт 0,025 МПа оптимальное значение шага грунтозацепов составляет 0,306–0,336; при этом прогнозируется коэффициент сцепления 0,32 для случая работы на слабонесущих лесных почвогрунтах и 0,49 и 0,79 для почвогрунтов средней прочности и прочных соответственно; расчётное среднее значение коэффициента буксования на допустимом отрезке, не приводящее к срезу почвы, составляет 0,035–0,042.

3. Для гусеничных движителей со средним давлением на почвогрунт 0,045 МПа оптимальное значение шага грунтозацепов составляет 0,241–0,299; при этом прогнозируется коэффициент сцепления 0,25 для случая работы на слабонесущих лесных почвогрунтах и 0,36

и 0,60 для почвогрунтов средней прочности и прочных соответственно; расчётное среднее значение коэффициента буксования составляет 0,051–0,053.

4. Для гусеничных движителей со средним давлением на почвогрунт 0,065 МПа оптимальное значение шага грунтозацепов составляет 0,185–0,268; при этом прогнозируется коэффициент сцепления 0,23 для случая работы на слабонесущих лесных почвогрунтах и 0,31 и 0,48 для почвогрунтов средней прочности и прочных соответственно; расчётное среднее значение коэффициента буксования составляет 0,058–0,067.

5. Для практических расчётов при заданных значениях среднего давления и несущей способности почвогрунта получена квадратичная функция оптимального шага грунтозацепов от среднего давления движителя и несущей способности почвогрунта (14) (рис. 8). Анализ расчётных данных показывает, что представленная модель и результаты вычислительного эксперимента позволяют получить числовые оценки функции коэффициента сцепления и, после экспериментальной проверки, могут в этой связи рассматриваться как основа для рекомендаций по улучшению эксплуатационных показателей гусеничных движителей лесных машин.

Литература

- Hertz E., Guriev A., Druzyanova V., Revyako S., Markov O., Perfiliev P., Grigorev I. Impact assessment of different propulsion systems in forestry machinery on soil properties // *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2024. Т. 11. № 1. С. 133–140.
- Дьяченко В.М., Должиков И.С., Хитров Е.Г., Куницкая О.А., Барышникова Е.В., Анисимов Е.Е. Теоретическое обоснование тягово-сцепных свойств гусеничного движителя лесной машины для условий многолетней мерзлоты // *Resources and Technology*. 2025. Т. 22. № 1. С. 1–41.
- Khakhina A.M., Grigorev I.V., Dolmatov N.P., Makuev V.A., Kruchinin I.N., Storodubtseva T.N., Burgonutdinov A.M., Markov O.B. Predicting the passability of wheeled tractors // *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2022. Т. 9. № 5. С. 1233–1242.
- Шапиро В.Я., Новиков М.С., Григорьев И.В., Перфильев П.Н., Тихонов Е.А., Друзьянова В.П. Оценка работоспособности трасс движения лесных машин на склоне оттаивающего почвогрунта с учётом маневрирования движителя // *Хвойные бореальной зоны*. 2025. Т. 43. № 2. С. 77–84.
- До Т.А., Злобина Н.И., Каляшов В.А., Гурьев А.Ю., Григорьева О.И., Хитров Е.Г. Теоретические исследования влияния угла склона на несущую способность почвогрунта при работе лесных машин // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2022. № 2. С. 18–27.
- Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Рыжов Я.А., Тихонов Е.А., Перфильев П.Н., Египко С.В. Моделирование влияния буксования движителей на устойчивость лесных машин при маневрировании на слабонесущих склонах // *Лесотехнический журнал*. 2025. Т. 15. № 4 (60). С. 421–436.
- До Т.А., Григорьев Г.В., Каляшов В.А., Гурьев А.Ю., Григорьева О.И., Хитров Е.Г. Теоретические исследования работы лесных машин с гусеничным движителем на склонах // *Resources and Technology*. 2022. Т. 19. № 3. С. 1–29.
- До Т.А., Григорьев Г.В., Каляшов В.А., Новгородов Д.В., Григорьева О.И., Хитров Е.Г. Методика и результаты экспериментальных исследований воздействия лесных машин с гусеничным движителем на почвогрунты на склонах // *Resources and Technology*. 2022. Т. 19. № 4. С. 64–84.
- Wong J.Y. Terramechanics and off-road vehicle engineering // 2010.
- Pedersen S.L. Model of contact between rollers and sprockets in chain-drive systems // *Archive of Applied Mechanics (Ingenieur Archiv)*. 2005. Т. 74. № 7. С. 489–508.
- Grazioso A., di Maria E., Giannoccaro N.I., Ishii K. Multi-body modeling of a new wheel/track reconfigurable locomotion system for a small farming vehicle // *Machines*. 2022. Т. 10. № 12. С. 1117.
- Lankarani H.M., Nikravesh P.E. Continuous contact force models for impact analysis in multibody systems // *Nonlinear Dynamics*. 1994. Т. 5. № 2. С. 193–207.
- Mocera F., Somà A., Nicolini A. Grousers effect in tracked vehicle multibody dynamics with deformable terrain contact model // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020. Т. 10. № 18. С. 6581.
- Ma Zh., Perkins N.C. A super-element of track-wheel-terrain interaction for dynamic simulation of tracked vehicles // *Multibody System Dynamics*. 2006. Т. 15. № 4. С. 347–368.
- Wong J.Y., Preston-Thomas J. On the characterization of the shear stress-displacement relationship of terrain // *Journal of Terramechanics*. 1983. Т. 19. № 4. С. 225–234.
- Хитров Е.Г., Должиков И.С., Куницкая О.А., Друзьянова В.П., Болотин Д.В., Андронов А.В. Моделирование процесса сцепления движителя с почвогрунтом с учетом шага грунтозацепов // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2024. № 6 (402). С. 147–159.
- Grigorev I., Kunickaya O., Tikhonov E., Hertz E., Druzyanova V., Timokhova O., Ivanov V., Kruchinin I. Dynamic impact of wheeled skidders on forest soil in felling areas // *Journal of Terramechanics*. 2022. Т. 101. С. 1–9.
- Grigorev I., Burgonutdinov A., Makuev V., Tikhonov E., Shvetsova V., Timokhova O., Revyako S., Dmitrieva N. The theoretical modeling of the dynamic compaction process of forest soil // *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2022. Т. 19. № 3. С. 2935–2949.
- Дмитриев А.С., Должиков И.С., Куницкая О.А., Дьяченко В.М., Хитров Е.Г., Кривошеев А.А. Результаты вычислительного эксперимента по определению оптимальных

параметров и показателей работы колёсно-гусеничного движителя лесной машины // Resources and Technology. 2024. Т. 21. № 4. С. 1–43.

20. Зорин М.В., Петросян С.С., Куницкая О.А., Макуев В.А., Долматов Н.П., Григорьев И.В., Хитров Е.Г. Исследование максимальной оценки коэффициента сцепления движителя с опорной поверхностью // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. № 239. С. 191–201.

References

- Hertz E., Guriev A., Druzyanova V., Revyako S., Markov O., Perfiliev P., Grigorev I. Impact assessment of different propulsion systems in forestry machinery on soil properties // Mathematical Modeling of Engineering Problems. 2024. Vol. 11. No. 1. pp. 133–140.
- Dyachenko V.M., Dolzhikov I.S., Khitrov E.G., Kunitskaya O.A., Baryshnikova E.V., Anisimov E.E. Theoretical substantiation of the traction properties of a forestry machine tracked mover for permafrost conditions // Resources and Technology. 2025. Vol. 22. No. 1. pp. 1–41.
- Khakhina A.M., Grigorev I.V., Dolmatov N.P., Makuev V.A., Kruchinin I.N., Storodubtseva T.N., Burgonutdinov A.M., Markov O.B. Predicting the passability of wheeled tractors // Mathematical Modeling of Engineering Problems. 2022. Vol. 9. No. 5. pp. 1233–1242.
- Shapiro V.Ya., Novikov M.S., Grigoriev I.V., Perfil'ev P.N., Tikhonov E.A., Druz'yanova V.P. Evaluation of the Performance of Forest Machine Routes on a Thawing Soil Slope Taking into Account the Propeller Maneuvering // Conifers of the Boreal Zone. 2025. Vol. 43. No. 2. pp. 77–84.
- Do T.A., Zlobina N.I., Kalyashov V.A., Guryev A.Yu., Grigorieva O.I., Khitrov E.G. Theoretical studies of the influence of slope angle on the bearing capacity of soil during forestry machine operation // Woodworking industry. 2022. No. 2. pp. 18–27.
- Shapiro V.Ya., Grigoriev I.V., Ryzhov Ya.A., Tikhonov E.A., Perfil'ev P.N., Egipko S.V. Modeling the Impact of Propeller Slip on the Stability of Forest Machines When Maneuvering on Weak Slopes // Forest Engineering Journal. 2025. Vol. 15. No. 4 (60). pp. 421–436.
- Do T.A., Grigoriev G.V., Kalyashov V.A., Guryev A.Yu., Grigorieva O.I., Khitrov E.G. Theoretical studies of the operation of forestry machines with caterpillar drives on slopes // Resources and Technology. 2022. Vol. 19. No. 3. pp. 1–29.
- Do T.A., Grigoriev G.V., Kalyashov V.A., Novgorodov D.V., Grigorieva O.I., Khitrov E.G. Methodology and results of experimental studies of the impact of forestry machines with caterpillar drives on soils on slopes // Resources and Technology. 2022. Vol. 19. No. 4. pp. 64–84.
- Wong J.Y. Terramechanics and off-road vehicle engineering // 2010.
- Pedersen S.L. Model of contact between rollers and sprockets in chain-drive systems // Archive of Applied Mechanics (Ingenieur Archiv). 2005. T. 74. No. 7. P. 489–508.
- Grazioso A., di Maria E., Giannoccaro N.I., Ishii K. Multi-body modeling of a new wheel/track reconfigurable locomotion system for a small farming vehicle // Machines. 2022. T. 10. No. 12. P. 1117.
- Lankarani H.M., Nikravesh P.E. Continuous contact force models for impact analysis in multibody systems // Nonlinear Dynamics. 1994. T. 5. No. 2. P. 193–207.
- Mocera F., Somà A., Nicolini A. Grousers effect in tracked vehicle multibody dynamics with deformable terrain contact model // Applied Sciences (Switzerland). 2020. Vol. 10. No. 18. P. 6581.
- Ma Zh., Perkins N.C. A super-element of track-wheel-terrain interaction for dynamic simulation of tracked vehicles // Multibody System Dynamics. 2006. T. 15. No. 4. P. 347–368.
- Wong J.Y., Preston-Thomas J. On the characterization of the shear stress-displacement relationship of terrain // Journal of Terramechanics. 1983. T. 19. No. 4. P. 225–234.
- Khitrov E.G., Dolzhikov I.S., Kunitskaya O.A., Druzyanova V.P., Bolotin D.V., Andronov A.V. Modeling the process of adhesion of a propeller to soil taking into account the pitch of the lugs // News of higher educational institutions. Forestry journal. 2024. No. 6 (402). Pp. 147–159.
- Grigorev I., Kunickaya O., Tikhonov E., Hertz E., Druzyanova V., Timokhova O., Ivanov V., Kruchinin I. Dynamic impact of wheeled skidders on forest soil in felling areas // Journal of Terramechanics. 2022. Vol. 101. Pp. 1–9.
- Grigorev I., Burgonutdinov A., Makuev V., Tikhonov E., Shvetsova V., Timokhova O., Revyako S., Dmitrieva N. The theoretical modeling of the dynamic compaction process of forest soil // Mathematical Biosciences and Engineering. 2022. Vol. 19. No. 3. pp. 2935–2949.
- Dmitriev A.S., Dolzhikov I.S., Kunitskaya O.A., Dyachenko V.M., Khitrov E.G., Krivosheev A.A. Results of a computational experiment to determine the optimal parameters and performance indicators of a wheeled-tracked drive of a forestry machine // Resources and Technology. 2024. Vol. 21. No. 4. pp. 1–43.
- Zorin M.V., Petrosyan S.S., Kunitskaya O.A., Makuev V.A., Dolmatov N.P., Grigoriev I.V., Khitrov E.G. Study of the maximum estimate of the coefficient of adhesion of the propeller to the supporting surface // Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy. 2022. No. 239. pp. 191–201.