

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8004

УДК 630*

Статья

Экспериментальные исследования воздействия колёсно-гусеничного движителя на лесные почвогрунты

Дмитриев Александр Сергеевич

ассистент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Российская Федерация), dmitriev.nauka@mail.ru

Должиков Илья Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Российская Федерация), idolzhikov222@mail.ru

Куницкая Ольга Анатольевна

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), ola.ola07@mail.ru

Дьяченко Владимир Михайлович

аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна (Российская Федерация), Volodya.Dyachenko1986@mail.ru

Гурьев Александр Юрьевич

аспирант, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), furijager96@gmail.com

Кривошеев Андрей Александрович

аспирант, Ухтинский государственный технический университет (Российская Федерация), ugtukrivosheev@mail.ru

Получена: 28 июня 2024 / Принята: 1 апреля 2025 / Опубликовано: 11 апреля 2025

Аннотация: Экспериментальные исследования выполнены в лабораторных условиях на кафедре «Технология и оборудование лесного комплекса» Арктического государственного агротехнологического университета. Методика их проведения, в целом, сформировалась в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства». Эксперименты проведены на лабораторном стенде для двух

типов штампов, являвшихся лабораторными моделями колёсного и гусеничного движителей комбинированной (колёсно-гусеничной) лесной машины. Задачей экспериментальных исследования являлась проверка: уточнённой теоретической зависимости прочности почвогрунта при вдавливании зонда от модуля деформации, предлагаемой для определения характеристик почвогрунта в полевых условиях; функции несущей способности почвогрунта при образовании колеи глубиной $h = 0,2$ м от модуля деформации почвогрунта для колёсного и гусеничного движителей соответственно; функции среднего давления, допустимого по критерию глубины образующейся колеи, от модуля деформации для колёсного и гусеничного движителей соответственно. Опыт предыдущих исследователей показывает, что лабораторные эксперименты, план которых составлен с использованием положений теории подобия, позволяют верифицировать теоретические зависимости несущей способности, колееобразования и допустимого воздействия на почвогрунт. При этом достигается снижение объёма полевых опытов и погрешности определения экспериментальных величин, благодаря использованию более точного лабораторного оборудования и методик. Результаты обработки опытных данных, измеренных на стенде, показывают, что во всех опытах эмпирические распределения экспериментальных величин соответствуют нормальному закону распределения.

Ключевые слова: лесозаготовка; лесные машины; полугусеничный ход; лесные почвогрунты; образование колеи

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8004

Article

Experimental studies of a wheeled crawler impact on forest soils

Alexander Dmitriev

assistant, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Russian Federation), dmitriev.nauka@mail.ru

Ilya Dolzhikov

Ph. D. in engineering, associate professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Russian Federation), idolzhikov222@mail.ru

Olga Kunitskaya

D. Sc. in engineering, professor, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), ola.ola07@mail.ru

Vladimir Dyachenko

Ph. D. student, Saint Petersburg State University of Industrial Technology and Design (Russian Federation), Volodya.Dyachenko1986@mail.ru

Alexander Guryev

Ph. D. student, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), furijager96@gmail.com

Andrey Krivosheev

Ph. D. student, Ukhta State Technical University (Russian Federation), ugtukrivosheev@mail.ru

Received: 28 June 2024 / Accepted: 1 April 2025 / Published: 11 April 2025

Abstract: Experimental studies were performed at the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University. The methodology of their implementation, in general, was formed within the framework of the scientific school «Innovative developments in the logging industry and forestry». The experiments were conducted on a laboratory stand with two types of stamps, which were laboratory models of the wheeled and tracked propulsion of a combined (wheeled-tracked) forest machine. The objectives of the experimental study were to verify: 1) the refined theoretical dependence of the soil strength when the probe is pressed on the deformation modulus proposed to determine the soil characteristics in the field

conditions; 2) the function of the soil bearing capacity during the formation of a track with a depth of $h = 0.2$ m from the deformation modulus of the soil, for wheeled and tracked propulsion, respectively; 3) the function of the average pressure acceptable by the criterion of the depth of the formed track gauge, from the deformation modulus for the wheeled and tracked propulsion, respectively. The experience of previous researchers shows that laboratory experiments, the plan of which was drawn up using the provisions of similarity theory, made it possible to verify the theoretical dependences of bearing capacity, track formation and permissible impact on the soil. At the same time, a reduction in the volume of field experiments and the error in determining experimental values have been obtained due to the use of more accurate laboratory equipment and techniques. The results of processing the experimental data measured on the stand show that in all experiments the empirical distributions of experimental quantities corresponded to the normal distribution law.

Keywords: logging; forestry machines; half-track running; forest soils; track formation

1. Введение

Теоретическим и экспериментальным исследованиям воздействия колёсных и гусеничных движителей лесных машин на почвогрунты лесосек посвящено большое количество исследований [1—10 и др.]. Но все известные работы в данном направлении исследований посвящены воздействию на лесные почвогрунты либо колёсных, либо гусеничных движителей. С увеличением количества лесопользователей, осуществляющих малообъёмные лесные работы в лесах России, становится всё больше колёсных тракторов сельскохозяйственного назначения малого класса тяги (в основном МТЗ) [11—17], которые в сложных условиях эксплуатации переводятся на полугусеничный ход [18—23]. При таком комбинированном движителе физическая картина воздействия движителя на лесной почвогрунт меняется. В связи с этим потребовалась экспериментальная проверка разработанной авторами математической модели взаимодействия полугусеничного движителя с лесным почвогрунтом, отличающейся уточнённым учётом влияния специфических режимов работы [24], [25].

При подготовке экспериментальных исследований учитывались и использовались наработки участников научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета [26], [27].

Эксперименты проведены на стенде с параметрами, указанными в таблице 1 для двух типов штампов, являвшихся лабораторными моделями колёсного и гусеничного движителей комбинированной лесной машины. На настоящем этапе исследований для каждого из двух указанных случаев необходима проверка:

- уточнённой теоретической зависимости прочности почвогрунта при вдавливании зонда CI от модуля деформации E , предлагаемой для определения характеристик почвогрунта в полевых условиях;
- функции несущей способности почвогрунта p_s при образовании колеи глубиной $h = 0,2$ м от модуля деформации почвогрунта E для колёсного и гусеничного движителей соответственно;
- функции среднего давления p , допустимого по критерию глубины образующейся колеи, от модуля деформации E , для колёсного и гусеничного движителей соответственно;

Общая схема лабораторного стенда, использованного в экспериментах, приведена на рисунке 1.

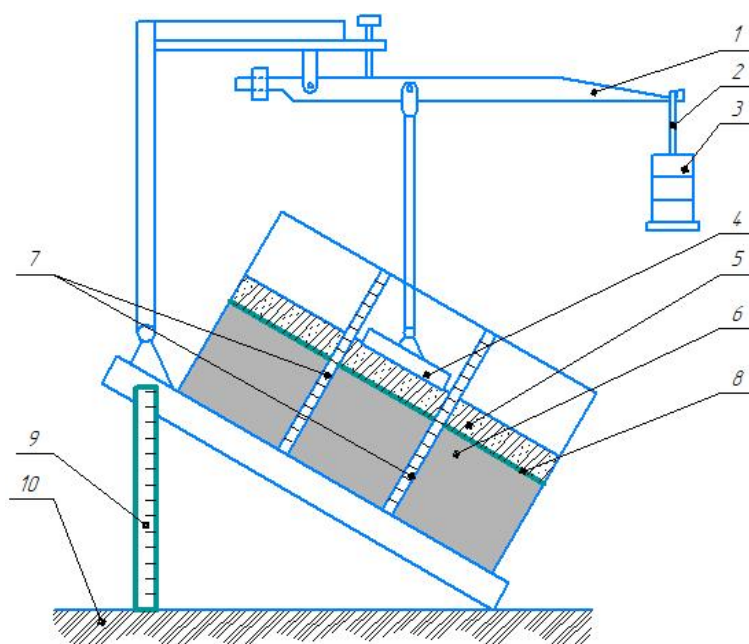


Рисунок 1. Лабораторный стенд для определения допустимого давления штампа и несущей способности почвогрунта: 1 — рычаг; 2 — навеска; 3 — груз; 4 — штамп; 5 — верхний слой (щепа, опционально); 6 — слой грунта; 7 — линейки; 8 — металлическая пластина; 9 — планка для выставления наклона платформы; 10 — основание (стол) (слой щепы 5 используется при моделировании воздействия на почвогрунт с покрытием)

Figure 1. Laboratory stand to determine the permissible stamp pressure and bearing capacity of the soil: 1 — lever; 2 — hitch; 3 — load; 4 — stamp; 5 — top layer (chips, optional); 6 — soil layer; 7 — rulers; 8 — metal plate; 9 — bar for setting the tilt of the platform; 10 — base (table) (a layer of chips 5 is used when modeling the impact on the coated soil)

2. Материалы и методы

Стенд сконструирован таким образом, чтобы обеспечить возможность моделировать движение лесной машины по трассе с уклоном за счёт планки 9.

Параметры лабораторных моделей подобраны на основе геометрического подобия 1:15, таким образом, коэффициент пересчёта линейных параметров $k = 15$. Соотношение сторон пятна контакта l/b для штампов, моделирующих воздействие колёсного и гусеничного движителей, составляет 1,5 и 5 соответственно. Вес груза Q варьируется с учётом площадей штампов F таким образом, чтобы обеспечить требуемое среднее давление p в заданном диапазоне.

Основные геометрические соотношения лабораторной модели и штампов, а также параметры движителей в натуральном масштабе приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры лабораторной модели для изучения показателей воздействия колёсного и гусеничного движителей на почвогрунт

Table 1. The main parameters of the laboratory model for studying the indicators of the impact of wheeled and tracked propulsion on the soil

Параметр	Штамп	
	1 (модель колёсного движителя)	2 (модель гусеничного движителя)
Коэффициент пересчёта, k	15	15
Ширина модельного штампа $b_{\text{лаб}}$, м	0,04	0,04
Длина модельного штампа $l_{\text{лаб}}$, м	0,04	0,2
Площадь пятна контакта модельного штампа $F_{\text{лаб}}$, м ²	0,0016	0,008
Максимальный вес Q_{max} , Н	140	240
Ширина пятна контакта в натуральном масштабе b , м ²	0,7	0,6
Площадь пятна контакта в натуральном масштабе F , м ²	0,52	1,8
Давление по пятну контакта p_{max} , МПа	0,311	0,300

Для образцов почвогрунта по стандартным методикам определяли модуль деформации E и сопротивление зондированию CI . Переменные факторы в опытах:

- усилие, с которым штамп воздействовал на почвогрунт (определялось исходя из соотношения плеч рычага 1 : 10 и веса эталонного груза);
- геометрические параметры штампа (см. таблицу 1);

Толщина слоя почвогрунта $H_{\text{пг}}$ составляла не менее 40 см, чтобы обеспечить условие $H_{\text{пг}} \gg 2b$. Ширина лотка с грунтом $B_{\text{пг}}$ составляла 30 см, таким образом, $B_{\text{пг}} \gg 2b$. Длина лотка $L_{\text{пг}}$ составляла 60 см.

Резюмируем план эксперимента в виде таблицы 2.

Таблица 2. План эксперимента

Table 2. The plan of the experiment

№ опыта	Категория почвогрунта	Тип движителя	Число наблюдений
1	Слабонесущий (III категория)	Колёсный (штамп I)	56
2	Средней прочности (II категория)	Колёсный (штамп I)	56
3	Слабонесущий (III категория)	Гусеничный (штамп II)	56
4	Средней прочности (II категория)	Гусеничный (штамп II)	56

Экспериментальный почвогрунт b требуемого объёма размещали в лотке 9 (см. рисунок 1). Вес эталонного груза 3 через рычаг 1 передавался на штамп 4 . Далее нагрузка прикладывалась ступенями в зависимости от категории прочности почвогрунта. По результатам измерения перемещений штампа $h_{\text{лаб},i}$, в зависимости от среднего давления p_i , для экспериментального почвогрунта получали зависимости $h_{\text{лаб}}(p)$, по которым, в свою очередь, оценивали значения допустимого давления p_{adm} и несущей способности p_s (пример на рисунке 2).

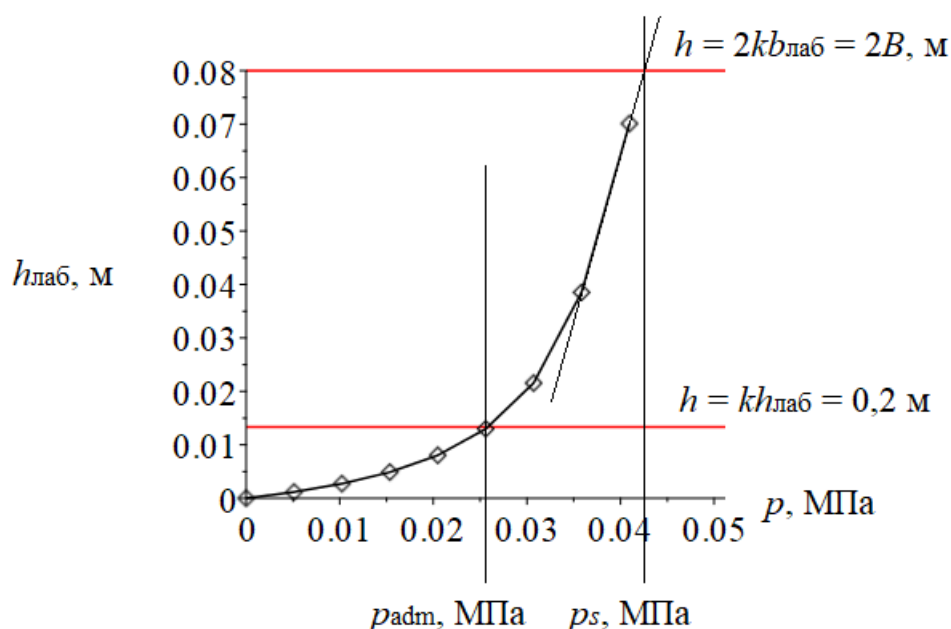


Рисунок 2. Пример функции осадки лабораторного штампа от среднего давления по пятну контакта

Figure 2. An example of the function of the laboratory stamp settlement from the average pressure along the contact spot

Экспериментальные значения несущей способности p_s и допустимого давления p_{adm} определены линейной интерполяцией результатов измерений в опытах (для p_{adm} по двум соседним узлам при $h_{\text{лаб},i} \leq 0,2$ м, $h_{\text{лаб},i+1} > 0,2$ м; для p_s по узлам $h_{\text{лаб},i-2}$, $h_{\text{лаб},i-1} \leq 2B$ м при $h_{\text{лаб},i} > 2B$):

$$p_s = \frac{p_{i-1} \left(\frac{2B}{k} - h_{\text{лаб},i-2} \right) - p_{i-2} \left(\frac{2B}{k} - h_{\text{лаб},i-1} \right)}{h_{\text{лаб},i-1} - h_{\text{лаб},i-2}}, \quad (1)$$

$$p_{\text{adm}} = \frac{p_{i+1} \left(\frac{0,2}{k} - h_{\text{лаб},i} \right) - p_i \left(\frac{0,2}{k} - h_{\text{лаб},i+1} \right)}{h_{\text{лаб},i+1} - h_{\text{лаб},i}}. \quad (2)$$

Проверка согласования результатов теоретических и экспериментальных исследований может проводиться двумя способами. В первом случае критерием сходимости является отклонение теоретических значений от экспериментальных на величину, не превышающую по абсолютному значению оценку, вычисленную с учётом абсолютных погрешностей измерения:

$$\varepsilon_y = |y_{\text{эксп}} - y_{\text{теор}}| \leq \overline{\Delta}_y = \sum_{j=1}^m \left| \frac{\partial y(x)}{\partial x_j} \right|_{|x_j=x_{j,\max}} \overline{\Delta}_{x_j}, \quad (3)$$

где y — экспериментальная величина, сходимость которой проверяется, x — параметры теоретической модели, измеряемые в эксперименте, j — порядковый номер параметра, m — число параметров модели, максимальное значение $x_{j,\max}$ определяется в соответствии с физико-механическими свойствами почвогрунта в опыте и условиями его проведения, $\overline{\Delta}_{x_j}$ — половина цены деления измерительного прибора.

Также критерием сходимости может являться отклонение теории от эксперимента на величину, не превосходящую доверительных границ варьирования результатов наблюдений:

$$\varepsilon_y = |y_{\text{эксп}} - y_{\text{теор}}| \leq \Delta = S_y t, \quad (4)$$

где S — выборочное стандартное отклонение экспериментальной величины в опыте, t — t -статистика, справочная величина, $t = t(\alpha, n - 1)$, α — мощность критерия ($\alpha = 0,05$), n — число наблюдений в опыте.

Для нормально распределённых экспериментальных величин достаточность фактически выполненного числа наблюдений в опыте проверяется по условию

$$n \geq \left\lceil \frac{t^2 v^2}{\alpha^2} \right\rceil = [n], \quad (5)$$

где v — коэффициент вариации:

$$v = \frac{S_y}{y_{\text{средн}}}, \quad (6)$$

где $y_{\text{средн}}$ — среднее значение экспериментальной величины в опыте.

3. Результаты

3.1. Модель колёсного движителя

Основные результаты, полученные в опыте № 1, приведены в таблице 3. Результаты по отдельным наблюдениям представлены в приложении. Число наблюдений в опыте составило: $n = 56$.

Таблица 3. Основные результаты опыта с моделью колёсного штампа (слабонесущий почвогрунт) (опыт № 1)

Table 3. The main results of the experiment with the wheel stamp model (low-bearing soil) (experiment no. 1)

Статистика	E , МПа	CI , МПа	p_s , МПа	p , МПа
$y_{\min}$	0,317	0,1155	0,0375	0,032
$y_{\max}$	0,489	0,203	0,069	0,0595
$y_{\text{средн}}$	0,3987	0,1473	0,0525	0,0443
S	0,03734	0,01684	0,00641	0,00541
ν	0,0937	0,1143	0,1221	0,1221
t	2,004	2,004	2,004	2,004
Δ	0,07483	0,03375	0,01285	0,01084
$[n]$	15	21	24	24

Вначале проверим соответствие эмпирического закона распределения экспериментальных величин нормальному закону распределения. Для этого определим частоты экспериментальных значений по интервалам, число интервалов K определим по формуле

$$K = 1 + 3,2 \log n, \quad (7)$$

где K округлим до целого в большую сторону, n — число наблюдений экспериментальной величины в опыте.

Границы интервалов определим с учётом размаха R :

$$R = y_{\max} - y_{\min}, \quad (8)$$

где $y_{\max}$ и $y_{\min}$ — соответственно максимальное и минимальное значения экспериментальной величины в опыте, тогда шаг

$$t = \frac{R}{K}, \quad (9)$$

а нижние и верхние границы интервалов значений экспериментальной величины в опыте задаются соответственно:

$$y_{i,0} = y_{\min} + (i-1)t, y_i = y_{\min} + it, \quad (10)$$

где i — порядковый номер интервала.

Абсолютные частоты k_i экспериментальных величин определяются непосредственно числом попаданий наблюдаемых значений в границы интервалов, далее относительные частоты p и их плотности q рассчитываем по формулам:

$$p_i = \frac{k_i}{n}, q_i = \frac{p_i}{t}. \quad (11)$$

Результаты расчёта плотностей относительных частот свойств почвогрунта E , CI в опыте № 1 (модель колёсного движителя, слабонесущий почвогрунт III категории прочности) приведены в виде гистограмм на рисунке 3. Там же в виде графиков приведены теоретические значения плотностей относительных частот по формулам (11).

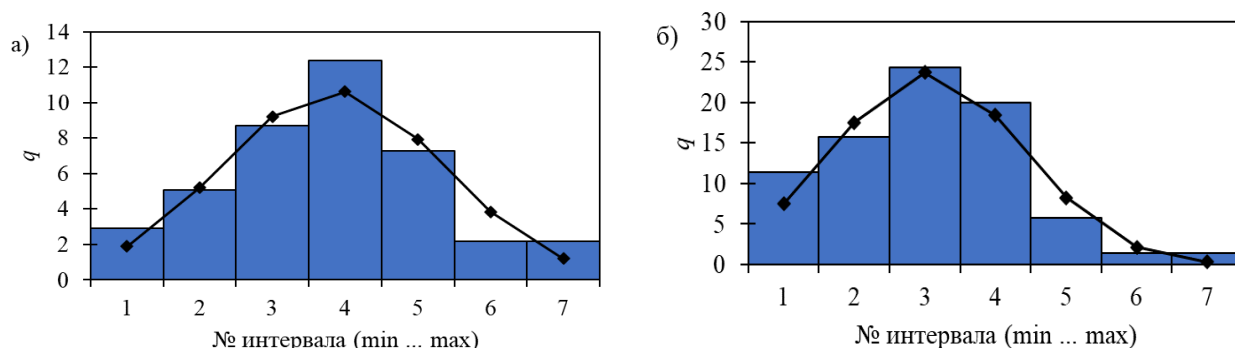


Рисунок 3. Экспериментальные и теоретические плотности относительных частот значений модуля деформации (а) и сопротивления зондированию (б) в опыте с моделью колёсного штампа (слабонесущий почвогрунт) (опыт № 1)

Figure 3. Experimental and theoretical densities of the relative frequencies of the values of the deformation modulus (a) and the resistance to probing (b) in the experiment with the wheel stamp model (low-bearing soil) (experiment no. 1)

Аналогичные показатели, рассчитанные для несущей способности p_s и допустимого среднего давления p , приведены на рисунке 4.

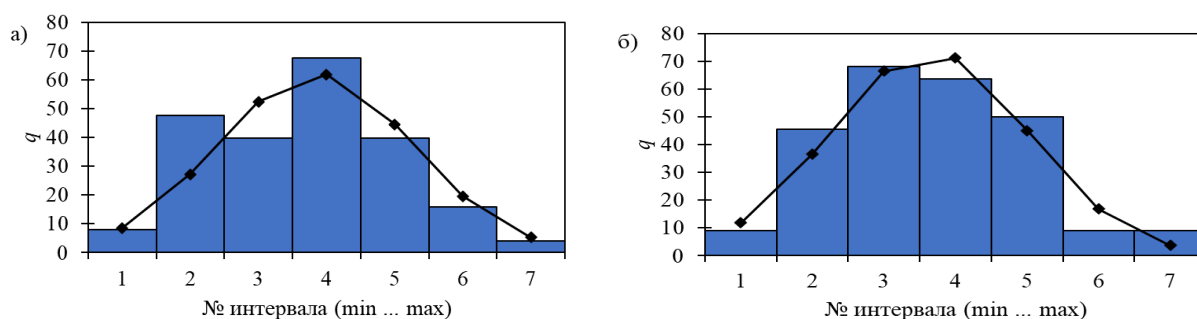


Рисунок 4. Экспериментальные и теоретические плотности относительных частот значений несущей способности (а) и допустимого давления (б) в опыте с моделью колёсного штампа (слабонесущий почвогрунт) (опыт № 1)

Figure 4. Experimental and theoretical densities of relative frequencies of load-bearing capacity (a) and permissible pressure (b) in the experiment with the wheel stamp model (low-bearing soil) (experiment no. 1)

В таблице 4 приведены результаты проверки эмпирических законов распределения экспериментальных величин нормальному закону распределения.

Таблица 4. Проверка распределения экспериментальных величин нормальному закону распределения в опыте с моделью колёсного штампа (слабонесущий почвогрунт) (опыт № 1)

Table 4. Verification of the experimental quantities distribution according to the normal distribution law in the experiment with the wheel stamp model (low-bearing soil) (experiment no. 1)

Интервал	Абсолютные частоты k			
	E	CI	p_s	p
1	4	8	2	2
2	7	11	12	10
3	12	17	10	15
4	17	14	17	14
5	10	4	10	11
6	3	1	4	2
7	3	1	1	2
Интервал	Относительные частоты ρ			
1	0,0487	0,0964	0,0411	0,0494
2	0,1286	0,2173	0,1239	0,1449
3	0,2237	0,2893	0,2329	0,2564
4	0,2562	0,2276	0,2726	0,2739
5	0,1933	0,1058	0,1989	0,1766
6	0,0960	0,0290	0,0904	0,0687
7	0,0314	0,0047	0,0256	0,0161
Интервал	Критерий согласия χ^2			
1	0,5954	1,2543	0,0390	0,2120
2	0,0057	0,1123	3,6899	0,4389
3	0,0222	0,0393	0,7088	0,0288
4	0,4901	0,1235	0,1967	0,1166
5	0,0626	0,6239	0,1163	0,1242
6	1,0501	0,2396	0,2228	0,8886
7	0,8783	2,0750	0,1304	1,3326
χ^2	3,104	4,468	5,104	3,142
$\chi^2_{\text{крит}}$	11,067	11,067	11,067	11,067

Проверка выполняется по критерию согласия:

$$\chi^2 \leq \chi_{\text{крит}}^2, \quad (12)$$

где расчётное значение критерия

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^K \chi_i^2, \chi_i^2 = \frac{(\rho_{i,\text{теор}} - n\rho_i)^2}{n\rho_i}, \quad (13)$$

теоретические значения относительных частот

$$\chi^2 \leq \chi_{\text{крит}}^2, \quad (14)$$

а критическое значение критерия согласия

$$\chi_{\text{крит}}^2 = \chi_{\text{табл}}^2(\alpha, K - s - 1), \quad (15)$$

определяется по таблице с учётом мощности критерия $\alpha = 0,05$, числа интервалов K и параметров оцениваемого распределения: $s = 2$.

Результаты расчётов, приведённые в таблице 4, показывают, что в опыте № 1 эмпирические распределения экспериментальных величин соответствуют нормальному закону распределения, а выполненное число наблюдений достаточно для оценки с точностью не ниже 95 %.

В таблице 5 приведены основные результаты, полученные в опыте № 2, число наблюдений в опыте составило: $n = 50$.

Таблица 5. Основные результаты опыта с моделью колёсного штампа (почвогрунт средней прочности) (опыт № 2)

Table 5. The main results of the experiment with the wheel stamp model (medium strength soil) (experiment no. 2)

Статистика	E , МПа	CI , МПа	p_s , МПа	p , МПа
$y_{\min}$	0,7845	0,248	0,074	0,066
$y_{\max}$	1,2	0,4045	0,137	0,1245
$y_{\text{средн}}$	1,0065	0,3106	0,1063	0,0961
S	0,09092	0,03267	0,0139	0,01333
v	0,0903	0,1052	0,1308	0,1387
t	2,0096	2,0096	2,0096	2,0096
Δ	0,18271	0,06565	0,02793	0,02679
$[n]$	14	18	28	31

Рассмотрим данные, необходимые для проверки соответствия эмпирического закона распределения экспериментальных величин нормальному закону распределения. Результаты

расчёта плотностей относительных частот свойств почвогрунта E , CI в опыте № 2 (модель колёсного движителя, среднепрочный почвогрунт II категории прочности) приведены в виде гистограмм на рисунке 5.

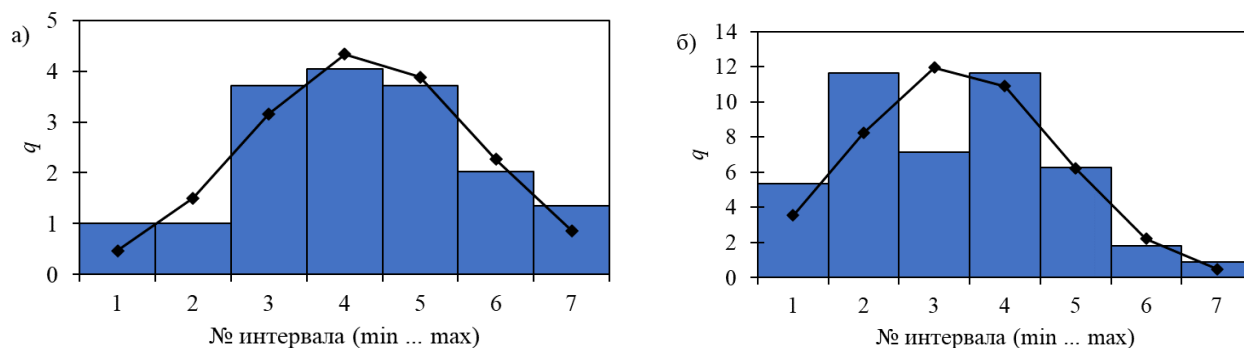


Рисунок 5. Экспериментальные и теоретические плотности относительных частот значений модуля деформации (а) и сопротивления зондированию (б) в опыте с моделью колёсного штампа (почвогрунт средней прочности) (опыт № 2)

Figure 5. Experimental and theoretical densities of relative frequencies of values of the modulus of deformation (a) and resistance to probing (b) in the experiment with the model of a wheel stamp (medium strength soil) (experiment no. 2)

Аналогичные показатели, рассчитанные для несущей способности p_s и допустимого среднего давления p , приведены на рисунке 6.

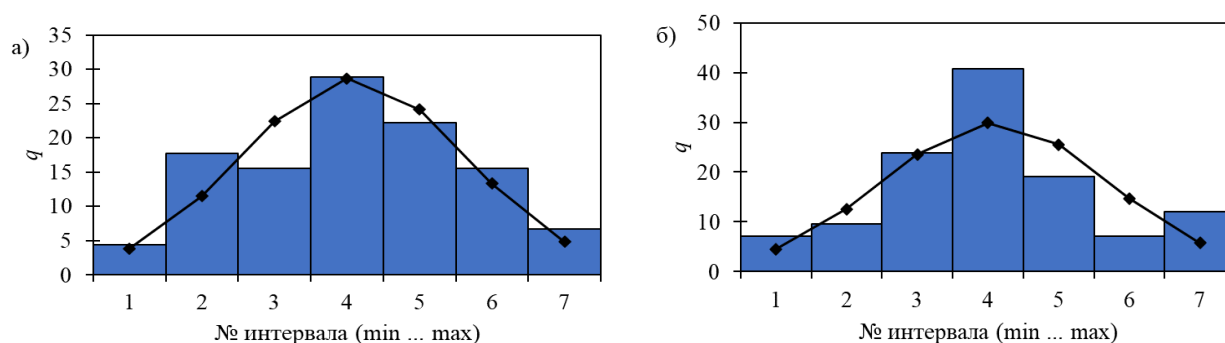


Рисунок 6. Экспериментальные и теоретические плотности относительных частот значений несущей способности (а) и допустимого давления (б) в опыте с моделью колёсного штампа (почвогрунт средней прочности) (опыт № 2)

Figure 6. Experimental and theoretical densities of relative frequencies of load-bearing capacity (a) and permissible pressure (b) in the experiment with the wheel stamp model (medium strength soil) (experiment no. 2)

В таблице 6 приведены результаты проверки эмпирических законов распределения экспериментальных величин нормальному.

Таблица 6. Проверка распределения экспериментальных величин нормальному закону распределения в опыте с моделью колёсного штампа (почвогрунт средней прочности) (опыт № 2)

Table 6. Verification of the experimental quantities distribution according to the normal distribution law in the experiment with the wheel stamp model (medium strength soil) (experiment no. 2)

Интервал	Абсолютные частоты k			
	E	CI	p_s	p
1	3	6	2	3
2	3	13	8	4
3	11	8	7	10
4	12	13	13	17
5	11	7	10	8
6	6	2	7	3
7	4	1	3	5
Интервал	Относительные частоты ρ			
1	0,0295	0,0813	0,0368	0,0395
2	0,0912	0,1830	0,1049	0,1062
3	0,1865	0,2624	0,1997	0,1954
4	0,2529	0,2398	0,2535	0,2456
5	0,2272	0,1397	0,2146	0,2111
6	0,1353	0,0518	0,1212	0,1240
7	0,0534	0,0122	0,0456	0,0498
Интервал	Критерий согласия χ^2			
1	1,5751	0,9189	0,0141	0,5345
2	0,5325	1,6191	1,4439	0,3235
3	0,3006	1,9981	0,8924	0,0055
4	0,0328	0,0851	0,0084	1,8145
5	0,0115	0,0000	0,0497	0,6178
6	0,0868	0,1349	0,1458	1,6514
7	0,6628	0,2458	0,2258	2,5333
χ^2	3,202	5,002	2,780	7,480
$\chi^2_{\text{крит}}$	15,307	15,307	15,307	15,307

Результаты расчётов показывают, что в опыте № 2 эмпирические распределения экспериментальных величин соответствуют нормальному закону распределения, а выполненное число наблюдений достаточно для оценки с точностью не ниже 95 %.

3.2. Модель гусеничного движителя

В таблице 7 приведены основные результаты, полученные в опыте № 3, число наблюдений в опыте составило: $n = 51$.

Таблица 7. Основные результаты опыта с моделью гусеничного штампа (слабонесущий почвогрунт) (опыт № 3)

Table 7. The main results of the experiment with the caterpillar stamp model (weakly bearing soil) (experiment no. 3)

Статистика	E , МПа	CI , МПа	p_s , МПа	p , МПа
$y_{\min}$	0,3305	0,113	0,0305	0,017
$y_{\max}$	0,4685	0,203	0,0545	0,0295
$y_{\text{средн}}$	0,3963	0,1495	0,0423	0,022
S	0,03235	0,01937	0,00472	0,00263
v	0,0816	0,1296	0,1116	0,1195
t	2,0096	2,0096	2,0096	2,0096
Δ	0,06501	0,03893	0,00949	0,00529
$[n]$	11	27	20	23

Рассмотрим данные, необходимые для проверки соответствия эмпирического закона распределения экспериментальных величин нормальному закону распределения. Результаты расчёта плотностей относительных частот свойств почвогрунта E , CI в опыте № 3 (модель гусеничного движителя, слабонесущий почвогрунт III категории прочности) приведены в виде гистограмм на рисунке 7.

Аналогичные показатели, рассчитанные для несущей способности p_s и допустимого среднего давления p , приведены на рисунке 8.

В таблице 8 приведены результаты проверки эмпирических законов распределения экспериментальных величин нормальному закону распределения.

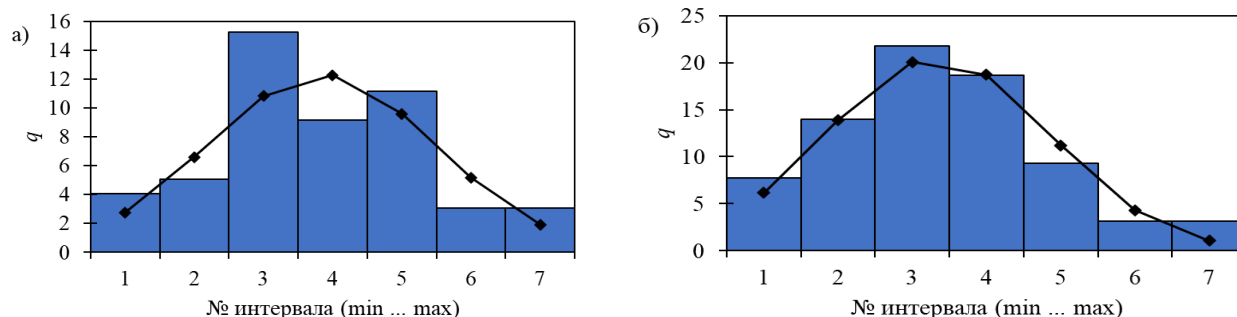


Рисунок 7. Экспериментальные и теоретические плотности относительных частот значений модуля деформации (а) и сопротивления зондированию (б) в опыте с моделью гусеничного штампа (слабонесущий почвогрунт) (опыт № 3)

Figure 7. Experimental and theoretical densities of the relative frequencies of the values of the deformation modulus (a) and the resistance to probing (b) in the experiment with the caterpillar stamp model (low-bearing soil) (experiment no. 3)

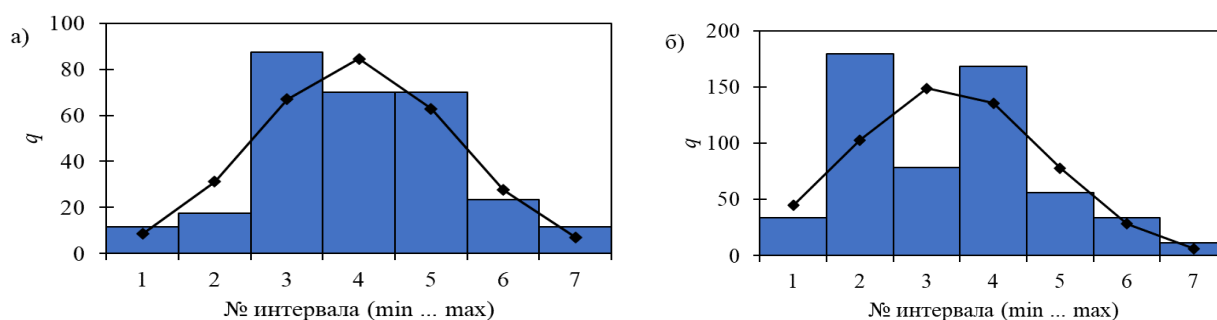


Рисунок 8. Экспериментальные и теоретические плотности относительных частот значений несущей способности (а) и допустимого давления (б) в опыте с моделью гусеничного штампа (слабонесущий почвогрунт) (опыт № 3)

Figure 8. Experimental and theoretical densities of relative frequencies of load-bearing capacity (a) and permissible pressure (b) in the experiment with the caterpillar stamp model (low-bearing soil) (experiment no. 3)

Таблица 8. Проверка распределения экспериментальных величин нормальному закону распределения в опыте с моделью гусеничного штампа (слабонесущий почвогрунт) (опыт № 3)

Table 8. Verification of the experimental quantities distribution according to the normal distribution law in the experiment with the caterpillar stamp model (weakly bearing soil) (experiment no. 3)

Интервал	Абсолютные частоты k			
	E	CI	p_s	p
1	4	5	2	3
2	5	9	3	16
3	15	14	15	7
4	9	12	12	15
5	11	6	12	5
6	3	2	4	3
7	3	2	2	1
Интервал	Относительные частоты ρ			
1	0,0562	0,0814	0,0319	0,0822
2	0,1303	0,1777	0,1094	0,1827
3	0,2110	0,2538	0,2267	0,2605
4	0,2383	0,2370	0,2833	0,2384
5	0,1877	0,1447	0,2137	0,1400
6	0,1032	0,0578	0,0973	0,0527
7	0,0395	0,0151	0,0267	0,0127
Интервал	Критерий согласия χ^2			
1	0,5059	0,2135	0,1041	0,2993
2	0,3532	0,0015	1,1166	5,1613
3	1,8771	0,1357	1,1861	2,7872
4	0,7126	0,0019	0,3309	0,7961
5	0,2775	0,2112	0,1618	0,5710
6	0,9031	0,2735	0,1532	0,0503
7	0,5292	2,0622	0,3321	0,2079
χ^2	5,159	2,899	3,385	9,873
$\chi^2_{\text{крит}}$	15,307	15,307	15,307	15,307

Результаты расчётов показывают, что в опыте № 3 эмпирические законы распределения экспериментальных величин соответствуют нормальному закону распределения, а выполненное число наблюдений достаточно для оценки с точностью не ниже 95 %.

В таблице 9 приведены основные результаты, полученные в опыте № 4, число наблюдений в опыте составило: $n = 54$.

Таблица 9. Основные результаты опыта с моделью гусеничного штампа (почвогрунт средней прочности) (опыт № 4)

Table 9. The main results of the experiment with the caterpillar stamp model (medium strength soil grout) (experiment no. 4)

Статистика	E , МПа	CI , МПа	p_s , МПа	p , МПа
$y_{\min}$	0,8025	0,24	0,0615	0,042
$y_{\max}$	1,236	0,446	0,12	0,0735
$y_{\text{средн}}$	0,9947	0,3154	0,0842	0,0561
S	0,10002	0,04439	0,01263	0,00764
ν	0,1006	0,1407	0,15	0,1362
t	2,0057	2,0057	2,0057	2,0057
Δ	0,20061	0,08903	0,02533	0,01532
$[n]$	17	32	36	30

Рассмотрим данные, необходимые для проверки соответствия эмпирического закона распределения экспериментальных величин нормальному закону распределения. Результаты расчёта плотностей относительных частот свойств почвогрунта E , CI в опыте № 4 (модель гусеничного движителя, среднепрочный почвогрунт II категории прочности) приведены в виде гистограмм на рисунке 9.

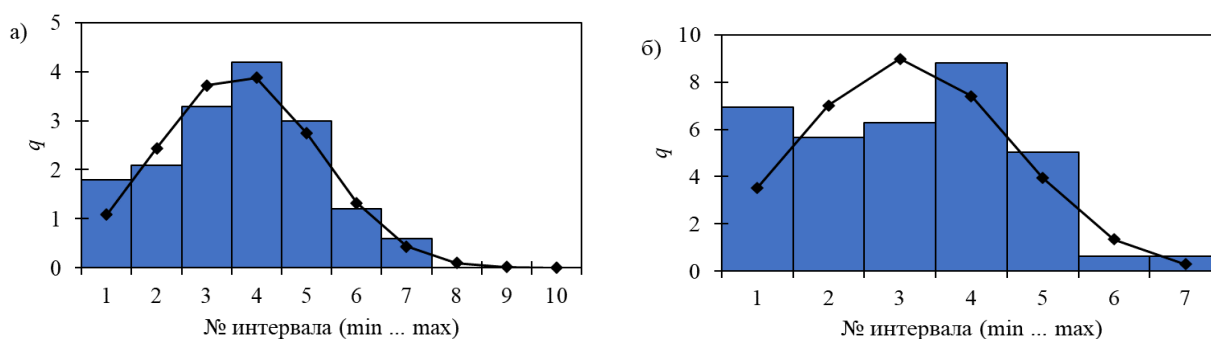


Рисунок 9. Экспериментальные и теоретические плотности относительных частот значений модуля деформации (а) и сопротивления зондированию (б) в опыте с моделью гусеничного штампа (почвогрунт средней прочности) (опыт № 4)

Figure 9. Experimental and theoretical densities of relative frequencies of values of the modulus of deformation (a) and resistance to probing (b) in the experiment with the model of a caterpillar stamp (medium-strength soil) (experiment no. 4)

Аналогичные показатели, рассчитанные для несущей способности p_s и допустимого среднего давления p , приведены на рисунке 10.

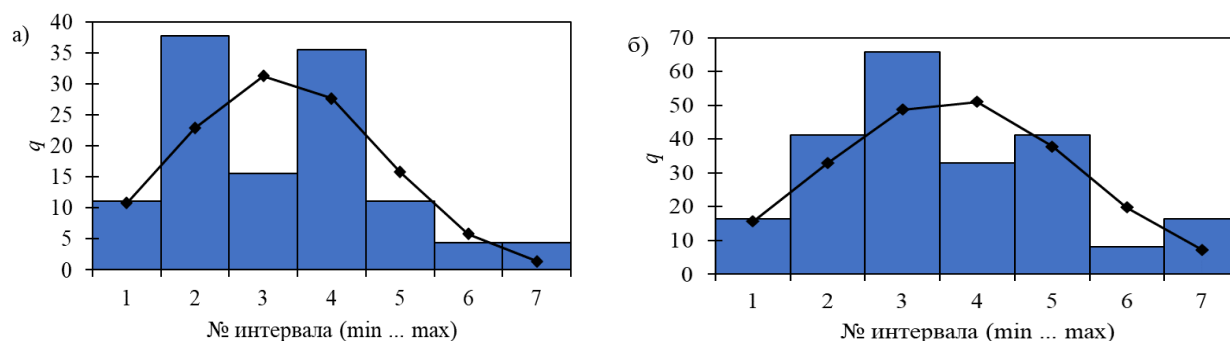


Рисунок 10. Экспериментальные и теоретические плотности относительных частот значений несущей способности (а) и допустимого давления (б) в опыте с моделью гусеничного штампа (почвогрунт средней прочности) (опыт № 4)

Figure 10. Experimental and theoretical densities of relative frequencies of the values of bearing capacity (a) and permissible pressure (b) in the experiment with the model of a caterpillar stamp (medium strength soil) (experiment no. 4)

В таблице 10 приведены результаты проверки эмпирических законов распределения экспериментальных величин нормальному закону распределения.

Результаты расчётов показывают, что в опыте № 4 эмпирические распределения экспериментальных величин соответствуют нормальному закону распределения, а выполненное число наблюдений достаточно для оценки с точностью не ниже 95 %.

Проиллюстрируем результаты сопоставления теоретических и экспериментальных значений сопротивления зондированию CI (рисунок 11), несущей способности p_s (рисунок 12) и допустимого давления движителя p (рисунок 13).

Результаты количественной оценки сходимости для каждой из экспериментальных величин приведены в таблице 11.

Таблица 10. Проверка распределения экспериментальных величин нормальному закону распределения в опыте с моделью гусеничного штампа (почвогрунт средней прочности) (опыт № 4)

Table 10. Verification of the experimental quantities distribution according to the normal distribution law in the experiment with the model of a caterpillar stamp (medium strength soil) (experiment no. 4)

Интервал	Абсолютные частоты k			
	E	CI	p_s	p
1	6	11	5	4
2	7	9	17	10
3	11	10	7	16
4	14	14	16	8
5	10	8	5	10
6	4	1	2	2
7	2	1	2	4
Интервал	Относительные частоты p			
1	0,0691	0,1055	0,0919	0,0720
2	0,1508	0,2045	0,1897	0,1478
3	0,2272	0,2595	0,2567	0,2165
4	0,2361	0,2156	0,2277	0,2264
5	0,1693	0,1172	0,1324	0,1691
6	0,0837	0,0417	0,0505	0,0901
7	0,0285	0,0097	0,0126	0,0343
Интервал	Критерий согласия χ^2			
1	1,3832	4,9378	0,0003	0,0033
2	0,1609	0,3781	4,4543	0,5120
3	0,1314	1,1493	3,3964	1,5888
4	0,1223	0,4783	1,1153	1,4617
5	0,0807	0,4410	0,6474	0,0828
6	0,0598	0,6958	0,1933	1,6885
7	0,1367	0,4330	2,5586	2,4944
χ^2	2,075	8,513	12,366	7,831
$\chi^2_{\text{крит}}$	15,307	15,307	15,307	15,307

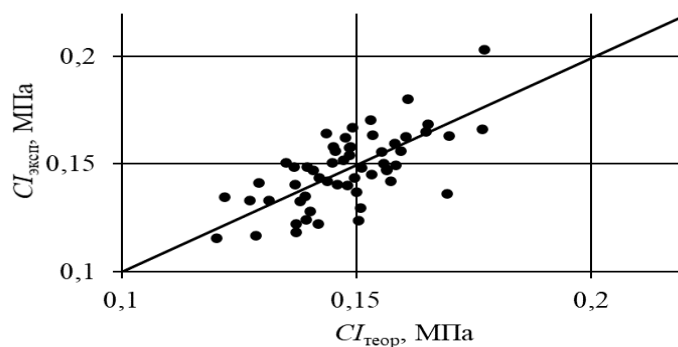


Рисунок 11. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений сопротивления зондированию почвогрунта в опыте № 1 (модель колёсного движителя, слабонесущий почвогрунт)

Figure 11. Comparison of theoretical and experimental values of resistance to soil sounding in experiment no. 1 (wheeled propulsion model, low-bearing soil)

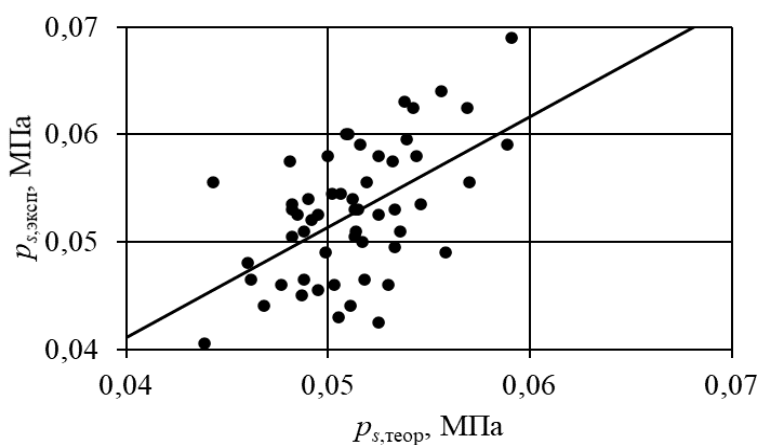


Рисунок 12. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений несущей способности почвогрунта в опыте № 1 (модель колёсного движителя, слабонесущий почвогрунт)

Figure 12. Comparison of theoretical and experimental values of the soil bearing capacity of the soil in experiment no. 1 (model of a wheeled mover, a weakly bearing soil)

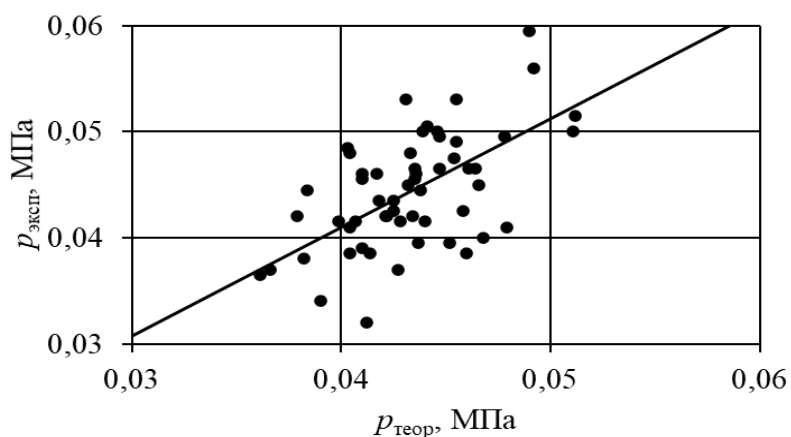


Рисунок 13. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений допустимого давления движителя на почвогрунт в опыте № 1 (модель колёсного движителя, слабонесущий почвогрунт)

Figure 13. Comparison of theoretical and experimental values of the permissible pressure of the propellant on the soil in experiment no. 1 (model of a wheeled propellant, a weakly bearing soil)

Таблица 11. Результаты количественной оценки сходимости теории и эксперимента в опыте № 1 (модель колёсного движителя, слабонесущий почвогрунт)

Table 11. The results of a quantitative assessment of the convergence of theory and experiment in experiment no. 1 (a model of a wheeled propulsion system, a weakly bearing soil)

Показатель	CI	p_s	p
δ , %	7,1	8,5	7,9
Δ , МПа	0,0338	0,0129	0,0108
ε , МПа	0,0154	0,006	0,0057

Примечание: δ — среднее значение относительного отклонения теоретической оценки от эксперимента.

Проиллюстрируем результаты сопоставления теоретических и экспериментальных значений сопротивления зондированию CI (рисунок 14), несущей способности p_s (рисунок 15) и допустимого давления движителя p (рисунок 16).

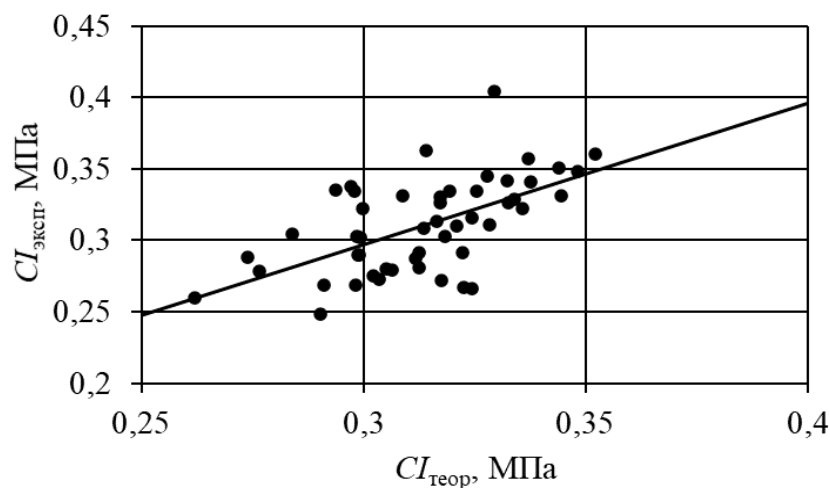


Рисунок 14. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений сопротивления зондированию почвогрунта в опыте № 2 (модель колёсного движителя, почвогрунт средней прочности)

Figure 14. Comparison of theoretical and experimental values of resistance to soil sounding in experiment no. 2 (wheel propulsion model, medium-strength soil)

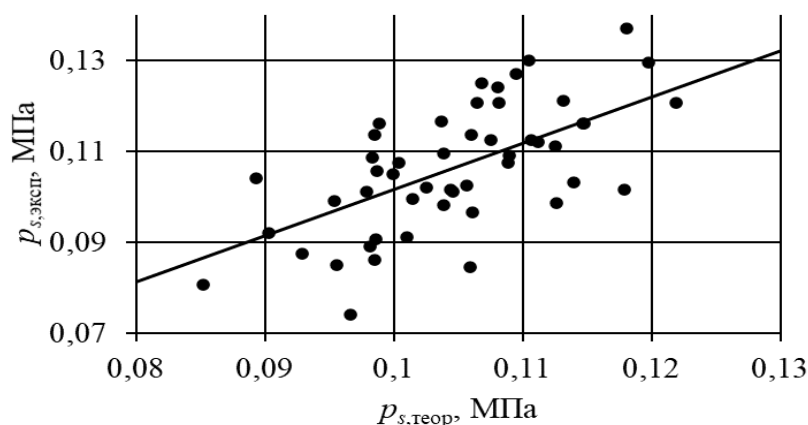


Рисунок 15. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений несущей способности почвогрунта в опыте № 2 (модель колёсного движителя, почвогрунт средней прочности)

Figure 15. Comparison of theoretical and experimental values of the soil bearing capacity of the soil in experiment no. 2 (wheel propulsion model, medium-strength soil)

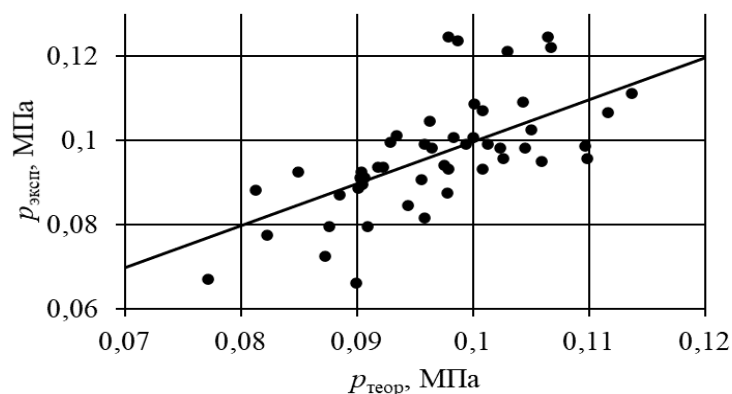


Рисунок 16. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений допустимого давления движителя на почвогрунт в опыте № 2 (модель колёсного движителя, почвогрунт средней прочности)

Figure 16. Comparison of theoretical and experimental values of the permissible pressure of the propellant on the soil in experiment no. 2 (model of a wheeled propellant, medium-strength soil)

Результаты количественной оценки сходимости для каждой из экспериментальных величин приведены в таблице 12.

Таблица 12. Результаты количественной оценки сходимости теории и эксперимента в опыте № 2 (модель колёсного движителя, почвогрунт средней прочности)

Table 12. The results of a quantitative assessment of the convergence of theory and experiment in experiment no. 2 (wheel propulsion model, medium-strength soil)

Показатель	CI	p_s	p
$\delta, \%$	6,8	8,3	7,9
$\Delta, \text{МПа}$	0,0657	0,0279	0,0268
$\varepsilon, \text{МПа}$	0,0345	0,0137	0,0137

Таким образом, в результате экспериментов установлена приемлемая сходимость результатов теоретических расчётов и опытных данных о сопротивлении почвогрунта зондированию (отклонения в пределах 7 %), несущей способности (отклонения в пределах 8,5 %) и допустимого давления на почвогрунт (отклонения в пределах 8 %) для случая воздействия модели колёсного движителя на слабонесущий почвогрунт и почвогрунт средней прочности. Отклонения находятся в пределах доверительных границ варьирования экспериментальных величин, для которых установлено соответствие эмпирического закона

распределения нормальному закону распределения. Выполненное число наблюдений достаточно для прогноза с вероятностью не ниже 95 %.

Проиллюстрируем результаты сопоставления теоретических и экспериментальных значений сопротивления зондированию CI (рисунок 17), несущей способности p_s (рисунок 18) и допустимого давления движителя p (рисунок 19). Результаты количественной оценки сходимости для каждой из экспериментальных величин приведены в таблице 13.

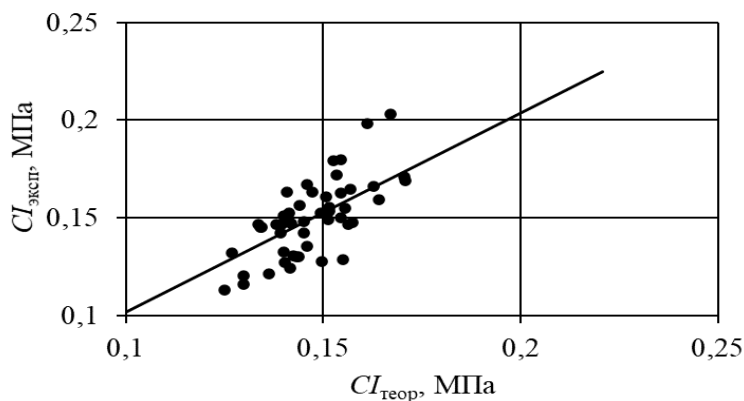


Рисунок 17. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений сопротивления зондированию почвогрунта в опыте № 3 (модель гусеничного движителя, слабонесущий почвогрунт)

Figure 17. Comparison of theoretical and experimental values of resistance to soil sounding in experiment no. 3 (crawler propulsion model, low-weight soil carrier)

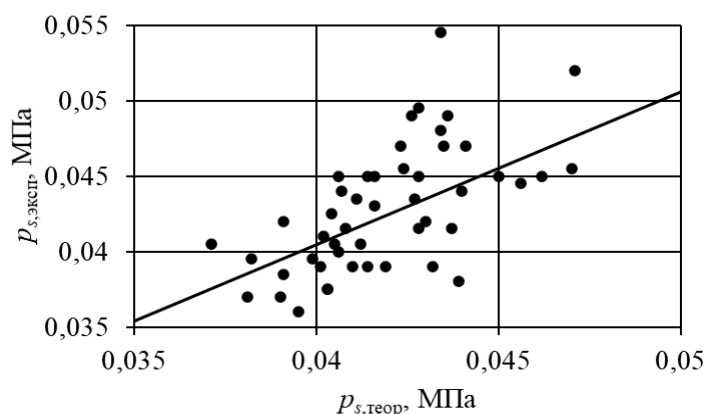


Рисунок 18. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений несущей способности почвогрунта в опыте № 3 (модель гусеничного движителя, слабонесущий почвогрунт)

Figure 18. Comparison of theoretical and experimental values of the soil bearing capacity of the soil in experiment no. 3 (caterpillar propulsion model, low-bearing soil)

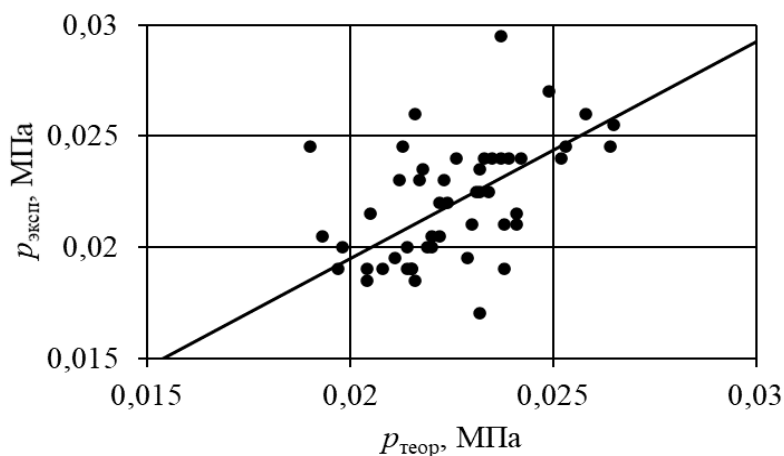


Рисунок 19. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений допустимого давления движителя на почвогрунт в опыте № 3 (модель гусеничного движителя, слабонесущий почвогрунт)

Figure 19. Comparison of theoretical and experimental values of the permissible pressure of the propellant on the soil in experiment no. 3 (model of a tracked propellant, a weakly bearing soil)

Таблица 13. Результаты количественной оценки сходимости теории и эксперимента в опыте № 3 (модель гусеничного движителя, слабонесущий почвогрунт)

Table 13. The results of a quantitative assessment of the convergence of theory and experiment in experiment no. 3 (caterpillar propulsion model, low-bearing soil)

Показатель	CI	p_s	p
$\delta, \%$	7,6	7,2	8,6
$\Delta, \text{МПа}$	0,0389	0,0095	0,0053
$\varepsilon, \text{МПа}$	0,0157	0,0063	0,0032

Проиллюстрируем результаты сопоставления теоретических и экспериментальных значений сопротивления зондированию CI (рисунок 20), несущей способности p_s (рисунок 21) и допустимого давления движителя p (рисунок 22).

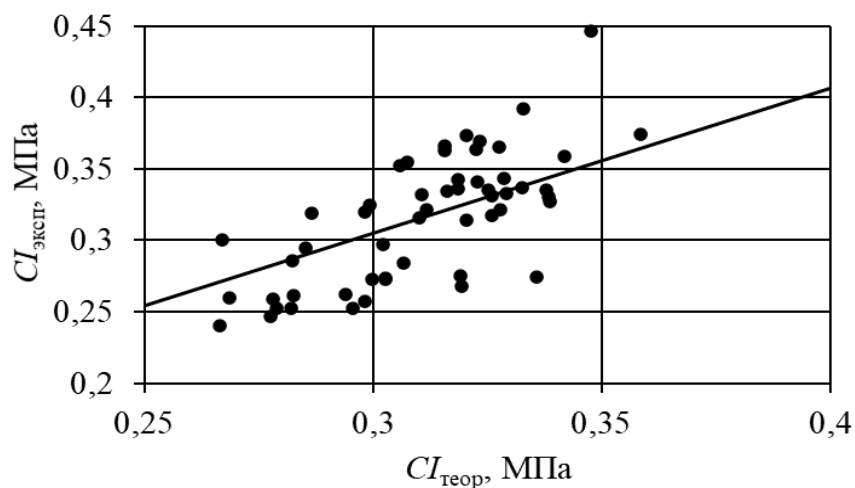


Рисунок 20. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений сопротивления зондированию почвогрунта в опыте № 4 (модель гусеничного движителя, почвогрунт средней прочности)

Figure 20. Comparison of theoretical and experimental values of resistance to soil sounding in experiment no. 4 (crawler propulsion model, medium-strength soil)

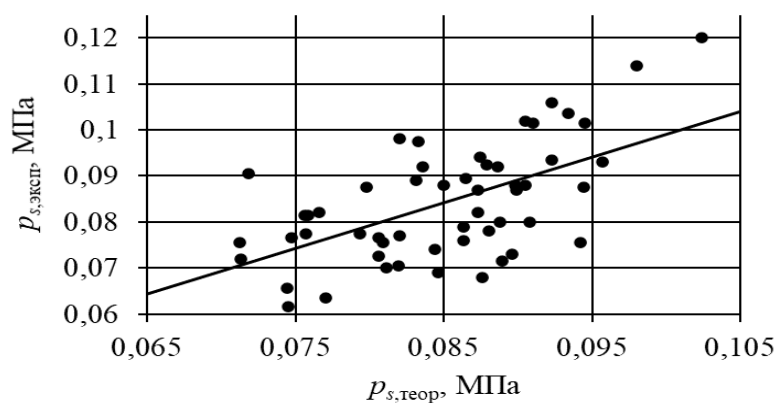


Рисунок 21. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений несущей способности почвогрунта в опыте № 4 (модель гусеничного движителя, почвогрунт средней прочности)

Figure 21. Comparison of theoretical and experimental values of the soil bearing capacity of the soil in experiment no. 4 (caterpillar propulsion model, medium-strength soil)

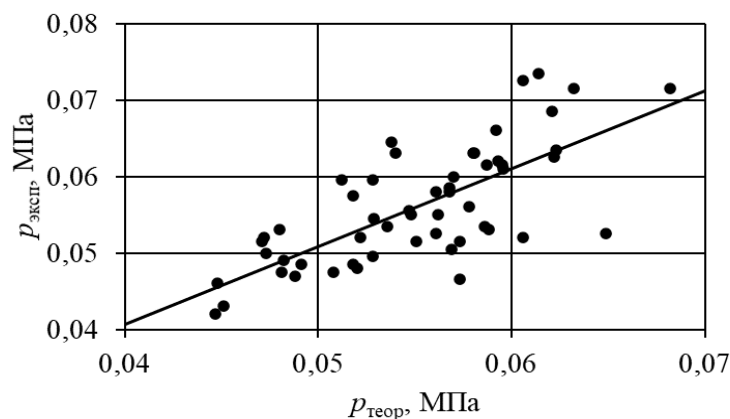


Рисунок 22. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений допустимого давления движителя на почвогрунт в опыте № 4 (модель гусеничного движителя, почвогрунт средней прочности)

Figure 22. Comparison of theoretical and experimental values of the permissible pressure of the propellant on the soil in experiment no. 4 (model of a tracked propellant, medium-strength soil)

Результаты количественной оценки сходимости для каждой из экспериментальных величин приведены в таблице 14.

Таблица 14. Результаты количественной оценки сходимости теории и эксперимента в опыте № 4 (модель гусеничного движителя, почвогрунт средней прочности)

Table 14. The results of a quantitative assessment of the convergence of theory and experiment in experiment no. 4 (caterpillar propulsion model, medium-strength soil)

Показатель	CI	p_s	p
$\delta, \%$	8,4	10,3	7,3
$\Delta, \text{МПа}$	0,089	0,0253	0,0153
$\varepsilon, \text{МПа}$	0,0358	0,0119	0,0063

Таким образом, в результате экспериментов установлена приемлемая сходимость результатов теоретических расчётов и опытных данных о сопротивлении почвогрунта зондированию (отклонения в пределах 8,5 %), несущей способности (отклонения в пределах 10,5 %) и допустимого давления на почвогрунт (отклонения в пределах 7,5 %) для случая воздействия модели гусеничного движителя на слабонесущий почвогрунт и почвогрунт средней прочности. Отклонения находятся в пределах доверительных границ варьирования экспериментальных величин, для которых установлено соответствие эмпирического закона

распределения нормальному закону распределения. Выполненное число наблюдений достаточно для прогноза с вероятностью не ниже 95 %.

4. Выводы

Основные выводы, сделанные по результатам представленных исследований:

- Результаты обработки опытных данных, измеренных на стенде, показывают, что во всех опытах эмпирические распределения экспериментальных величин соответствуют нормальному закону распределения.
- Результаты экспериментов воспроизводимы, а выполненное число наблюдений достаточно для оценки с точностью не ниже 95 %.
- В результате экспериментов с моделью колёсного движителя установлена приемлемая сходимость результатов теоретических расчётов и опытных данных о сопротивлении почвогрунта зондированию (отклонения в пределах 7 %), несущей способности (отклонения в пределах 8,5 %) и допустимого давления на почвогрунт (отклонения в пределах 8 %) для случая воздействия на слабонесущий почвогрунт и почвогрунт средней прочности. Отклонения находятся в пределах доверительных границ варьирования экспериментальных величин, для которых установлено соответствие эмпирического закона распределения нормальному закону распределения. Выполненное число наблюдений достаточно для прогноза с вероятностью не ниже 95 %.
- В результате экспериментов с моделью гусеничного движителя установлена приемлемая сходимость результатов теоретических расчётов и опытных данных о сопротивлении почвогрунта зондированию (отклонения в пределах 8,5 %), несущей способности (отклонения в пределах 10,5 %) и допустимого давления на почвогрунт (отклонения в пределах 7,5 %) для случая воздействия на слабонесущий почвогрунт и почвогрунт средней прочности. Отклонения находятся в пределах доверительных границ варьирования экспериментальных величин, для которых установлено соответствие эмпирического закона распределения нормальному закону распределения. Выполненное число наблюдений достаточно для прогноза с вероятностью не ниже 95 %.

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено на средства гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Список литературы

1. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию / А. И. Никифорова, Е. Г. Хитров, А. А. Пелымский [и др.] // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2014. № 2 (139). С. 87—91.
2. Шати́ро В. Я., Григорьев И. В., Жукова А. И. Влияние сдвиговых деформаций на процесс циклического уплотнения почвы // Естественные и технические науки. 2006. № 1. С. 174—180.
3. Григорьев И. В. Снижение отрицательного воздействия на почву колёсных трелёвочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: Изд-во ЛТА. 2006. 236 с.
4. Средооадающие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации / И. В. Григорьев, А. И. Жукова, О. И. Григорьева [и др.]. СПб.: Изд-во ЛТА, 2008. 176 с.
5. Поиск новых технических решений для повышения экологической совместимости лесных машин с лесной средой / И. В. Григорьев, И. И. Тихонов, О. И. Григорьева [и др.] // Интенсификация формирования и охраны интеллектуальной собственности: Материалы Республикан. научно-практич. конф., посвящённой 75-летию ПетрГУ. Петрозаводск, 2015. С. 9—11.
6. Расчёт тягово-сцепных свойств колёсных лесных машин с использованием WES-метода / Е. Г. Хитров, А. М. Хахина, И. В. Григорьев [и др.] // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6, № 3 (23). С. 196—202.
7. Никифорова А. И., Григорьева О. И. Моделирование воздействия движителей лесных машин на почвы лесосек // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 5-4 (16-4). С. 320—323.
8. Григорьев И. В., Григорьева О. И. Повышение экологической эффективности лесохозяйственного производства // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 3-4 (8-4). С. 51—55.
9. Оценка экологической безопасности работы лесных машин / А. И. Никифорова, О. И. Григорьева, Д. С. Киселев [и др.] // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона: Материалы Междунар. научно-практич. форума. Хабаровск, 2013. С. 134—138.
10. Эффективность лесопользования в криолитозоне / С. Е. Рудов, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева [и др.] // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы Междунар. научно-практич. конф. Воронеж, 2020. С. 460—463.
11. Григорьев И. В., Григорьева О. И. Эффективность лесопользования в России // Энергия: экономика, техника, экология. 2016. № 5. С. 24—30.
12. Григорьев И. В., Григорьева О. И., Чураков А. А. Эффективные технологии и системы машин для малообъёмных заготовок древесины // Энергия: экономика, техника, экология. 2018. № 2. С. 61—66.
13. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation / I. Grigorev, V. Ivanov, G. Gasparian [et al.] // 14th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2014. Sofia, 2014. P. 443—446.
14. Григорьев И. В., Григорьев М. Ф., Степанова Д. И. Перспективы модульных систем машин для лесозаготовительного производства в Якутии // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 9 (35). С. 74—77.

15. Григорьев И. В., Чураков А. А. Совершенствование конструкции активного полуприцепа форвардера на базе сельскохозяйственного колёсного трактора // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2018. С. 84—88.
16. Григорьев И. В., Григорьева О. И., Вернер Н. Н. Системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 5 (31). С. 438—443.
17. Григорьев И. В. Параметры и показатели работы перспективного форвардера для малообъёмных лесозаготовок // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6, № 4 (40). С. 21—25.
18. Григорьев И. В., Рудов С. Е. Особенности эксплуатации колёсных лесных машин в сложных почвенно-грунтовых и рельефных условиях // Forest Engineering: Материалы научно-практич. конф. с междунар. участием. Якутск, 2018. С. 67—71.
19. Дмитриев А. С., Григорьев И. В. Преимущества использования колёсно-гусеничной ходовой части в качестве движителя для лесных машин // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: Материалы Всерос. научно-практич. конф. / Под ред. Ю. М. Казакова [и др.]. Казань, 2023. С. 27—30.
20. Дмитриев А. С., Кривошеев А. А. Оптимальные параметры колёсных тракторов для оснащения полугусеничным ходом // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Девятой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2023. С. 70—71.
21. Перспективы использования колёсных тракторов малого и среднего класса для тяги для выполнения лесохозяйственных работ / И. С. Должиков, О. А. Куницкая, А. А. Кривошеев [и др.] // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Девятой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2023. С. 75—76.
22. Управляемый межосевой механизм распределения мощности трансмиссии лесных колёсно-гусеничных машин / Р. Ю. Добрецов, А. С. Дмитриев, К. В. Черемисин [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 1 (57). С. 43—48.
23. Добрецов Р. Ю., Дмитриев А. С., Григорьев И. В. Проблемы и перспективы использования в лесном комплексе машин с полугусеничным движителем // Вестник АГАТУ. 2022. № 4 (8). С. 95—105.
24. Экологическая безопасность лесных машин на полугусеничном ходу / А. С. Дмитриев, И. С. Должиков, О. А. Куницкая [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 5. С. 44—51.
25. Теоретическое обоснование параметров движителя колёсно-гусеничной лесной машины / А. С. Дмитриев, И. С. Должиков, О. А. Куницкая [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 1 (61). С. 163—170.
26. Методика и результаты экспериментальных исследований воздействия лесных машин с гусеничным движителем на почвогрунты на склонах / Т. А. До, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 4. С. 64—84.
27. Планирование эксперимента при исследовании взаимодействия трелёвочной системы с волоком / И. В. Григорьев, М. В. Цыгарова, А. И. Жукова [и др.] // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 2. С. 47—54.

References

1. Nikiforova A. I., Khitrov E. G., Pelymsky A. A., Grigoreva O. I. Determination of precipitation during the movement of a logging machine on a two-layer base. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2014, no. 2 (139), pp. 87—91. (In Russ.)
2. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Zhukova A. I. Influence of shear deformations on the process of cyclic soil compaction. *Natural and technical sciences*, 2006, no. 1, pp. 174—180. (In Russ.)
3. Grigorev I. V. *Reduction of the negative impact on the soil of wheeled skidding tractors by substantiating their movement modes and technological equipment*. Saint Petersburg, LTA Publishing House, 2006. 236 p. (In Russ.)
4. Grigorev I. V., Zhukova A. I., Grigoreva O. I., Ivanov A. V. *Environmental technologies for the development of cutting areas in the conditions of the North-Western region of the Russian Federation*. Saint Petersburg, LTA Publishing House, 2008. 176 p. (In Russ.)
5. Grigorev I. V., Tikhonov I. I., Grigoreva O. I., Rudov M. E. Search for new technical solutions to improve the environmental compatibility of forest machines with the forest environment. *Intensification of the formation and protection of intellectual property: Materials of the republican scientific and practical conference dedicated to the 75th anniversary of PetrSU*. Petrozavodsk, 2015, pp. 9—11. (In Russ.)
6. Khitrov E. G., Khakhina A. M., Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Nikiforova A. I. Calculation of traction properties of wheeled forest machines using the WES method. *Forestry journal*, 2016, vol. 6, no. 3 (23), pp. 196—202. (In Russ.)
7. Nikiforova A. I., Grigoreva O. I. Modeling of the impact of forest machinery movers on the soils of cutting areas. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 5-4 (16-4), pp. 320—323. (In Russ.)
8. Grigorev I. V., Grigoreva O. I. Improving the environmental efficiency of forestry production. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2014, vol. 2, no. 3-4 (8-4), pp. 51—55. (In Russ.)
9. Nikiforova A. I., Grigoreva O. I., Kiselyov D. S., Khakhina A. M., Rudov M. E. Assessment of environmental safety of forest machinery. *Natural resources and ecology of the Far Eastern region: Materials of the International Scientific and Practical Forum*. Khabarovsk, 2013, pp. 134—138. (In Russ.)
10. Rudov S. E., Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Grigorev M. F., Grigoreva A. I. Efficiency of forest management in the cryolithozone. *Energy efficiency and energy conservation in modern production and society: Materials of the international scientific and practical conference*. Voronezh, 2020, pp. 460—463. (In Russ.)
11. Grigorev I. V., Grigoreva O. I. Efficiency of forest management in Russia. *Energy: economics, technology, ecology*, 2016, no. 5, pp. 24—30. (In Russ.)
12. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Churakov A. A. Effective technologies and machine systems for low-volume wood blanks. *Energy: economics, technology, ecology*, 2018, no. 2, pp. 61—66. (In Russ.)
13. Grigorev I., Ivanov V., Gasparian G., Nikiforova A., Khitrov E. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation. *14th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2014*. Sofia, 2014, pp. 443—446.
14. Grigorev I. V., Grigorev M. F., Stepanova D. I. Prospects of modular systems of machines for logging production in Yakutia. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2017, vol. 5, no. 9 (35), pp. 74—77. (In Russ.)
15. Grigorev I. V., Churakov A. A. Improving the design of an active forwarder semi-trailer based on an agricultural wheeled tractor. *Transport and transport-technological systems: Materials*

- of the International Scientific and Technical Conference. Ed. by N. S. Zakharov. Tyumen, 2018, pp. 84—88. (In Russ.)
16. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Werner N. N. Systems of machines for the creation and operation of forest plantations. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2017, vol. 5, no. 5 (31), pp. 438—443. (In Russ.)
 17. Grigorev I. V. Parameters and performance indicators of a promising forwarder for low-volume logging. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2018, vol. 6, no. 4 (40), pp. 21—25. (In Russ.)
 18. Grigorev I. V., Rudov S. E. Features of operation of wheeled forest machines in difficult soil-soil and relief conditions. *Forest Engineering. Materials of the scientific and practical conference with international participation*. Yakutsk, 2018, pp. 67—71. (In Russ.)
 19. Dmitriev A. S., Grigorev I. V. Advantages of using a wheeled-tracked undercarriage as an engine for forest machines. *Actual problems of forestry and wood processing: Materials of the All-Russian scientific and practical conference*. Ed. by Yu. M. Kazakov [et al.]. Kazan, 2023, pp. 27—30. (In Russ.)
 20. Dmitriev A. S., Krivosheev A. A. Optimal parameters of wheeled tractors for equipping with a half-track. *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the Ninth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2023, pp. 70—71. (In Russ.)
 21. Dolzhikov I. S., Kunitskaya O. A., Krivosheev A. A., Dmitriev A. S. Prospects of using wheeled tractors of small and medium class for traction to perform forestry work. *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the Ninth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2023, pp. 75—76. (In Russ.)
 22. Dobretsov R. Yu., Dmitriev A. S., Cheremisin K. V., Revyako S. I., Grigorev I. V. Controlled interaxle transmission power distribution mechanism of forest wheeled and tracked vehicles. *Systems. Methods. Technologies*, 2023, no. 1 (57), pp. 43—48. (In Russ.)
 23. Dobretsov R. Yu., Dmitriev A. S., Grigorev I. V. Problems and prospects of using machines with a semi-tracked propulsion in the forest complex. *Bulletin of AGATU*, 2022, no. 4 (8), pp. 95—105. (In Russ.)
 24. Dmitriev A. S., Dolzhikov I. S., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Ecological safety of forest machines on a half-track. *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*, 2023, no. 5, pp. 44—51. (In Russ.)
 25. Dmitriev A. S., Dolzhikov I. S., Kunitskaya O. A., Khitrov E. G., Dyachenko V. M., Shvetsov A. S. Theoretical substantiation of the parameters of the propulsion of a wheeled tracked forest machine. *Systems. Methods. Technologies*, 2024, no. 1 (61), pp. 163—170. (In Russ.)
 26. Do T. A., Grigorev G. V., Kalyashov V. A., Novgorodov D. V., Grigoreva O. I., Khitrov E. G. Methodology and results of experimental studies of the impact of forest machines with a caterpillar engine on soils on slopes. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 4, pp. 64—84. (In Russ.)
 27. Grigorev I. V., Tsygarova M. V., Zhukova A. I., Lepilin D. V., Esin G. Yu. Experiment planning in the study of the interaction of a skidding system with a fiber. *Bulletin of the Mari State Technical University. Series: Forest. Ecology. Environmental management*, 2011, no. 2, pp. 47—54. (In Russ.)