

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8643

УДК 630* 181.351

Статья

Экспериментальные исследования опорной проходимости колёсного движителя лесной машины при работе на склоне

Кривошеев Андрей Александрович

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

Бурмистрова Ольга Николаевна

*доктор технических наук, профессор, Ухтинский государственный
технический университет (Российская Федерация), olga.burm@mail.ru*

Куницкая Ольга Анатольевна

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

Задраускайте Наталья Олеговна

*кандидат технических наук, доцент, Северный (Арктический) федеральный
университет имени М. В. Ломоносова (Российская Федерация),
n.zadrauskaite@narfu.ru*

Рябухин Павел Борисович

*доктор технических наук, профессор, Тихоокеанский государственный
университет (Российская Федерация), 000340@ptu.edu.ru*

Рудов Сергей Евгеньевич

*кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный
химико-фармацевтический университет (Российская Федерация),
89213093250@mail.ru*

Получена: 15 мая 2025 / Принята: 30 октября 2025 / Опубликовано: 23 ноября 2025

Аннотация: В статье представлены методика и результаты лабораторных экспериментальных исследований, выполненных с целью верификации ранее разработанной математической модели для комплексной оценки проходимости колёсного движителя лесной машины, работающей на местности с уклоном, на пересечённой местности. Эти теоретические и экспериментальные исследования

направлены на изучение эксплуатационной и экологической эффективности валочно-трелёвочно-процессорных машин австрийской семейной компании Konrad Forsttechnik GmbH. В результате выполненных экспериментальных исследований определены допустимое давление движителя, а также несущая способность почвогрунта с учётом угла склона и выполнено сопоставление ранее полученных теоретических оценок. Установлено отклонение теоретических оценок от результатов экспериментов в меньшую сторону, допустимое с учётом статистической оценки распределения ошибок и погрешностей измерения. Показано, что уточнение расчётных моделей позволит развить положения теории движения лесных машин в условиях пересечённой местности, что особенно актуально в контексте дальнейших разработок по обоснованию параметров техники для условий пересечённой местности.

Ключевые слова: лесосечные работы; леса на склонах; экологическая эффективность; воздействие на почвогрунты

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8643

Article

Experimental studies of a wheeled propulsion system flotation of a forest vehicle operating on a slope

Andrey Krivosheev

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

Olga Burmistrova

D. Sc. in engineering, professor, Ukhta State Technical University (Russian Federation), olga.burm@mail.ru

Olga Kunitskaya

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

Natalia Zadrauskaite

Ph. D. in engineering, associate professor, Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov (Russian Federation), n.zadrauskaite@narfu.ru

Pavel Ryabukhin

D. Sc. in engineering, professor, Pacific State University (Russian Federation), 000340@pnu.edu.ru

Sergey Rudov

Ph. D. in engineering, associate professor, Saint Petersburg State University of Chemistry and Pharmacy (Russian Federation), 89213093250@mail.ru

Received: 15 May 2025 / Accepted: 30 October 2025 / Published: 23 November 2025

Abstract: The article presents the methodology and results of laboratory experimental studies performed to verify a previously developed mathematical model for a comprehensive assessment of a wheeled propulsion system maneuverability of a forest vehicle operating on a slope and rough terrain. These theoretical and experimental studies were aimed at studying the operational and environmental efficiency of roller-skidding-processing machines of the Austrian family company Konrad Forsttechnik GmbH. The authors determined the permissible pressure of the propulsion system and the soil bearing capacity, taking into account the slope angle, and compared the results with the previously obtained theoretical estimates. The downward bias of the theoretical estimates from the experimental results has been established as acceptable, taking into account the statistical assessment of the error distribution and measurement accuracy.

It is shown that computational models update will allow refining the theory of forest machines movement in rough terrain, which is especially important in the context of further developments to substantiate the parameters of equipment for rough terrain conditions.

Keywords: logging operations; forests on slopes; environmental efficiency; impact on soils

1. Введение

В результате моделирования [1] получены уравнения для определения допустимого веса w и давления p колёсного движителя на почвогрунт склона, его несущей способности p_s и тягово-сцепных свойств φ_P , φ_R , μ движителя валочно-трелёвочно-процессорной машины. Новизна полученных результатов состоит в комплексном учёте свойств почвогрунта, параметров воздействия колёсного движителя на грунт и угла склона β . Влияние последнего фактора на показатели проходимости и экологичности техники подлежит детальной проверке.

При составлении программы и планировании методики эксперимента учтём, что методической основой теоретических моделей являются положения [2], [3], апробированные ранее в исследованиях в области движения машин в условиях бездорожья и с учётом специфики условий работы лесной техники, в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства». Следовательно, при верификации результатов основное внимание следует обратить не столько на проверку качественного характера зависимостей, сколько на количественные оценки показателей взаимодействия движителя с почвогрунтом при варьировании угла воздействия, который следует контролировать как можно более строго [4—11].

С учётом вариативности свойств почвогрунта и изменчивости опорных поверхностей трасс движения лесных машин, а также положительного опыта предыдущих исследователей по определению показателей колееобразования и сцепных свойств движителя на основе стендовых испытаний [12—18] на настоящем этапе исследований считаем целесообразным провести верификацию теоретических разработок с использованием лабораторного стенда, позволяющего:

- регистрировать усилие вдавливания штампа q — модели движителя при варьировании угла воздействия;
- измерять осадку штампа z — модели при варьировании угла воздействия и определять участок изменения нагрузки, соответствующий потере грунтом несущей способности p_s ;
- измерять усилие сдвига F_τ , в т. ч. при срезе грунта, и определять сцепление штампа — модели μ со слоем экспериментального почвогрунта.

2. Материалы и методы

Общая схема лабораторного стенда приведена на рисунке 1.

Для проведения экспериментов использован эластичный штамп, моделирующий геометрические параметры движителя лесной машины с учётом геометрического подобия.

План экспериментов составлен с учётом рекомендаций работы [19], результатов исследований [12—18] и приведён в таблице 1.

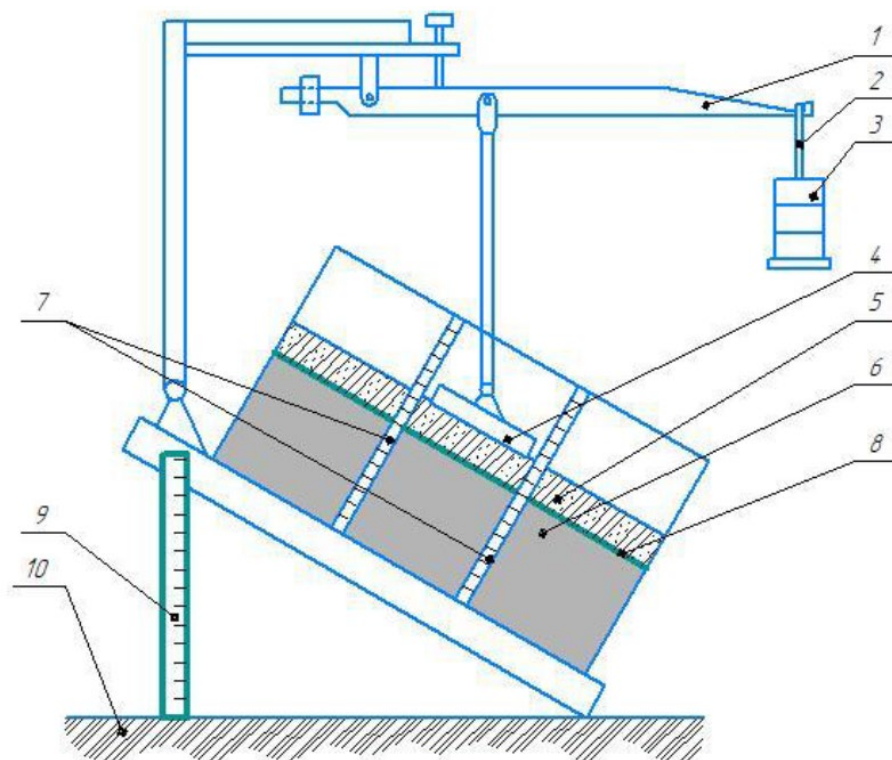


Рисунок 1. Лабораторный стенд для определения показателей взаимодействия штампа — модели движителя с почвогрунтом: 1 — рычаг; 2 — навеска; 3 — груз; 4 — штамп; 5 — верхний слой (щепа); 6 — слой грунта; 7 — линейки; 8 — металлическая пластина; 9 — планка для выставления наклона платформы; 10 — основание (стол) [рисунок авторов]

Figure 1. Laboratory bench for determining the parameters of the interaction of the stamp — model of the propulsion system interaction with the soil: 1 — lever; 2 — suspension; 3 — load; 4 — stamp; 5 — top layer (wood chips); 6 — soil layer; 7 — rulers; 8 — metal plate; 9 — bar for setting the tilt of the platform; 10 — base (table)

Для проведения экспериментов отбирались керны лесного почвогрунта в различном состоянии и с различной прочностью, которая предварительно оценивалась в полевых условиях при помощи зондирования [20]. В лабораторных условиях определяли модуль деформации E по методике, приведённой в работе [21].

Контролируемыми факторами в лабораторных опытах являлись:

- сила q , с которой модельный штамп воздействовал на экспериментальный почвогрунт (определялась с учётом соотношения плеч рычага 1 : 10 и веса эталонного груза);
- угол наклона поверхности почвогрунта, на который воздействовал модельный штамп ($\beta = 0^\circ \dots 35^\circ$).

Толщина слоя почвогрунта в лотке H составляла не менее 40 см, чтобы обеспечить выполнение условия $H \gg 2b$. Ширина лотка с грунтом B составляла 30 см, таким образом, $B \gg 2b$. Длина лотка L составляла 60 см.

Экспериментальный грунт b требуемого объема размещали в лотке 9 (см. рисунок 1). Вес эталонного груза 3 через рычаг 1 передавался на модельный штамп 4 . Далее нагрузка увеличивалась ступенями, в зависимости от оценки прочности почвогрунта. По результатам измерения перемещений штампа z, i , в зависимости от среднего давления p_i для экспериментального почвогрунта получали зависимости $z(p)$, по которым, в свою очередь, оценивали значения допустимого давления p и несущей способности p_s (пример на рисунке 2).

Таблица 1. План экспериментов по верификации теоретических разработок

Table 1. Experimental plan for theoretical developments verification

№ опыта	Почвогрунт и управляемые факторы	Целевая функция
1	Слабонесущий лесной почвогрунт ($E \approx 0,441$ МПа), вес модельного штампа q , угол наклона β	Допустимое давление по пятну контакта p , МПа
2	Слабонесущий лесной почвогрунт ($E \approx 0,484$ МПа), вес модельного штампа q , угол наклона β	Несущая способность p_s , МПа
3	Слабонесущий лесной почвогрунт ($E \approx 0,752$ МПа), вес модельного штампа q , угол наклона β	Допустимое давление по пятну контакта p , МПа
4	Слабонесущий лесной почвогрунт ($E \approx 0,750$ МПа), вес модельного штампа q , угол наклона β	Несущая способность p_s , МПа
5	Лесной почвогрунт средней прочности ($E \approx 1,234$ МПа), вес модельного штампа q , угол наклона β	Допустимое давление по пятну контакта p , МПа
6	Лесной почвогрунт средней прочности ($E \approx 1,246$ МПа), вес модельного штампа q , угол наклона β	Несущая способность p_s , МПа

Значения p, p_s определяли при помощи интерполяции по формулам:

$$p = \frac{p_{i+1} \left(\frac{0,2}{k} - z_i \right) - p_i \left(\frac{0,2}{k} - z_{i+1} \right)}{z_{i+1} - z_i}, \quad (1)$$

$$p_s = \frac{p_{i-1}(2b - z_{i-2}) - p_{i-2}(2b - z_{i-1})}{z_{i-1} - z_{i-2}}, \quad (2)$$

для расчёта по формуле (1) использовались результаты измерений в соседних узлах при условии, что $z_i \leq 0,2$ м, $z_{i+1} > 0,2$ м; по формуле (2) — в трёх соседних узлах при условии, что $z_{i-2} \leq 2b$, $z_{i-1} \leq 2b$, $z_i > 2b$.

Сходимость результатов теоретических расчётов с экспериментом проверим с учётом погрешностей измерительных приборов и распределения ошибок. Вначале вычислены относительные ошибки в каждом из измерений:

$$\delta = \left| \frac{y^{(\text{эксп})} - y^{(\text{теор})}}{y^{(\text{эксп})}} \right|, \quad (3)$$

где y — целевая функция, значения с верхним индексом (эксп) рассчитываются как средние арифметические результатов наблюдений в каждом опыте, значения с индексом с верхним индексом (теор) — по формулам [1] при подстановке переменных x в соответствующие теоретические формулы.

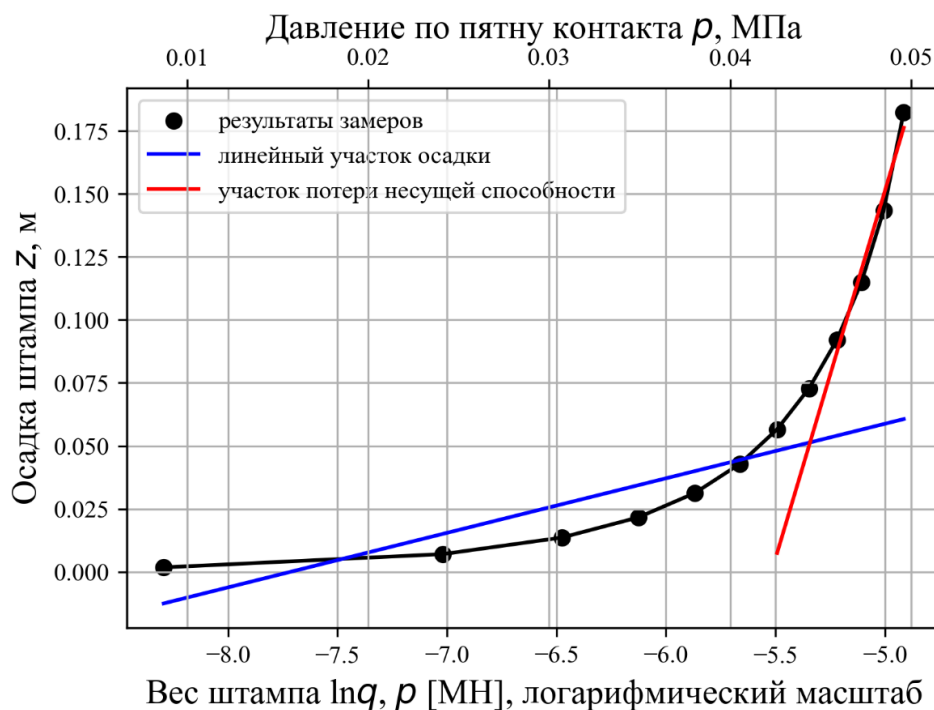


Рисунок 2. Пример графика осадки модельного штампа и определения несущей способности почвогрунта в лабораторных испытаниях [рисунок авторов]

Figure 2. An example of a model stamp immersion graph and the determination of the soil bearing capacity in laboratory tests

Для дальнейшего анализа необходимо проверить гипотезу о соответствии эмпирического закона распределения частот δ нормальному закону распределения. Для этого подсчитываются абсолютные частоты ошибок по интервалам, число интервалов определяется с округлением до целого по формуле

$$K = 1 + 3,2 \lg N, \quad (4)$$

где N — число наблюдений, шаг интервалов h :

$$h = \frac{R}{K} = \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{K}, \quad (5)$$

Рассчитаем значение ошибки в серединах интервалов:

$$\bar{\delta}_j = \delta_{\min} + \left(\frac{2j-1}{2} \right) h, \quad (6)$$

где j — номер интервала, $j = 1, 2, \dots, K$, а также параметры нормального распределения μ, σ :

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i, \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\delta_i - \mu)^2}. \quad (8)$$

Теоретические относительные частоты для нормального закона распределения определяются с учётом функции плотности и шага по формуле

$$\rho_j^{(\text{теор})} = h \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \frac{-(\bar{\delta}_j - \mu)^2}{2\sigma^2}. \quad (9)$$

Относительные частоты $\rho_j^{(\text{эмп})}$ для эмпирического закона распределения определяются непосредственно при подсчёте частот.

Воспользуемся критерием согласия Пирсона, гипотеза о соответствии эмпирического закона распределения теоретическому не отвергается в случае, если

$$\chi_{(\text{расч})}^2 \leq \chi_{(\text{крит})}^2, \quad (10)$$

где $\chi_{(\text{расч})}^2$ — расчётное значение статистики χ^2 по формуле

$$\chi_{(\text{расч})}^2 = \sum_{j=1}^K \left(\frac{\rho_j^{(\text{эмп})} - \rho_j^{(\text{теор})}}{\rho_j^{(\text{теор})}} \right)^2. \quad (11)$$

Критическое значение определяется с учётом числа параметров оцениваемого распределения (μ, σ), интервалов K и мощности критерия $\alpha = 0,05$.

В случае, если гипотеза о соответствии эмпирического закона распределения ошибок не отвергается, считаем, что ошибки вызваны случайными факторами, связанными с погреш-

ностями измерений, методикой эксперимента и изменчивостью свойств почвогрунта. В таком случае сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований можно подтвердить, сравнив фактические ошибки теории:

$$\Delta = \left| y_i^{(\text{теор})} - y_i^{(\text{эксп})} \right|, \quad (12)$$

где y — целевая функция, с их линейными оценками, связанными с погрешностью измерений для отдельных опытов:

$$\Delta = \sum_{k=1}^m \left| \frac{\partial}{\partial x_k} f(\mathbf{x})^{(\text{теор})} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_f} \varepsilon_k^{(\text{приб})}, \quad (13)$$

где $f(\mathbf{x})$ — формула для теоретического расчёта целевой функции, ε — погрешности измерения фактора x , влияющего на целевую функцию.

В ряде случаев для большей наглядности можно воспользоваться усреднённой оценкой ошибки:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{\prod_{k=1}^m (x_{k,\max} - x_{k,\min})} \int_{\Omega} \sum_{k=1}^m \left| \frac{\partial}{\partial x_k} f(\mathbf{x})^{(\text{теор})} \right| \varepsilon_k^{(\text{приб})} d\Omega, \quad (14)$$

где $d\Omega = dx_1 \dots dx_k$.

3. Результаты

Результаты экспериментов по определению допустимого давления движителя, а также несущей способности почвогрунта, с учётом угла склона и сопоставления теоретических оценок [1] с лабораторными данными, проиллюстрированы на рисунках 3—8.

Проверка гипотезы о соответствии распределения нормальному закону показала, что во всех опытах основание отвергать гипотезу выявлено не было. Таким образом, вывод об удовлетворительной сходимости теории с экспериментом можно сделать на основе сравнения отклонений по выражению (12) и параметра распределения σ по формуле (8).

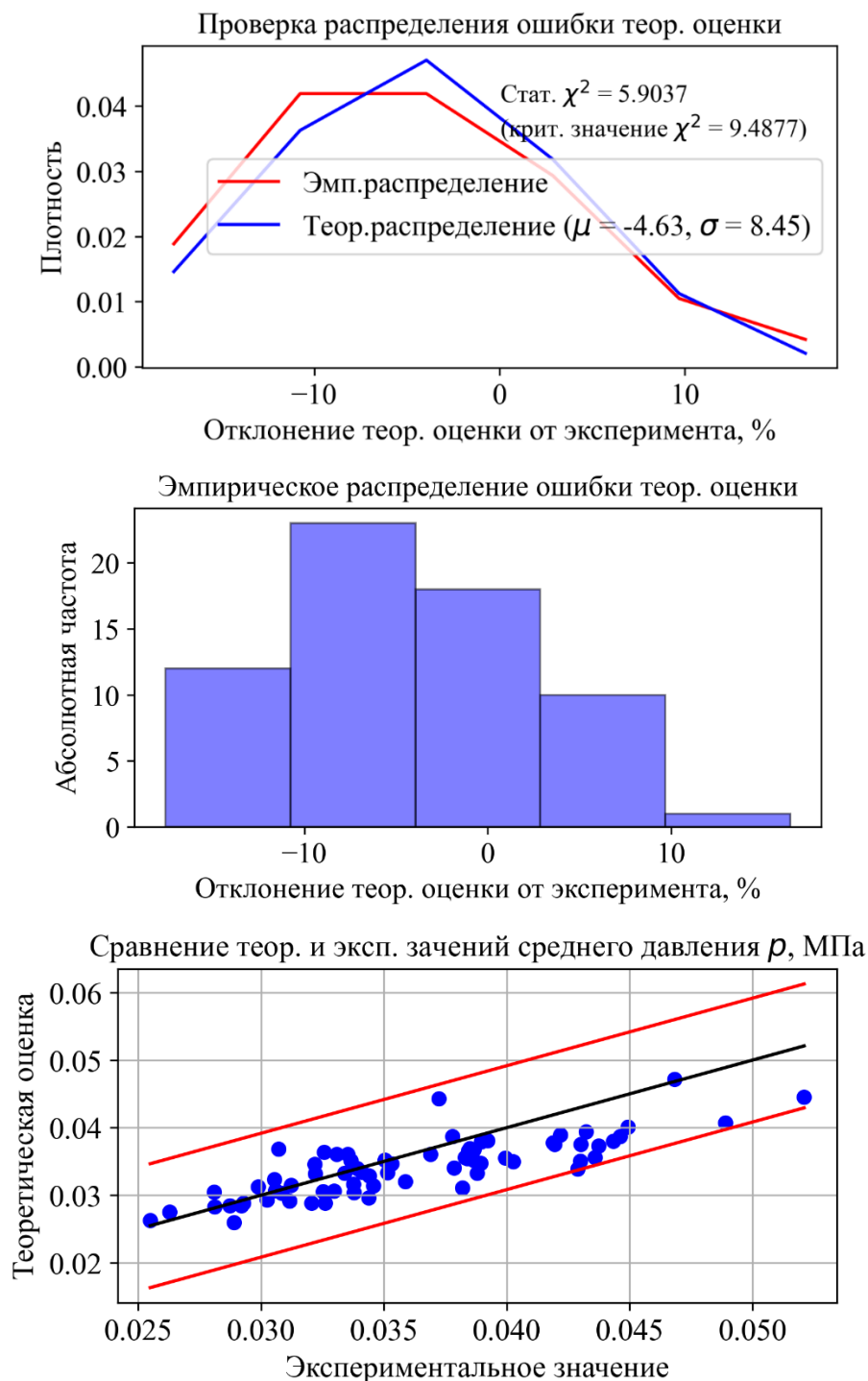


Рисунок 3. Распределение ошибок и сопоставление теории с экспериментом (опыт № 1) [рисунок авторов]

Figure 3. Error distribution and comparison of theory with experiment (experiment no. 1)

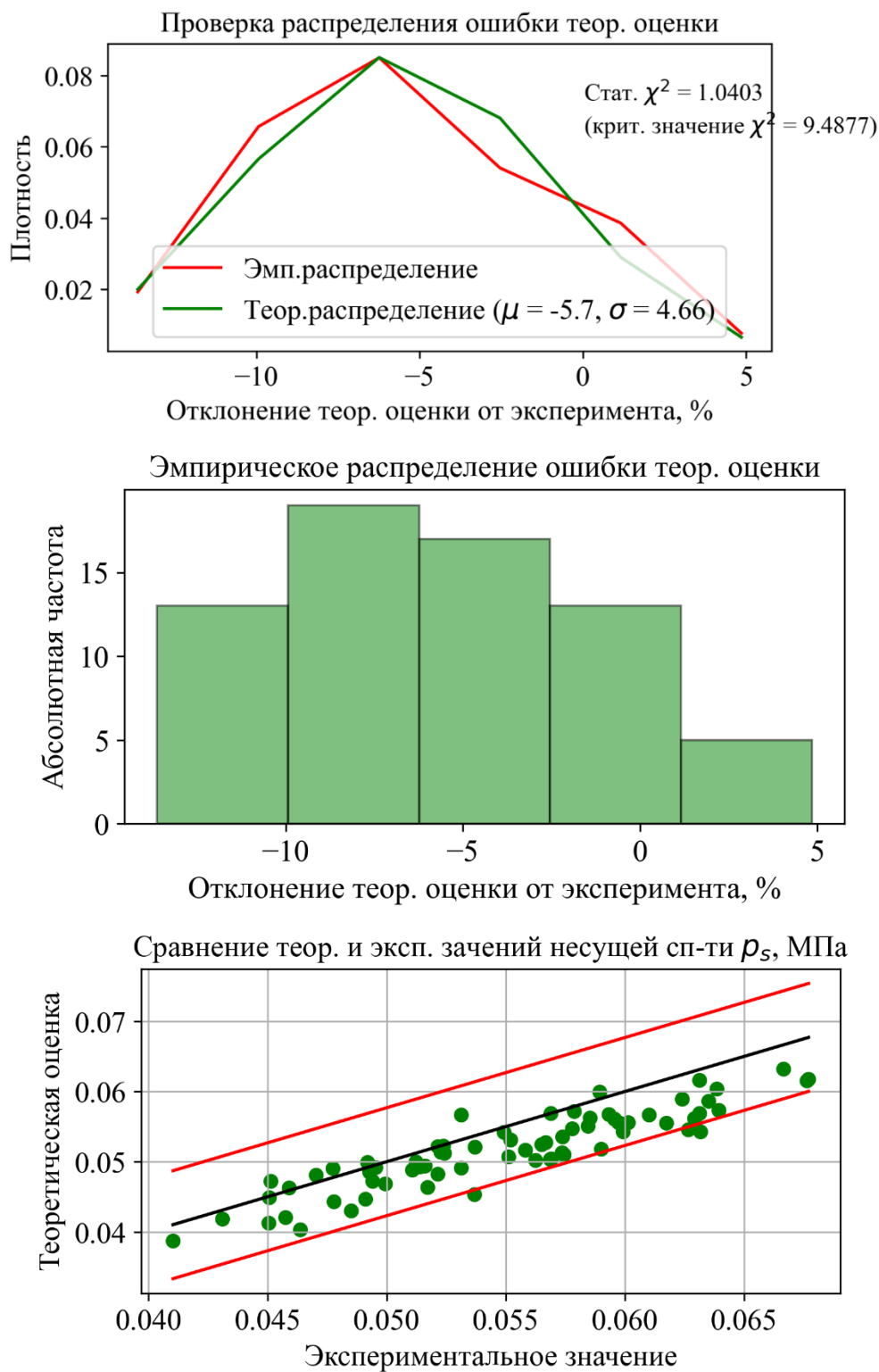


Рисунок 4. Распределение ошибок и сопоставление теории с экспериментом (опыт № 2) [рисунок авторов]

Figure 4. Error distribution and comparison of theory with experiment (experiment no. 2)

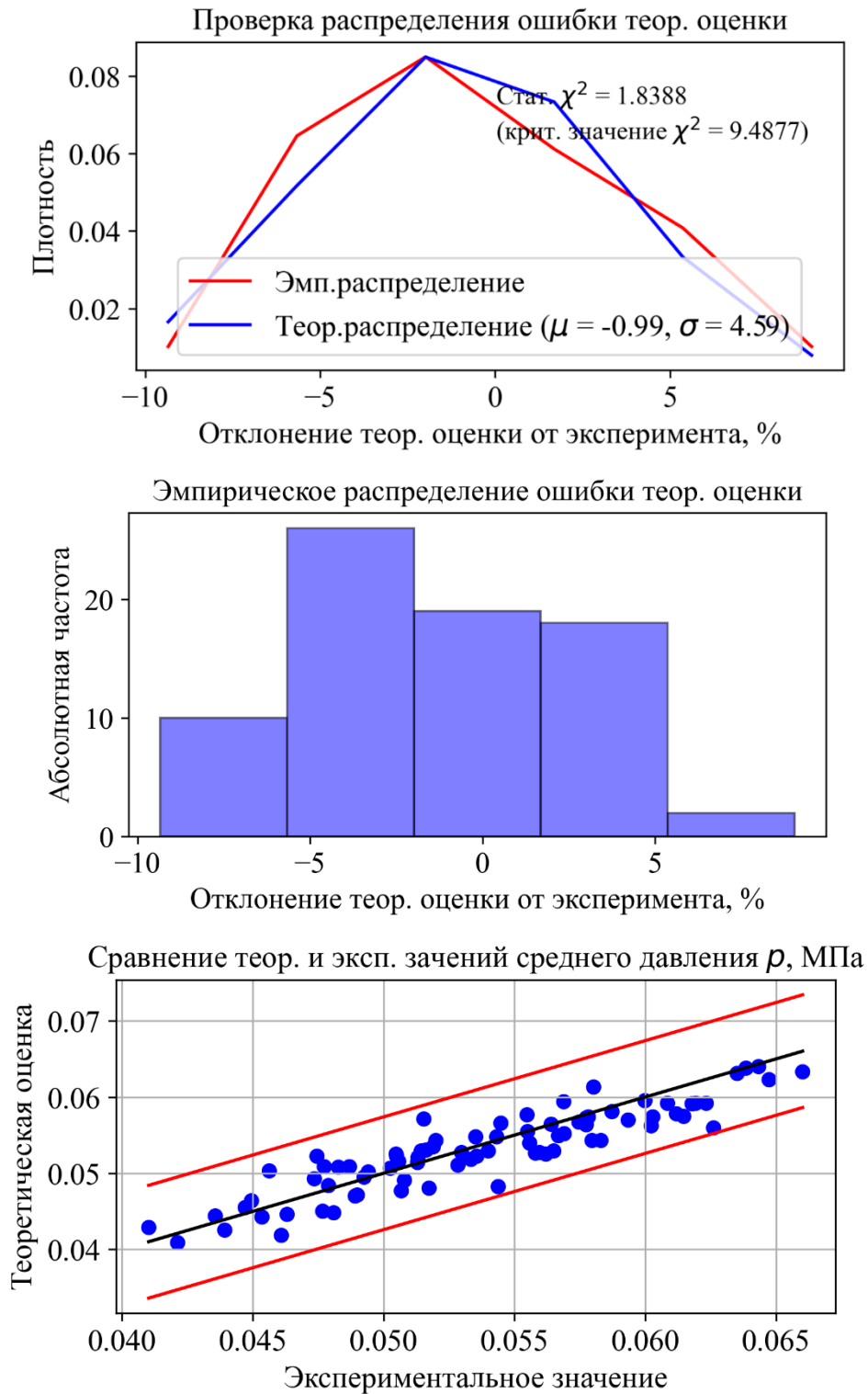


Рисунок 5. Распределение ошибок и сравнение теории с экспериментом (опыт № 3)
 [рисунок авторов]

Figure 5. Error distribution and comparison of theory with experiment (experiment no. 3)

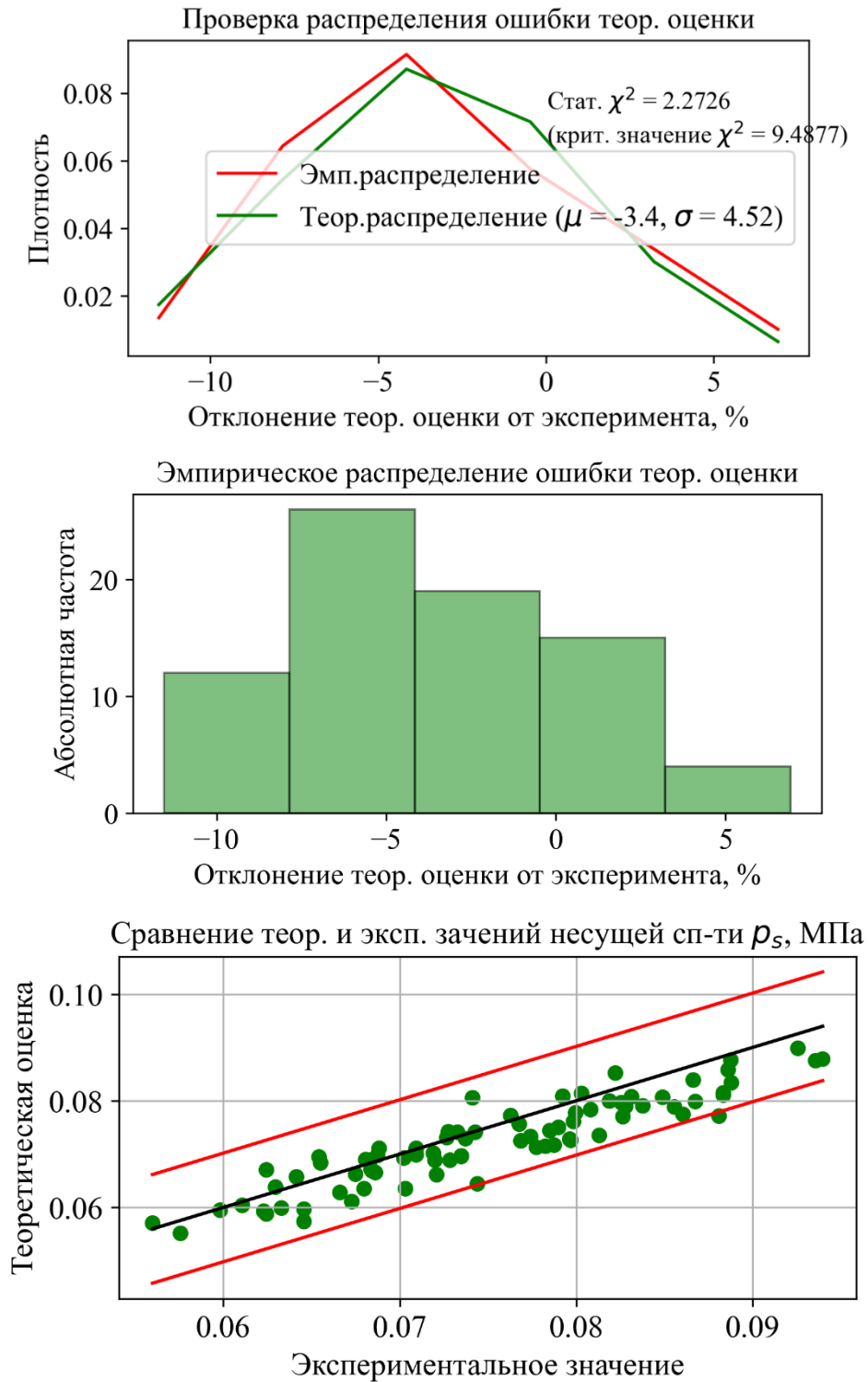


Рисунок 6. Распределение ошибок и сопоставление теории с экспериментом (опыт № 4) [рисунок авторов]

Figure 6. Error distribution and comparison of theory with experiment (experiment no. 4)

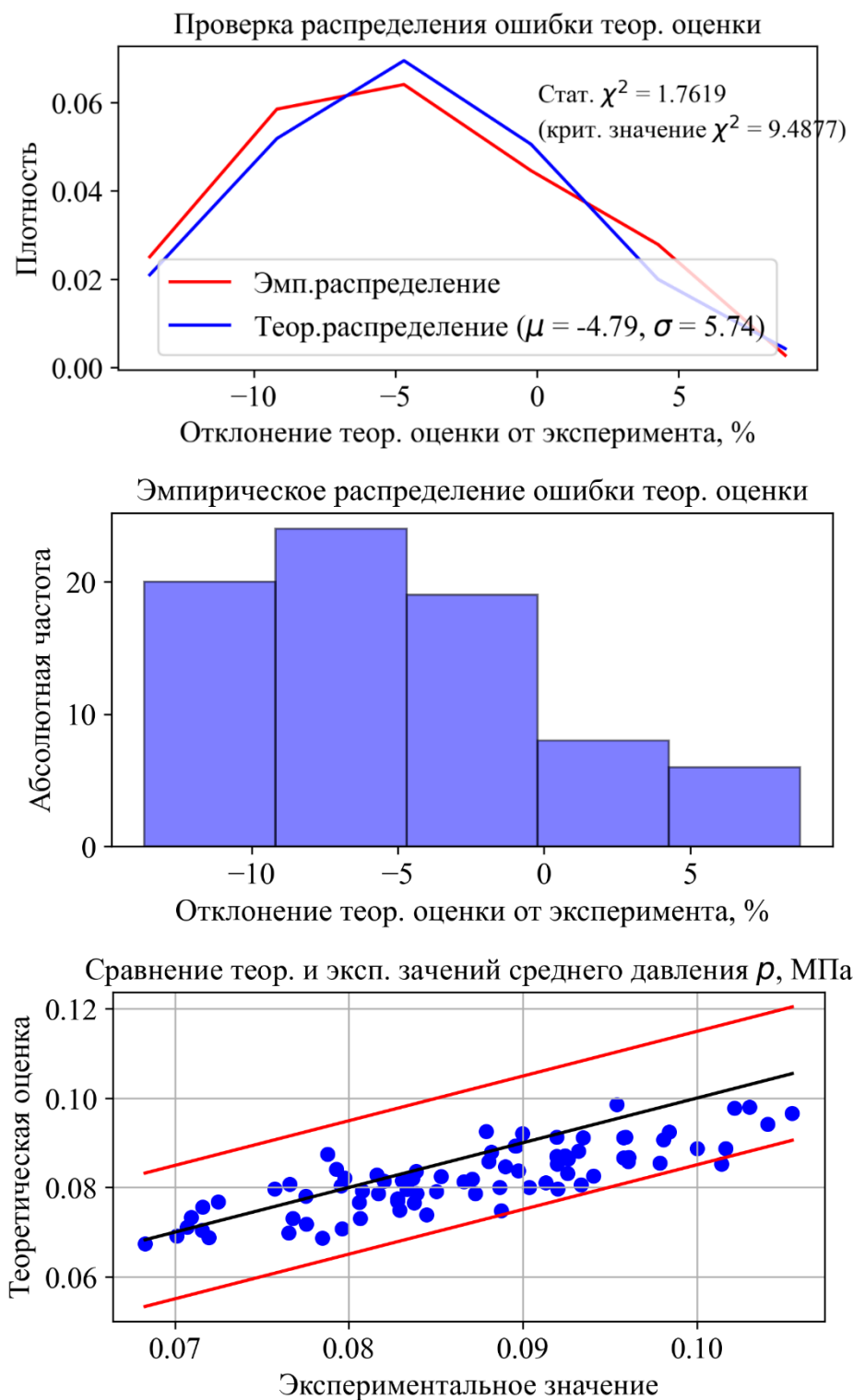


Рисунок 7. Распределение ошибок и сопоставление теории с экспериментом (опыт № 5) [рисунок авторов]

Figure 7. Error distribution and comparison of theory with experiment (experiment no. 5)

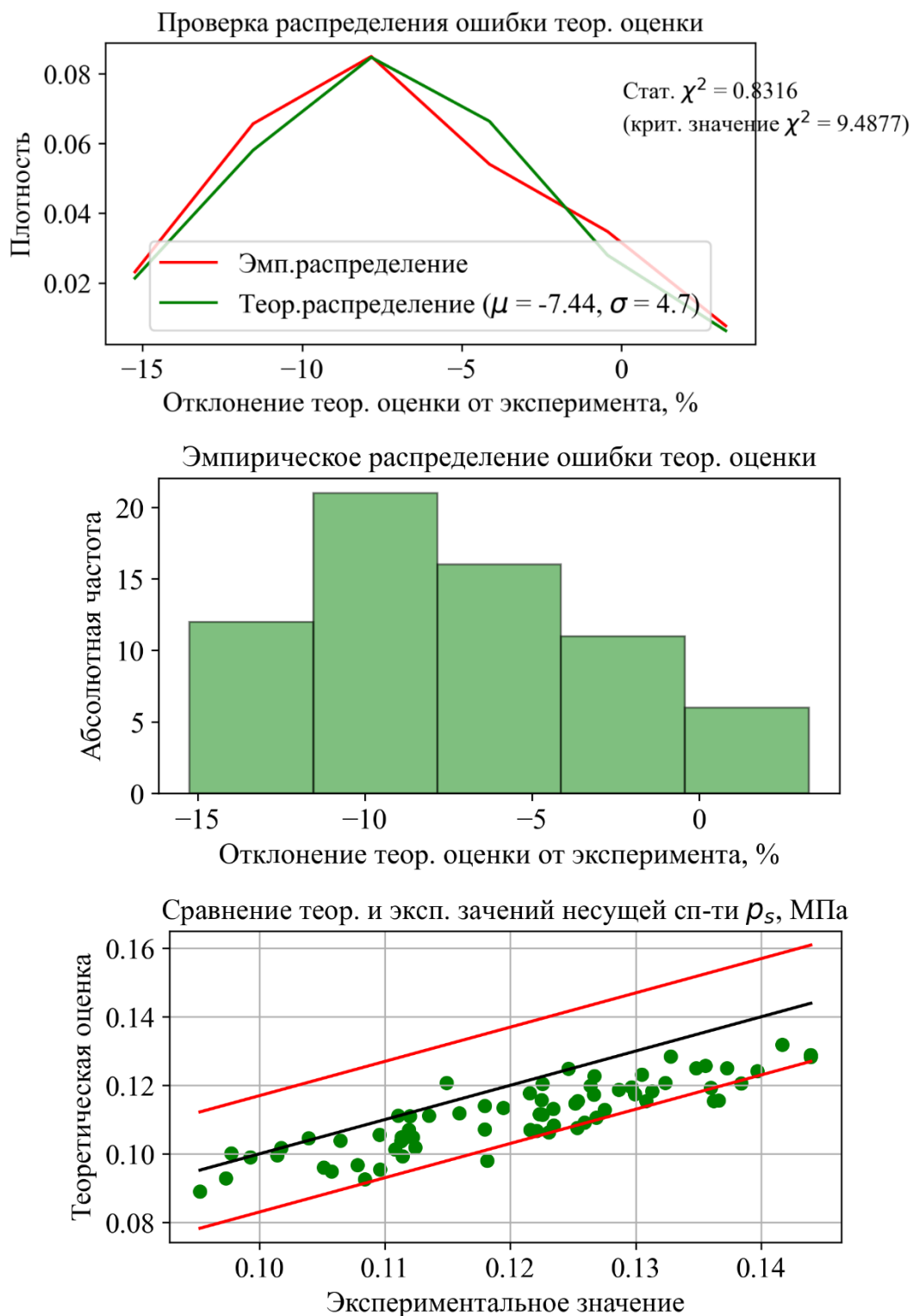


Рисунок 8. Распределение ошибок и сопоставление теории с экспериментом (опыт № 6) [рисунок авторов]

Figure 8. Error distribution and comparison of theory with experiment (experiment no. 6)

В таблице 2 для наглядности указаны параметры μ , σ нормально распределённых отклонений теоретических оценок от экспериментальных данных в каждом из опытов.

Таблица 2. Параметры распределения отклонений теоретических оценок от экспериментальных данных в каждом из опытов

Table 2. Distribution parameters of theoretical estimates deviations from experimental data in each of the experiments

№ опыта	1	2	3	4	5	6
μ , %	-4,63	-5,7	-0,99	-3,40	-4,79	-7,44
σ , %	8,46	4,66	4,59	4,52	5,74	4,70

Анализ статистик, указанных в таблице 2, результатов теоретических расчётов [1] и лабораторных замеров, приведённых на рисунках 3—8, позволяет сделать выводы:

При определении допустимого давления, с учётом угла действия нагрузки модельного штампа для слабонесущих почвогрунтов и лесных почвогрунтов средней прочности, отклонение теоретических оценок от экспериментальных данных находится в пределах 4,79 %; отклонение не превосходит доверительных границ варьирования экспериментальной величины ($\approx 3\sigma$ при уровне значимости 0,05).

При определении несущей способности, с учётом угла действия нагрузки модельного штампа для слабонесущих почвогрунтов и лесных почвогрунтов средней прочности, отклонение теоретических оценок от экспериментальных данных находится в пределах 7,44 %; отклонение не превосходит доверительных границ варьирования экспериментальной величины ($\approx 3\sigma$ при уровне значимости 0,05),

Поскольку лабораторные испытания позволили установить удовлетворительную сходимость результатов моделирования с экспериментальными наблюдениями, положения, касающиеся обоснования допустимых параметров воздействия колёсного движителя валочно-трелёвочно-процессорной машины на почвогрунт склона, возможно рекомендовать к использованию на практике.

При этом в опытах отмечается отклонение теоретических оценок от результатов экспериментов в меньшую сторону, допустимое с учётом статистической оценки распределения ошибок и погрешностей измерения, однако в дальнейших исследованиях целесообразно подробнее рассмотреть предпосылки к занижению теоретических оценок. Считаем, что уточнение расчётных моделей позволит развить положения теории движения лесных машин в условиях пересечённой местности, что особенно актуально в контексте дальнейших разработок по обоснованию параметров техники для условий пересечённой местности.

4. Выводы

Анализ результатов экспериментов и сопоставления теоретических и опытных сведений показал:

При определении допустимого давления, с учётом угла действия нагрузки модельного штампа для слабонесущих почвогрунтов и лесных почвогрунтов средней прочности, отклонение теоретических оценок от экспериментальных данных находится в пределах 4,79 %; отклонение не превосходит доверительных границ варьирования экспериментальной величины ($\approx 3\sigma$ при уровне значимости 0,05).

При определении несущей способности, с учётом угла действия нагрузки модельного штампа для слабонесущих почвогрунтов и лесных почвогрунтов средней прочности, отклонение теоретических оценок от экспериментальных данных находится в пределах 7,44 %; отклонение не превосходит доверительных границ варьирования экспериментальной величины ($\approx 3\sigma$ при уровне значимости 0,05).

С учётом результатов проверки гипотезы о нормальном распределении ошибок лабораторные испытания позволили установить удовлетворительную сходимость результатов моделирования с экспериментальными наблюдениями. Положения, касающиеся обоснования допустимых параметров воздействия колёсного движителя валочно-трелёвочно-процессорной машины на почвогрунт склона, возможно рекомендовать к использованию на практике.

С точки зрения дальнейших исследований, следует указать, что в опытах отмечается отклонение теоретических оценок от результатов экспериментов в меньшую сторону, допустимое с учётом статистической оценки распределения ошибок и погрешностей измерения, однако в дальнейших исследованиях целесообразно подробнее рассмотреть предпосылки к занижению теоретических оценок.

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

Список литературы

1. Теоретический анализ опорной проходимости колёсного движителя лесной машины при работе на склоне / А. А. Кривошеев, О. А. Куницкая, О. Н. Бурмистрова [и др.] // Лесотехнический журнал. 2024. Т. 14, № 4 (56). С. 187—207.
2. Агейкин Я. С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 231 с.
3. 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.
4. 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.

5. 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.
6. Уточнённая модель для оценки тягово-сцепных свойств колёсного движителя лесной машины / Е. Г. Хитров, А. М. Хахина, М. Н. Дмитриева [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. № 217. С. 108—119.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Моделирование уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелёвочного волока с учётом изменчивости трассы движения / В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, Д. В. Лепилин [и др.] // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2010. № 6 (111). С. 61—64.
12. Теоретические исследования влияния угла склона на несущую способность почвогрунта при работе лесных машин / А. До Туан, Н. И. Злобина, В. А. Каляшов [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 2. С. 18—27.
13. Обоснование технологических параметров, связанных с тягово-сцепными свойствами гусеничной машины, работающей на склоне / А. До Туан, Н. И. Злобина, В. А. Каляшов [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 2. С. 3—12.
14. Оценка тягово-сцепных свойств движителя лесной гусеничной машины, работающей на склоне / А. До Туан, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2 (54). С. 78—84.
15. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек / В. А. Каляшов, А. До Туан, Е. Г. Хитров [и др.] // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 2. С. 1—47.
16. Теоретические исследования работы лесных машин с гусеничным движителем на склонах / А. До Туан, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 3. С. 1—29.
17. Методика и результаты экспериментальных исследований воздействия лесных машин с гусеничным движителем на почвогрунты на склонах / А. До Туан, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов [и др.] // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 4. С. 64—84.
18. Современные технические решения для обеспечения безопасной работы лесных машин на горных склонах / В. А. Каляшов, А. До Туан, О. И. Григорьева [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 2. С. 11—25.
19. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2012. 816 с.

20. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. ГОСТ 19912-2012.
21. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия. ГОСТ 12248.4-2020.

References

1. Krivosheev A. A., Kunitskaya O. A., Burmistrova O. N., Morkovin V. A., Guryev A. Yu., Andronov A. V. Theoretical analysis of the basic maneuverability of a wheeled propulsion system of a forest vehicle when working on a slope. *Forestry Journal*, 2024, vol. 14, no. 4 (56), pp. 187—207. (In Russ.)
2. Ageikin Ya. S. *Vehicle maneuverability*. Moscow, Mechanical Engineering, 1981. 231 p. (In Russ.)
3. Grigorev I. V., Tsygarova M. V., Zhukova A. I., Lepilin D. V., Yesin G. Yu. Planning an experiment 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.)
4. Nikiforova A. I., Grigoreva O. I., Kiselyov D. S., Khakhina A. M., Rudov M. E. Assessment of the 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.)
5. Nikiforova A. I., Grigoreva O. I. Modeling of the impact of forest machinery propellers on the soils of logging areas. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 5-4 (16-4), pp. 320—323. (In Russ.)
6. Khitrov E. G., Khakhina A. M., Dmitrieva M. N., Peskov V. B., Grigorieva O. I. A refined model for evaluating the traction properties of a wheeled propulsion system of a forest vehicle. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Academy*, 2016, no. 217, pp. 108—119. (In Russ.)
7. Nikiforova A. I., Khitrov E. G., Pelymsky A. A., Grigorieva 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.)
8. Grigorev I. V., Tikhonov I. I., Grigoreva O. I., Rudov M. E. Search for new technical solutions to improve the ecological 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.)
9. Khitrov E. G., Khakhina A. M., Grigorev I. V., Grigorieva O. I., Nikiforova A. I. Calculation of traction properties of wheeled forestry machines using the WES method. *Forestry Engineering Journal*, 2016, vol. 6, no. 3 (23), pp. 196—202. (In Russ.)
10. Nikiforova A. I., Grigoreva O. I., Kiselev D. S., Khakhina A. M., Rudov M. E. Environmental safety assessment 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.)
11. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Lepilin D. V., Zhukova A. I. Modeling of soil compaction in the lateral lanes of a skidding portage, taking into account the variability of the traffic route. *Scientific Notes of Petrozavodsk State University*, 2010, no. 6 (111), pp. 61—64. (In Russ.)
12. Do Tuan 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 operation of forest machinery. *Woodworking industry*, 2022, no. 2, pp. 18—27. (In Russ.)

13. Do Tuan A., Zlobina N. I., Kalyashov V. A., Novgorodov D. V., Grigorieva O. I., Khitrov E. G. Justification of technological parameters related to traction properties of a tracked vehicle operating on a slope. *Woodworking industry*, 2022, no. 2, pp. 3—12. (In Russ.)
14. Do Tuan A., Grigorev G. V., Kalyashov V. A., Novgorodov D. V., Grigorieva O. I., Khitrov E. G. Evaluation of the traction properties of the propulsion of a forest tracked vehicle operating on a slope. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 2 (54), pp. 78—84. (In Russ.)
15. Kalyashov V. A., Do Tuan A., Khitrov E. G., Grigorieva O. I., Guryev A. Yu., Novgorodov D. V. Modern machine systems and technologies for harvesting wood and reforestation in mountain cutting areas. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 1—47. (In Russ.)
16. Do Tuan A., Grigorev G. V., Kalyashov V. A., Guryev A. Yu., Grigorieva O. I., Khitrov E. G. Theoretical studies of the operation of forest vehicles with a tracked propulsion system slopes. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 3, pp. 1—29. (In Russ.)
17. Do Tuan A., Grigorev G. V., Kalyashov V. A., Novgorodov D. V., Grigorieva O. I., Khitrov E. G. Methodology and results of experimental studies of the impact of forest vehicles with a caterpillar engine on soils on slopes. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 4, pp. 64—84. (In Russ.)
18. Kalyashov V. A., Do Tuan A., Grigoreva O. I., Guryev A. Yu., Novgorodov D. V. Modern technical solutions to ensure safe operation forest machinery on mountain slopes. *Occupational safety and health in logging and woodworking industries*, 2022, no. 2, pp. 11—25. (In Russ.)
19. Kobzar A. I. *Applied mathematical statistics. For engineers and researchers*. Moscow, Fizmatlit Publishing House, 2012. 816 p. (In Russ.)
20. Soils. Methods of field testing by static and dynamic sensing. GOST 19912-2012. (In Russ.)
21. Soils. Determination of deformability characteristics by compression compression method. GOST 12248.4-2020. (In Russ.)

© Кривошеев А. А., Бурмистрова О. Н., Куницкая О. А.,
Задраускайте Н. О., Рябухин П. Б., Рудов С. Е., 2025