

УДК 625.8

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7323

Статья

## **Экспериментальное исследование воздействия двигателя лесной машины на укреплённое композитное основание**

**Зорин Максим Владимирович**

*аспирант, Воронежский государственный лесотехнический университет  
им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), [mr.maks489@yandex.ru](mailto:mr.maks489@yandex.ru)*

**Должиков Илья Сергеевич**

*кандидат технических наук, преподаватель, Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет (Российская Федерация),  
[idolzhikov222@mail.ru](mailto:idolzhikov222@mail.ru)*

**Юдилевич Александр Михайлович**

*аспирант, Братский государственный университет (Российская Федерация),  
[kafedra388@mail.ru](mailto:kafedra388@mail.ru)*

**Кривошеев Андрей Александрович**

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

**Куницкая Ольга Анатольевна**

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

**Михайлова Люция Михайловна**

*аспирант, Арктический государственный агротехнологический университет  
(Российская Федерация), [lyutsiya.losotova@mail.ru](mailto:lyutsiya.losotova@mail.ru)*

*Получена: 28 августа 2023 / Принята: 18 января 2024 / Опубликовано: 1 февраля 2024*

---

**Аннотация:** В последние годы крупные и средние лесопромышленные компании начали существенно выравнивать объёмы заготовки древесины по сезонам, переходя практически на круглогодичную заготовку и вывозку древесины, не считая периодов закрытия дорог на просушку. Это связано с необходимостью равномерного внесения платежей за используемые ими банковские продукты,

в т. ч. на приобретение лесных машин, такие как кредит и лизинг. При этом можно объективно наблюдать результаты глобального потепления климата. Например, согласно данным статистики, за период с 1980 по 2020 г., т. е. за 40 лет, период устойчивой зимней вывозки древесины на Северо-Западе России сократился почти на 3 недели, а это очень существенно. Важно отметить, что потепление — это не значит, что жаркое лето и тёплая зима. Вполне может быть холодное лето с максимумом осадков и маломорозная, малоснежная зима. Также становится всё более характерным размытие межсезонных периодов. Иначе говоря, тепло и сыро может теперь быть практически круглый год. Проблему быстрого строительства временной дорожной сети в сложных условиях при помощи сборно-разборных покрытий научились решать достаточно давно. Однако процесс воздействия движителя машины на укреплённое композитное основание, представляющее собой синтетический дорожный мат и подстилающий лесной почвогрунт, до сих пор не изучен. В статье приведены методика, аппаратура и результаты экспериментальной проверки математической модели взаимодействия колёсного штампа-двигателя с двуслойной опорной поверхностью, модели деформируемой плиты, размещённой на податливом (винклеровском) основании.

**Ключевые слова:** лесные дороги; сборно-разборные дорожные покрытия; композитное дорожное основание; первичный транспорт леса; лесосечные работы

---

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7323

*Article*

## **Experimental study of the forest machine mover impact on the reinforced composite base**

**Maxim Zorin**

*Ph. D. student, Voronezh State Forestry Engineering University named after G. F. Morozov (Russian Federation), [mr.maks489@yandex.ru](mailto:mr.maks489@yandex.ru)*

**Ilya Dolzhikov**

*Ph. D. in engineering, lecture, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Russian Federation), [idolzhikov222@mail.ru](mailto:idolzhikov222@mail.ru)*

**Alexander Yudilevich**

*Ph. D. student, Bratsk State University (Russian Federation), [kafedra388@mail.ru](mailto:kafedra388@mail.ru)*

**Krivosheev Andrey**

*Ph. D. student, Ukhta State Technical University (Russian Federation), [ugtukrivosheev@mail.ru](mailto:ugtukrivosheev@mail.ru)*

**Olga Kunitskaya**

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

**Lucia Mikhailova**

*Ph. D. student, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), [lyutsiya.losotova@mail.ru](mailto:lyutsiya.losotova@mail.ru)*

*Received: 28 August 2023 / Accepted: 18 January 2024 / Published: 1 February 2024*

---

**Abstract:** In recent years, large and medium-sized timber companies have begun to significantly equalize the volume of timber harvesting by season, switching almost to round-the-year harvesting and removal of wood, not counting the periods of road closures for drying. This is due to the need for uniform payments for the banking products they use, including for the purchase of forest machines, such as credit and leasing. At the same time, it is possible to objectively observe the results of global climate warming. For example, according to statistics, for the period from 1980 to 2020, i. e. for 40 years, the period of stable winter timber removal in the North-West of Russia has decreased by almost 3 weeks, and this is very significant. It is important to note that warming does not mean hot summers and warm winters. It may well be a cold summer

with maximum precipitation and a frost-free, snow-free winter. The blurring of off-season periods is also becoming more and more characteristic. In other words, it can now be warm and damp almost all year round. The problem of rapid construction of a temporary road network in difficult conditions, with the help of collapsible coatings, has been learned to solve for a long time. However, the process of the forest machine mover impact on the reinforced composite base, which is a synthetic road mat and the underlying forest soil has not yet been studied. The article presents the methodology, equipment and results of experimental verification of a mathematical model of interaction of a wheel die-mover with a two-layer support surface, a model of a deformable plate placed on a pliable (Winkler) base.

**Keywords:** forest roads; collapsible road surfaces; composite road base; primary forest transport; logging operations

---

## 1. Введение

Лесозаготовительное производство в Российской Федерации является наименее прибыльной отраслью лесной промышленности, в связи с чем очень многие лесозаготовительные предприятия вошли в структуры комплексных лесопромышленных предприятий [1]. Во многом это связано с дорожными проблемами, возникающими при выполнении транспортных операций, к которым относятся трелёвка (первичный транспорт леса) и вывозка заготовленной древесины [2], [3]. Более половины территории лесного фонда РФ располагается на почвогрунтах III категории, работа на которых в тёплый период года затруднена ввиду резкого падения их несущей способности [4—7]. При этом многие крупные и средние лесозаготовительные предприятия всё больше вынуждены выравнивать объём лесозаготовок по сезонам, ввиду необходимости равномерного обслуживания используемых ими банковских продуктов (кредит, лизинг), благодаря которым они в т.ч. закупают необходимые машины и оборудование [1], [8], [9]. В результате всё большие объёмы заготовки древесины приходится на тёплые периоды года, что в условиях преобладания слабонесущих почвогрунтов или оттаивающего в тёплый период верхнего слоя вечной мерзлоты приводит к чрезмерным воздействию на лесные экосистемы и нагрузкам на лесные машины [10], [11].

Эксплуатационная эффективность лесных машин оценивается рядом показателей: производительность, энергоёмкость работы, удельная нагруженность систем, узлов и деталей машины, коэффициент технической готовности [12], [13]. При большой динамике колееобразования нагрузки в трансмиссиях лесных машин и расход топлива существенно увеличиваются, эксплуатационная эффективность снижается [14], [15]. Глубокие колеи в лесных массивах служат очагами водной и ветровой эрозии, что приводит к резкому снижению устойчивости лесной экосистемы и снижению производительности последующей сукцессии [16], [17]. Следовательно, и экологическая эффективность снижается. Чрезмерное воздействие на лесную среду от работы лесных машин на почвогрунтах со слабой несущей способностью приводит не только к сиюминутным потерям ввиду лишнего расхода топлива и более частых ремонтов машин, но и к долгосрочным затратам на восстановление леса в сильно повреждённой лесной экосистеме [18—21].

В связи с этим часто остро необходимы быстро монтируемые (и быстро демонтируемые) сборно-разборные покрытия, эффективно защищающие почвогрунты от чрезмерного негативного воздействия. Их использование будет способствовать повышению как экологической, так и эксплуатационной эффективности лесных машин на трелёвке и вывозке заготовленной древесины.

## 2. Материалы и методы

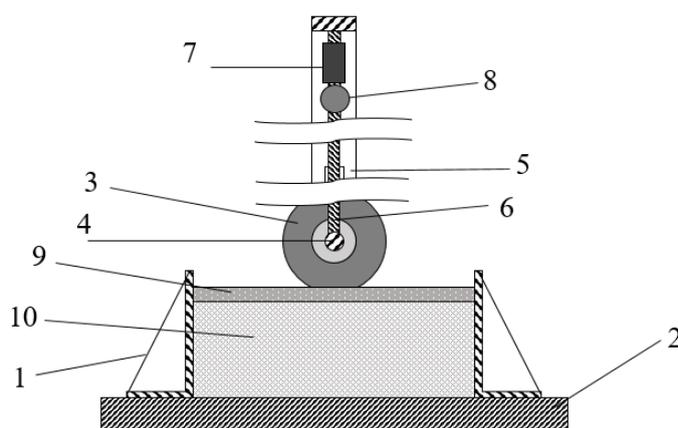
Основной целью экспериментальных исследований являлась проверка результатов, полученных при теоретическом моделировании воздействия движителя машины

на укрепленное композитное основание, представляющее собой синтетический дорожный мат и подстилающий лесной почвогрунт.

Прогиб дорожного мата под внешней нагрузкой, характеризуемой средним давлением по пятну контакта. Прогиб и является оценкой глубины колеи  $h$ , образующейся в лесном грунте при движении машины. Составленная ранее математическая модель использует такие величины, как толщина дорожного мата  $H_0$ , среднее давление по пятну контакта  $p$  и несущая способность лесного грунта  $p_s$ .

Ввиду вариативности свойств лесного почвогрунта и сложности измерения прогиба непосредственно в полевых условиях, было принято решение о проведении лабораторных испытаний. Использование методов теории подобия при обосновании параметров стенда сложно из-за нелинейной связи несущей способности лесного грунта, геометрических параметров пятна контакта и нагрузки на эластичный движитель, в связи с чем стенд спроектирован и выполнен в масштабе 1:1; таким образом, результаты измерений будут соответствовать натурным.

Схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1. Экспериментальный стенд смонтирован на базе кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет» при участии в исследованиях, проводимых в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства».



**Рисунок 1.** Экспериментальный стенд для определения прогиба дорожного мата: 1 — стенки лотка, 2 — жёсткое основание, 3 — эластичный штамп, 4 — вал, 5 — направляющие, 6 — шток, 7 — динамометр, 8 — механизм создания усилия, 9 — дорожный мат, 10 — почвогрунт в лотке [рисунок авторов]

**Figure 1.** Experimental stand for determining the deflection of the road mat: 1 — tray walls, 2 — rigid base, 3 — elastic stamp, 4 — shaft, 5 — guides, 6 — rod, 7 — dynamometer, 8 — force creation mechanism, 9 — road mat, 10 — soil in the tray

Металлический лоток с усиленными стенками (1) жёстко смонтирован на бетонном основании (2), эластичный штамп, представляющий собой колесо (3), размещён на валу (4) и перемещается в плоскости вертикальных направляющих (5) с возможностью фиксации, шток (6) передаёт усилие  $G_w$ , создаваемое рычажным домкратом (7) непосредственно при вдавливании штампа. Величина создаваемого усилия  $G_w$  контролируется по показаниям динамометра сжатия (8).

Экспериментальный материал, представляющий собой секцию синтетического дорожного мата (9) и подстилающий лесной почвогрунт (10), размещён в металлическом лотке (1).

Прогиб дорожного мата определяется по мерной шкале, нанесённой на направляющие (5), как разность положения нижней точки вала (4) в свободном (под собственным весом) и нагруженном состоянии.

Стенд был рассчитан на испытания с использованием штампа-колеса с внешним диаметром  $d \approx 1,333$  м и шириной шины  $b \approx 0,7$  м (стандартные параметры для лесных машин). Глубина распространения деформаций в массиве почвогрунта приближённо равна  $H \approx 2b$ , при этом боковые деформации затухают более резко. С учётом отмеченного, а также перспективы замены штампа на более габаритный высота стенок лотка составляет 1,7 м, длина по бортам 2,1 м. Такие размеры позволяют свободно укладывать секцию синтетического дорожного мата на лесной почвогрунт, размещённый в лотке. Лоток представляет собой сварную стальную конструкцию со стенками, усиленными дополнительными распорками.

Для создания усилия  $G_w$  выбран механический реечный домкрат Nordicwind (б/м) с грузоподъёмностью 10 т и усилием на ручке 122,5 кН. Ход рейки домкрата составляет 300 мм, что полностью отвечает условиям опытов, поскольку случаи прогиба синтетического мата свыше 0,2 м не представляют интереса с точки зрения практики (при образовании колеи свыше 0,2 м лесной грунт, в большинстве случаев, теряет несущую способность).

Электронный динамометр сжатия FB100k 100kN (10 т) 20N позволяет оперативно фиксировать создаваемое усилие с возможностью записи данных на microSD-носитель.

Штамп выполнен на основе колеса форвардера Ponsse Buffalo с пневматической шиной 600/55-26,5 20PR tianli forestry flotation HF-2 TL, внешний диаметр  $d = 1344$  мм, ширина профиля  $b = 610$  мм по документации, внутреннее давление  $p_w = 0,35$  МПа.

Экспериментальный параметр  $H_0$  управляется непосредственно выбором дорожного мата, укладываемого на почвенно-грунтовое основание. В экспериментах при определении его характеристик ориентировались на сведения производителя. Параметр  $p$  управляется изменением усилия  $G_w$ , сообщаемого через рычаг, при этом учитывается эластичность колеса:

$$h_z = \frac{G_w}{\pi p_w \sqrt{bd}} \quad (1)$$

где  $d$  — диаметр колеса,  $b$  — ширина пятна контакта, принимаемая равной ширине шины,  $p_w$  — давление в шине,  $h_z$  — радиальная деформация колеса, влияющая на длину пятна контакта  $l$ :

$$l = 2\sqrt{h_z d - h_z^2}, \quad (2)$$

тогда среднее давление:

$$p = \frac{G_w}{bl} = \frac{G_w}{2b \sqrt{\left(\frac{G_w}{\pi p_w \sqrt{bd}}\right) d - \left(\frac{G_w}{\pi p_w \sqrt{bd}}\right)^2}}, \quad (3)$$

Несущая способность  $p_s$  является производной величиной и зависит от фундаментальных механических характеристик почвогрунта  $C$ ,  $\varphi$  и параметров пятна контакта  $b$ ,  $l$ , глубины распространения деформаций  $H$  и непосредственно деформации грунта  $h$ . Эти факторы влияют на  $p_s$  в разной степени, и в теоретических расчётах, с учётом развития вычислительных средств, пренебрегать частью из них нет необходимости. В экспериментах, с учётом изменчивости свойств грунта, следует выделить наиболее важные параметры, позволяющие оценить  $p_s$  с точностью, достаточной для практики.

Воспользуемся следующими соображениями. Поскольку прогиб мата, по условиям эксперимента, не превосходит 0,2 м, влиянием деформации почвогрунта  $h$  на  $p_s$  можно пренебречь. Близкое к единице соотношение сторон пятна контакта для колёсного движителя отмечается на сравнительно прочных лесных почвогрунтах; жёсткость дорожного мата выше, через него же воздействие штампа передаётся на экспериментальный почвогрунт в опытах. По этим причинам в формулах для расчёта несущей способности можно принять  $b \approx l$ .

Влияние удельного веса  $\gamma$  на  $p_s$  мало даже в теории.

Тогда для оценки несущей способности в эксперименте можем воспользоваться упрощёнными формулами:

$$p_s = 0,5J_1 N_1 \gamma b + J_3 N_3 C, \quad (4)$$

где параметры внутреннего трения:

$$S = \operatorname{tg} \frac{\pi - 2\varphi}{4}, N_1 = \frac{1 - S^4}{S^5}, N_3 = 2 \frac{1 + S^2}{S^3}, \quad (5)$$

и геометрии:

$$J_1 = \frac{b}{b + 0,4b} \approx 0,714, J_3 = \frac{b + b}{b + 0,5b} \approx 1,333, \quad (6)$$

удельный вес лесного грунта примем  $\gamma = 0,0085 \text{ МН/м}^3$  (среднее значение для трёх категорий прочности), тогда окончательно для оценки  $p_s$  в эксперименте получим:

$$p_s = 0,00304 \frac{1 - S^4}{S^5} b + 2,667 \frac{1 + S^2}{S^3} C, \quad (7)$$

Таким образом, в опытах  $p_s$  определяется расчётным путём по результатам замера удельного сцепления  $C$  и угла внутреннего трения почвогрунта  $\varphi$ . Для определения удельного сцепления используется полевой сдвигомер-крыльчатка (тип III) (ГОСТ 20276.5-2020 Грунты. Метод вращательного среза), для определения угла внутреннего трения используется пенетромтр статического действия ПСГ-МГ4. Измерения проводятся непосредственно перед укладкой синтетического мата на подготовленный лесной грунт.

Суть эксперимента заключается в следующем. После подготовки экспериментального лесного грунта (10) в лотке (1), включающей его выравнивание с использованием строительного правила и контроль механических свойств, на поверхности грунта размещается фрагмент синтетического дорожного мата (9) размером  $2,0 \times 1,4$  м. Штамп (3) опускается до контакта с поверхностью мата (9), фиксируется положение вала (4), результат измерения положения нижней точки вала отмечается в журнале. После этого вал (4) отпускается и далее штамп (3) вдавливаются под собственным весом (200 кг) и действием усилия от реечного домкрата (7) с регистрацией показаний динамометра (8). При достижении заданной отметки динамометра (8) вал (4) вновь фиксируется и регистрируется положение его нижней точки. Разность показаний по шкале на направляющих (5) представляет собой прогиб синтетического мата (9) — целевую функцию эксперимента. После окончания экспериментов грунт (10) в лотке (1) рыхлится, далее вновь происходит его подготовка к следующему наблюдению.

При необходимости снизить прочностные свойства происходит увлажнение грунта (10).

Для оценки сходимости результатов, во-первых, оценим влияние погрешностей измерения экспериментальных величин на целевую функцию.

Предположим, ранее составленная математическая модель верна, а различия объясняются лишь погрешностями измерений экспериментальных величин. Вычислим линеаризованную оценку погрешности измерений на стенде. Для этого необходимо оценить сумму [22]:

$$\Delta_y = \sum_{j=1}^N \left| \frac{\partial y}{\partial x_j} \right| \Delta_{x_j}, \quad (8)$$

где  $y$  — измеряемая величина как функция экспериментальных факторов  $x$ ,  $j$  — номер фактора,  $N$  — число факторов,  $\Delta$  — абсолютная ошибка.

Для наглядности представим результаты в относительных величинах:

$$\delta_y = \left( \frac{1}{y} \sum_{j=1}^N \left| \frac{\partial y}{\partial x_j} \right| \Delta_{x_j} \right) \cdot 100\%, \quad (9)$$

Примем следующие относительные погрешности величин в опытах:

Величина	$b$	$d$	$p_w$	$G_w$	$H_0$	$C$	$\varphi$
$\delta \cdot 100 \%$	5	5	5	1	5	1,5	1,5

В таблице 1 приведены условия проведения экспериментов, а также результаты оценки относительной погрешности целевой функции, обусловленной погрешностями измерения экспериментальных величин.

**Таблица 1.** Условия проведения опытов и оценка влияния погрешности измерений на целевую функцию (прогиб синтетического мата)

**Table 1.** Experimental conditions and evaluation of measurement error effect on the target function (deflection of synthetic mat)

№	$b$ , м	$d$ , м	$p_w$ , МПа	$G_w$ , МН	$H_0$ , м	Кат. грунта	$\delta \cdot 100 \%$	Примечание
1	0,61	1,341	0,35	0,0196	0,04	II	11,0	$C \approx 0,012$ МПа, $\varphi \approx 15^\circ$ ступени нагрузки соотв. 2, 4, 6 тс
2	0,61	1,341	0,35	0,0392	0,04	II	11,1	
3	0,61	1,341	0,35	0,0589	0,104	II	11,8	
4	0,61	1,341	0,35	0,0196	0,02	II	10,9	
5	0,61	1,341	0,35	0,0196	0,104	III	11,5	$C \approx 0,005$ МПа, $\varphi \approx 11^\circ$ , увлажнённый грунт
6	0,61	1,341	0,35	0,0392	0,104	III	11,6	

Как показала линеаризованная оценка, отклонение теоретических результатов от эксперимента в пределах 11—12 % может быть обусловлено конструкцией стенда и методикой эксперимента, что, с учётом вариативности свойств лесного грунта, следует признать хорошим показателем. Это обстоятельство будем учитывать при оценке качества теоретических разработок.

Более строгим, чем линеаризованная оценка погрешности, критерием сходимости является совпадение теоретических и экспериментальных данных и их совпадение в пределах доверительных границ варьирования экспериментальной величины при повторных наблюдениях в опытах. Для применения критерия необходимо установить соответствие закона распределения экспериментальных наблюдений гауссову распределению.

Выдвигается гипотеза о соответствии распределения случайной величины гауссову закону. Вариационный ряд результатов повторных наблюдений в каждом опыте делится на интервалы, число которых принимается по формуле [23]:

$$K = [1 + 3,32 \lg n], \quad (10)$$

где  $n$  — число наблюдений.

Далее вычисляются плотности относительных частот результатов наблюдений [23]:

$$p_k = \frac{n_k}{sn}, \quad (11)$$

где  $k$  — порядковый номер интервала,  $s$  — шаг интервалов [23]:

$$s = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{K}, \quad (12)$$

Рассчитывается теоретическое распределение плотностей относительных частот при гауссовом распределении [23]:

$$p_k^{\text{теор}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y_{\text{средн},k} - \mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (13)$$

где  $\mu$ ,  $\sigma$  — параметры гауссова распределения, совпадающие со средним арифметическим и выборочным стандартным отклонением [23]:

$$\mu = y_{\text{средн}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (14)$$

$$\sigma = S = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y_{\text{средн}})^2}{1 - n}}. \quad (15)$$

Расчётное значение критерия согласия Пирсона определяется по формуле [23]:

$$\chi_{\text{расч}}^2 = \sum_{k=1}^K \frac{(p_k - np_k^{\text{теор}})^2}{np_k^{\text{теор}}}, \quad (16)$$

Гипотеза о соответствии распределения гауссовому распределению отвергается в том случае, когда [23]:

$$\chi_{\text{расч}}^2 > \chi_{\text{крит}}^2, \quad (17)$$

где  $\chi_{\text{крит}}^2$  — табличное значение критерия Пирсона при заданном уровне значимости и числе степеней свободы.

Если же неравенство (17) не выполняется, то гипотеза не отвергается, и далее распределение считается гауссовым.

Достаточность количества выполненных наблюдений устанавливается соблюдением неравенства [23]:

$$n \geq \sqrt{\frac{t^2 v^2}{\alpha^2}}, \quad (18)$$

где  $t$  — значение двусторонней  $t$ -статистики Стьюдента при заданном уровне значимости  $\alpha$  и числе степеней свободы,  $v$  — коэффициент вариации [23]:

$$v = \frac{S}{y_{\text{средн}}}. \quad (19)$$

Оценка доверительных границ варьирования экспериментальной величины даётся формулой [23]

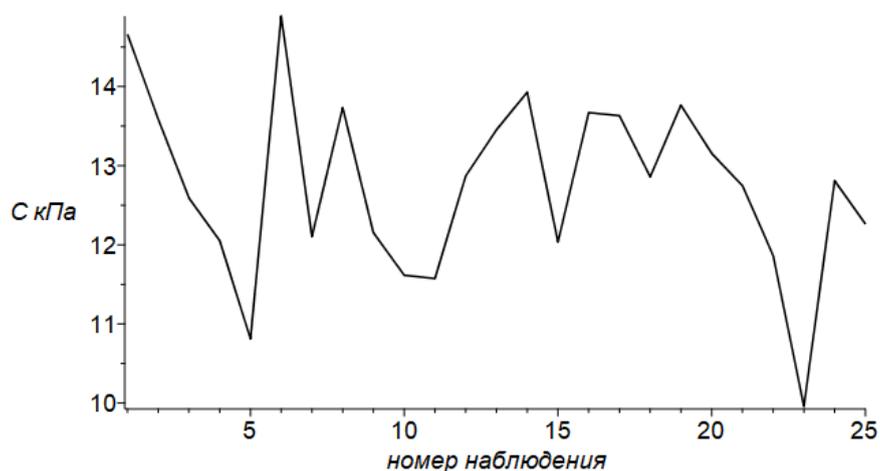
$$y_{\text{средн}} - St \leq y \leq y_{\text{средн}} + St, \quad (20)$$

В том случае, если результаты теоретического моделирования отклоняются от экспериментальных данных на величины, лежащие в пределах  $\pm St$ , можем сделать вывод об удовлетворительной сходимости теории и эксперимента.

### 3. Результаты

Подробно проиллюстрируем результаты проведённых опытов на примере опыта № 1, а также изложим сводные данные по всем опытам.

На рисунке 2 показаны результаты измерения удельного сцепления экспериментального лесного грунта, выполненного при помощи полевого сдвигомера-крыльчатки.



**Рисунок 2.** Результаты измерения удельного сцепления грунта по наблюдениям в опыте № 1 [рисунок авторов]

**Figure 2.** The results of measuring the specific adhesion of the soil according to observations in experiment No. 1

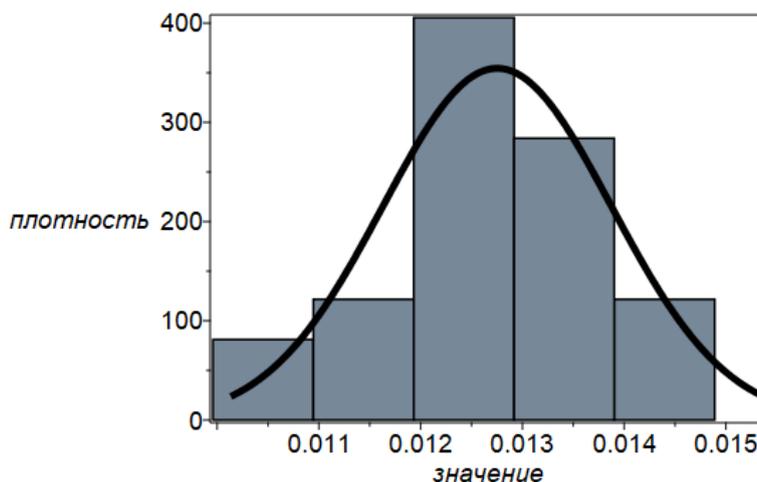
Как показывает график, несмотря на разброс данных, наблюдения, в целом, повторяют оценку удельного сцепления для лесного грунта II категории прочности  $C = 0,012$  МПа (таблица 2).

Гистограмма и теоретическая кривая плотности относительных частот удельного сцепления грунта в опыте № 1 представлены на рисунке 3.

**Таблица 2.** Результаты экспериментальных исследований, опыт № 1 (лесной грунт II категории прочности,  $H_0 = 40$  мм,  $G_w = 0,0196$  МН соотв. 2 тс)

**Table 2.** Results of experimental studies, experiment No. 1 (forest soil of strength category II,  $H_0 = 40$  mm,  $G_w = 0.0196$  MN, respectively. 2 vehicles)

№	$C$ , МПа	$\varphi$ , °	$p_s$ , МПа	$h_{\text{теор}}$ , м	$h_{\text{эксп}}$ , м	$\varepsilon$ , %
1	0,0147	15,2	0,1479	0,13497	0,134	0,7
2	0,0136	15,1	0,1371	0,14554	0,124	17,4
3	0,0126	13,9	0,1209	0,16509	0,123	34,2
4	0,0121	17,2	0,1349	0,14791	0,135	9,6
5	0,0108	16,3	0,1171	0,17047	0,186	8,3
6	0,0149	15,5	0,1521	0,13118	0,132	0,6
7	0,0121	17,0	0,1342	0,14866	0,169	12,0
8	0,0137	15,9	0,1436	0,13893	0,156	10,9
9	0,0122	15,5	0,1258	0,15861	0,151	5,0
10	0,0116	16,8	0,1280	0,15590	0,179	12,9
11	0,0116	15,5	0,1199	0,16642	0,163	2,1
12	0,0129	15,0	0,1294	0,15427	0,158	2,4
13	0,0135	18,1	0,1556	0,12825	0,106	21,0
14	0,0139	15,4	0,1421	0,14043	0,109	28,8
15	0,0120	17,0	0,1332	0,14982	0,123	21,8
16	0,0137	13,6	0,1287	0,15510	0,173	10,3
17	0,0136	15,1	0,1377	0,14489	0,157	7,7
18	0,0129	14,3	0,1254	0,15911	0,136	17,0
19	0,0138	14,2	0,1332	0,14985	0,134	11,8
20	0,0132	14,6	0,1298	0,15381	0,161	4,5
21	0,0127	16,1	0,1348	0,14806	0,143	3,5
22	0,0119	17,3	0,1333	0,14969	0,180	16,8
23	0,0100	15,0	0,1022	0,19527	0,224	12,8
24	0,0128	16,0	0,1353	0,14754	0,176	16,2
25	0,0123	14,6	0,1215	0,16428	0,159	3,3

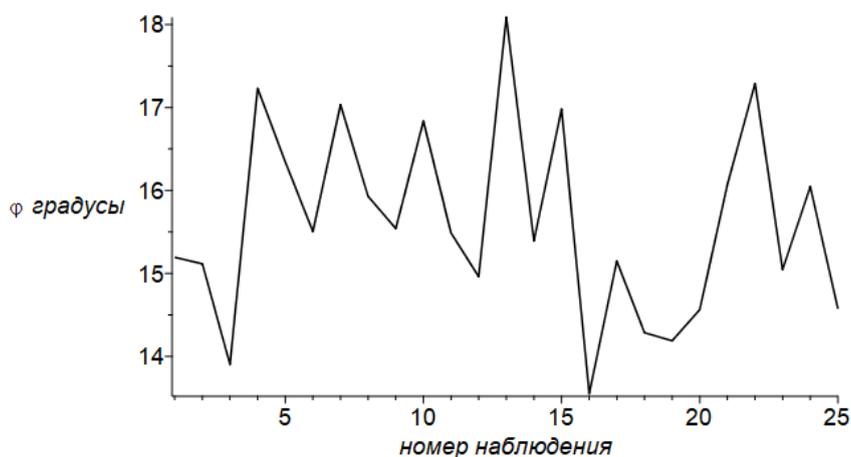


**Рисунок 3.** Гистограмма и теоретическая кривая плотности относительных частот удельного сцепления грунта в опыте № 1 [рисунок авторов]

**Figure 3.** Histogram and theoretical density curve of relative frequencies of specific soil adhesion in experiment No. 1

Расчёт критерия согласия Пирсона показал, что оснований отвергать гипотезу о гауссовом распределении результатов измерения удельного сцепления нет,  $\chi^2_{\text{расч.}} = 0,4 < \chi^2_{\text{крит.}} = 9,4877$ .

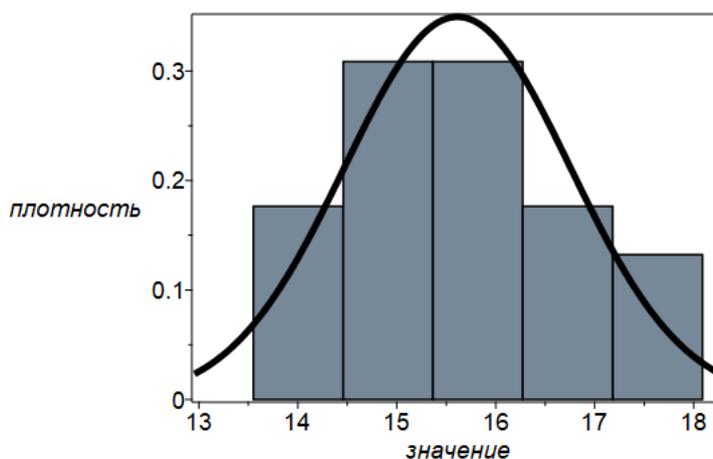
На рисунке 4 представлены результаты измерения угла внутреннего трения экспериментального лесного почвогрунта, выполненного при помощи статического пенетрометра.



**Рисунок 4.** Результаты измерения угла внутреннего трения почвогрунта по наблюдениям в опыте № 1 [рисунок авторов]

**Figure 4.** The results of measuring the angle of internal friction of the soil according to observations in experiment No. 1

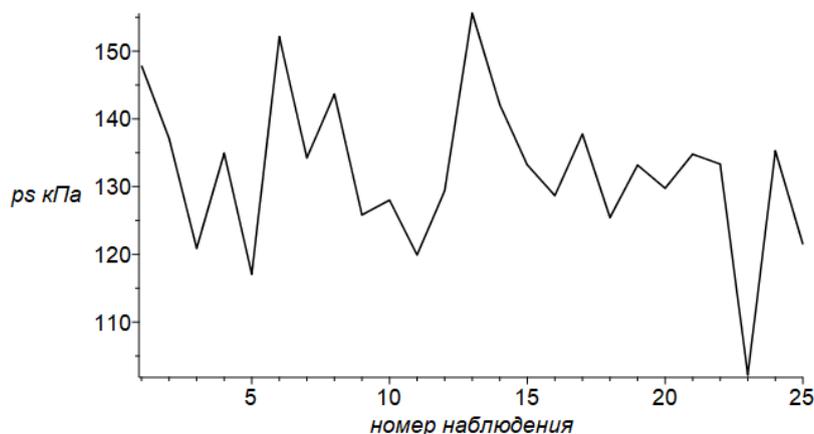
Гистограмма и теоретическая кривая плотности относительных частот угла внутреннего трения почвогрунта в опыте № 1 представлены на рисунке 5.



**Рисунок 5.** Гистограмма и теоретическая кривая плотности относительных частот угла внутреннего трения почвогрунта в опыте № 1 [рисунок авторов]

**Figure 5.** Histogram and theoretical curve of the density of relative frequencies of the angle of internal friction of the soil in experiment No. 1

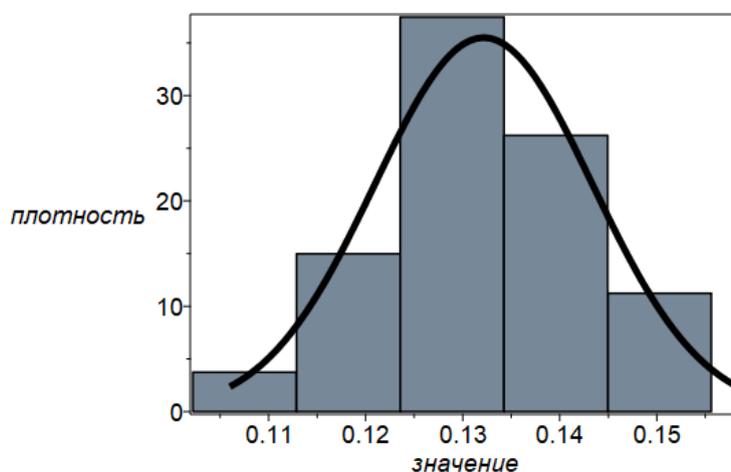
Расчёт критерия согласия Пирсона показал, что оснований отвергать гипотезу о гауссовом распределении результатов измерения угла внутреннего трения также нет,  $\chi^2_{\text{расч.}} = 0,8 < \chi^2_{\text{крит.}} = 9,4877$ . Результаты несущей способности почвогрунта, величины производной от удельного сцепления и угла внутреннего трения, проиллюстрированы на рисунке 6.



**Рисунок 6.** Результаты расчёта несущей способности почвогрунта по наблюдениям в опыте № 1 [рисунок авторов]

**Figure 6.** The results of the calculation of the bearing capacity of the soil according to observations in experiment No. 1

Гистограмма и теоретическая кривая плотности относительных частот производной экспериментальной величины в опыте № 1 представлены на рисунке 7.



**Рисунок 7.** Гистограмма и теоретическая кривая плотности относительных частот несущей способности почвогрунта в опыте № 1 [рисунок авторов]

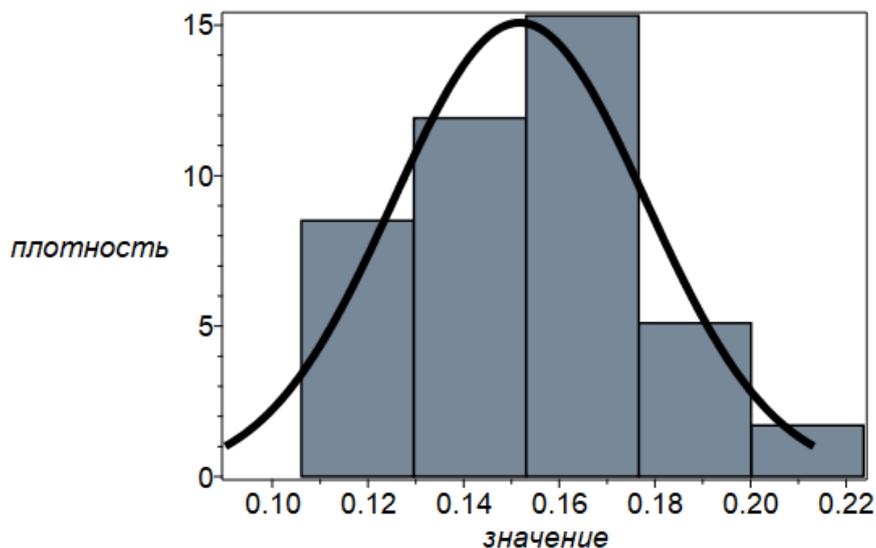
**Figure 7.** Histogram and theoretical curve of the density of relative frequencies of the bearing capacity of the soil in experiment No. 1

В случае с несущей способностью расчёт критерия согласия Пирсона также показал, что оснований отвергать гипотезу об её гауссовом распределении не выявлено,  $\chi^2_{\text{расч.}} = 2,8 < \chi^2_{\text{крит.}} = 9,4877$ . Перед проверкой сходимости теории с экспериментом в опыте убедимся в распределении прогиба синтетического мата. Гистограмма и теоретическая кривая плотности относительных частот прогиба в опыте № 1 представлены на рисунке 8.

Оснований отвергать гипотезу о гауссовом распределении прогиба в опыте № 1 не выявлено:  $\chi^2_{\text{расч.}} = 0,4 < \chi^2_{\text{крит.}} = 9,4877$ . На рисунке 9 для наглядности сопоставлены графики, иллюстрирующие результаты измерения прогиба синтетического мата в опыте № 1 с лесным почвогрунтом II категории прочности и результаты расчёта, выполненные с учётом толщины мата  $H_0 = 40 \text{ мм} = 0,04 \text{ м}$  по составленной ранее математической модели; при этом несущая способность  $p_s$  рассчитана на основе экспериментальных значений  $C$ ,  $\varphi$  по формуле (7), а среднее давление  $p$  — по формуле (3).

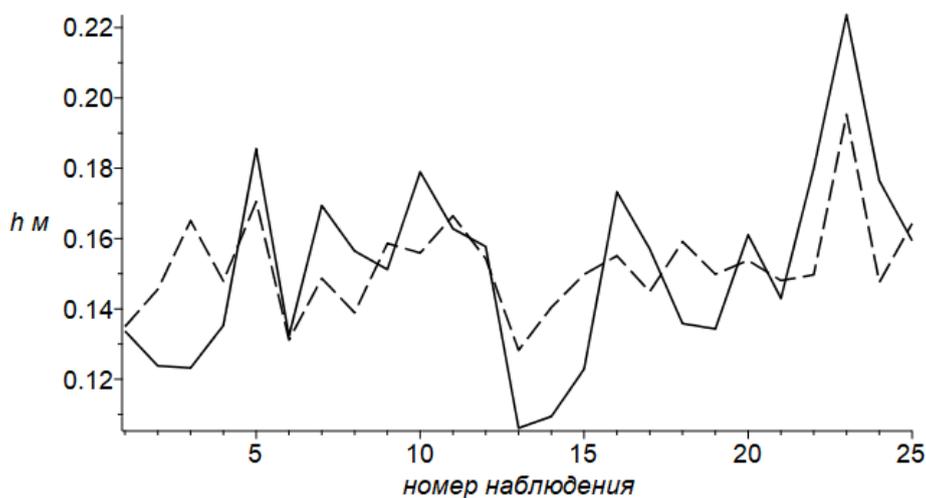
На рисунке 10 в виде точек представлены результаты теоретического расчёта прогиба мата при условиях, соответствовавших экспериментальным наблюдениям, в зависимости от результатов экспериментальных наблюдений. Красными линиями обозначены границы варьирования экспериментальной величины, определённые по формуле (20).

Оценка достаточности количества выполненных наблюдений показала, что условие соблюдено: выполнено 25 наблюдений, для заключения с точностью 95 % достаточно выполнить 17 наблюдений. На рисунках 11—15 аналогичным образом проиллюстрирована сходимость теоретических результатов с экспериментом в опытах № 5—6.



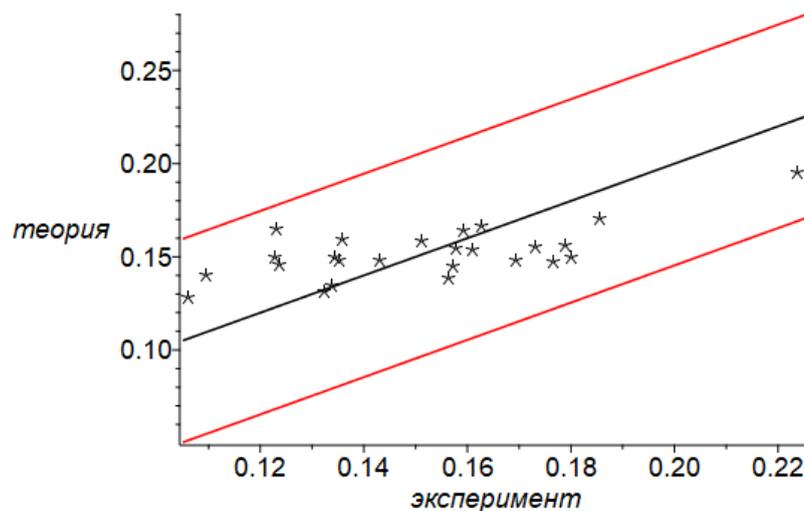
**Рисунок 8.** Гистограмма и теоретическая кривая плотности при относительных прогибах синтетического мата в опыте № 1 [рисунок авторов]

**Figure 8.** Histogram and theoretical curve of relative deflection density of synthetic mat in experiment No. 1



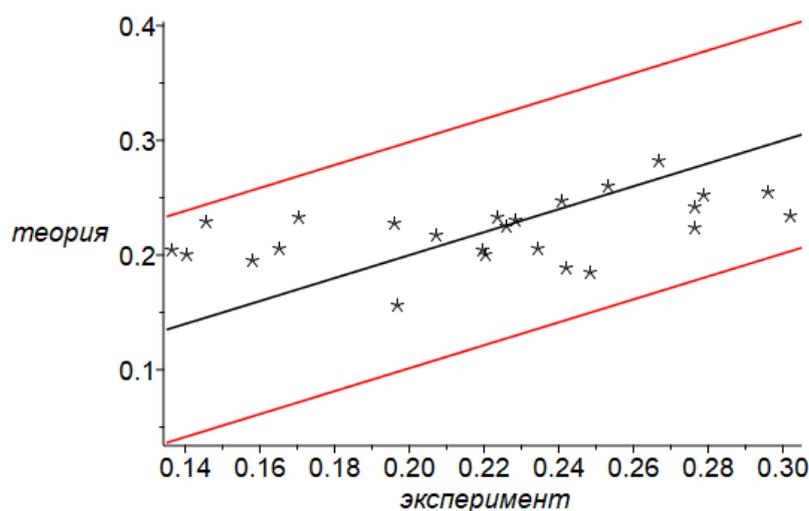
**Рисунок 9.** Экспериментальные (сплошная линия) и теоретические (пунктирная линия) значения прогиба синтетического мата в опыте № 1 [рисунок авторов]

**Figure 9.** Experimental (solid line) and theoretical (dotted line) values of the deflection of the synthetic mat in experiment No. 1



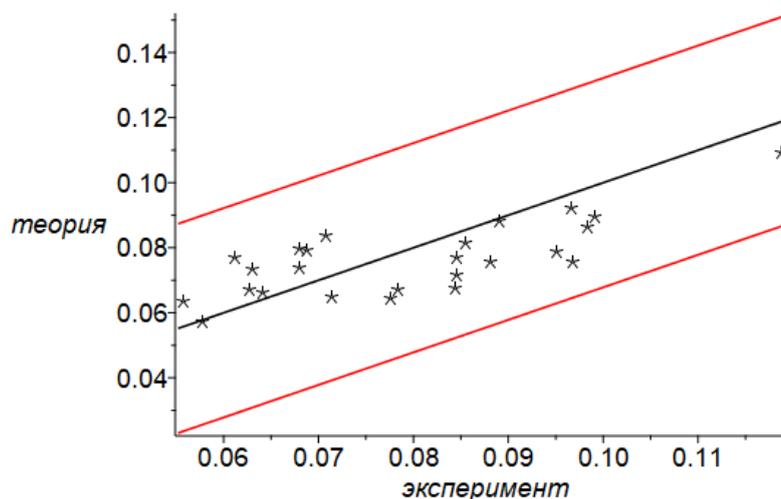
**Рисунок 10.** Оценка сходимости теоретических и экспериментальных значений прогиба синтетического мата в опыте № 1 (лесной грунт II категории прочности,  $H_0 = 40$  мм,  $G_w = 0,0196$  МН соотв. 2 тс) [рисунок авторов]

**Figure 10.** Evaluation of the convergence of theoretical and experimental values of the deflection of a synthetic mat in experiment No. 1 (forest soil of strength category II,  $H_0 = 40$  mm,  $G_w = 0.0196$  MN, respectively. 2 vehicles)



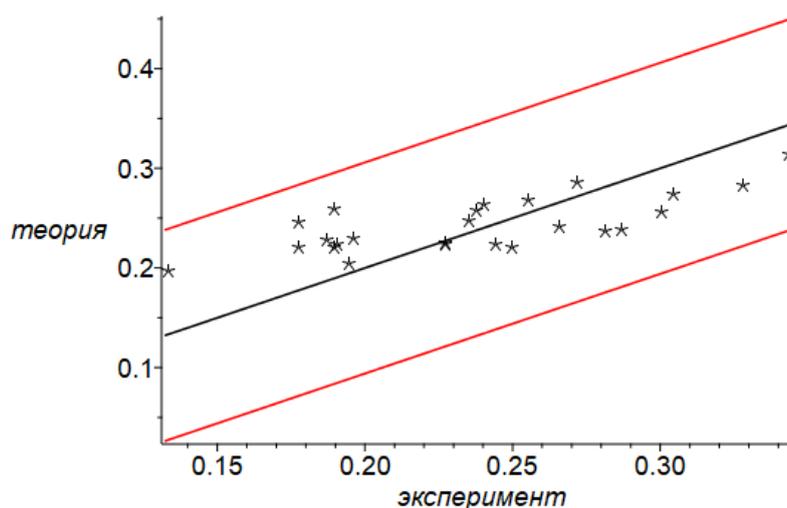
**Рисунок 11.** Оценка сходимости теоретических и экспериментальных значений прогиба синтетического мата в опыте № 2 (лесной грунт II категории прочности,  $H_0 = 40$  мм,  $G_w = 0,0392$  МН соотв. 4 тс) [рисунок авторов]

**Figure 11.** Evaluation of the convergence of theoretical and experimental values of the deflection of a synthetic mat in experiment No. 2 (forest soil of strength category II,  $H_0 = 40$  mm,  $G_w = 0.0392$  MN, respectively. 4 vehicles)



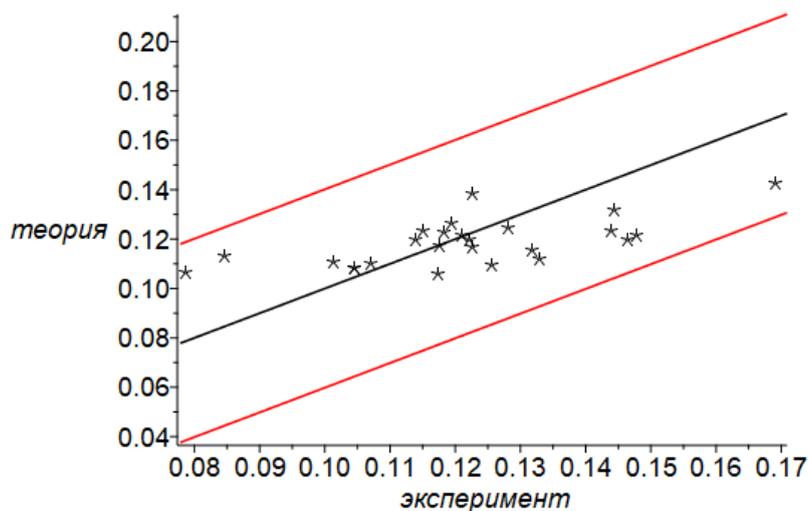
**Рисунок 12.** Оценка сходимости теоретических и экспериментальных значений прогиба синтетического мата в опыте № 3 (лесной грунт II категории прочности,  $H_0 = 104$  мм,  $G_w = 0,0589$  МН соотв. 6 тс) [рисунок авторов]

**Figure 12.** Evaluation of the convergence of theoretical and experimental values of the deflection of a synthetic mat in experiment No. 3 (forest soil of strength category II,  $H_0 = 104$  mm,  $G_w = 0.0589$  MN, respectively. 6 vehicles)



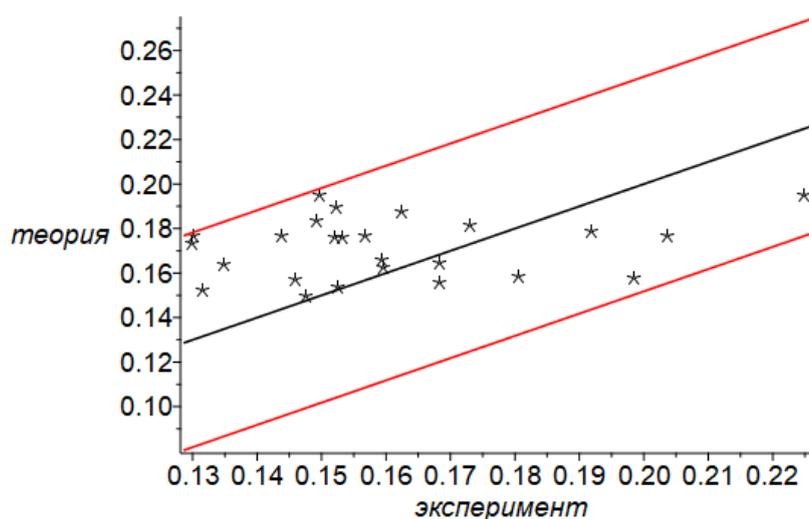
**Рисунок 13.** Оценка сходимости теоретических и экспериментальных значений прогиба синтетического мата в опыте № 4 (лесной грунт II категории прочности,  $H_0 = 20$  мм,  $G_w = 0,0196$  МН соотв. 2 тс) [рисунок авторов]

**Figure 13.** Evaluation of the convergence of theoretical and experimental values of the deflection of a synthetic mat in experiment No. 4 (forest soil of strength category II,  $H_0 = 20$  mm,  $G_w = 0.0196$  MN, respectively. 2 vehicles)



**Рисунок 14.** Оценка сходимости теоретических и экспериментальных значений прогиба синтетического мата в опыте № 5 (лесной грунт III категории прочности,  $H_0 = 104$  мм,  $G_w = 0,0196$  МН соотв. 2 тс) [рисунок авторов]

**Figure 14.** Evaluation of the convergence of theoretical and experimental values of the deflection of a synthetic mat in experiment No. 5 (forest soil of strength category III,  $H_0 = 104$  mm,  $G_w = 0.0196$  MN, respectively. 2 vehicles)



**Рисунок 15.** Оценка сходимости теоретических и экспериментальных значений прогиба синтетического мата в опыте № 6 (лесной грунт III категории прочности,  $H_0 = 104$  мм,  $G_w = 0,0392$  МН соотв. 4 тс) [рисунок авторов]

**Figure 15.** Evaluation of the convergence of theoretical and experimental values of the deflection of a synthetic mat in experiment No. 6 (forest soil of strength category III,  $H_0 = 104$  mm,  $G_w = 0.0392$  MN, respectively. 4 vehicles)

В таблице 3 приведены сводные данные об оценке сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований, рассчитанные с использованием данных, представленных в приложении. Для несущей способности  $p_s$ , экспериментального значения прогиба мата  $h_{\text{эксп.}}$ , отклонения результатов теоретических расчётов от экспериментов в таблице 3 приведены средние значения, рассчитанные по всем наблюдениям в каждом из опытов.

**Таблица 3.** Сводные данные по оценке сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований

**Table 3.** Summary data on the evaluation of the convergence of the results of theoretical and experimental studies

№ опыта	Категория грунта	$G_w$ , МН	$H_0$ , м	$p_s$ , МПа	$h_{\text{эксп.}}$ , м	$\varepsilon$ , %
1	II	0,0196	0,104	0,1321	0,1516	12
2	II	0,0392	0,104	0,1302	0,2220	12,1
3	II	0,0196	0,04	0,1332	0,0796	12,8
4	II	0,0392	0,04	0,1302	0,2374	11,9
5	III	0,0589	0,104	0,0480	0,1217	12,5
6	III	0,0196	0,02	0,0475	0,1608	12,6

#### 4. Выводы

Обработка результатов эксперимента и сравнение с теоретическими оценками показали, что отклонение данных сопоставимо с оценкой погрешности измерения экспериментального стенда. Ни в одном из опытов различия экспериментальных данных и теоретических оценок прогиба мата не выходят за доверительные границы варьирования экспериментальной величины с вероятностью 95 %. Таким образом, разработанные теоретические положения нашли подтверждение в проведённых опытах для лесных почвогрунтов II и III категорий прочности.

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

#### Список литературы

1. Григорьев И. В., Григорьева О. И. Эффективность лесопользования в России // Энергия: экономика, техника, экология. 2016. № 5. С. 24—30.
2. Григорьев И. В., Григорьева О. И. Основные направления обеспечения экологической безопасности лесозаготовительного производства // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-1 (13-1). С. 202—205.

3. 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.
4. 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.
5. Чемшикова Ю. М., Давтян А. Б., Григорьева О. И. Транспортно-технологические системы для лесоразведения на базе гусеничных вездеходов // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2020. С. 400—403.
6. Тетеревлева Е. В., Гринько О. И., Григорьева О. И. Транспортно-технологические машины для тушения лесных пожаров на базе колёсных вездеходов // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2020. С. 374—377.
7. Григорьев И. В., Чураков А. А., Григорьева О. И. Перспективная конструкция вездехода для лесного хозяйства // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. Тюмень, 2017. С. 136—139.
8. Концепция универсальной машины для выполнения лесохозяйственных работ и тушения лесных пожаров / О. И. Григорьева, А. Б. Давтян, О. И. Гринько [и др.] // Машиностроение: новые концепции и технологии: Сб. трудов Всерос. научно-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. Красноярск, 2020. С. 45—49.
9. Тюрин Н. А., Григорьев И. В., Григорьева О. И. Проблемы подготовки специалистов лесозаготовительного производства для устойчивого лесопользования // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 2-3 (7-3). С. 363—367.
10. 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 республиканской научно-практич. конф., посвящённой 75-летию ПетрГУ. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2015. С. 9—11.
11. 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.
12. 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.
13. Григорьева О. И. Новая машина для очистки лесосек // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 5-3 (10-3). С. 96—99.
14. 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.
15. Григорьев И. В., Чураков А. А., Григорьева О. И. Перспективная конструкция гусеничного форвардера // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. Тюмень, 2017. С. 140—144.
16. Григорьева О. И. Особенности естественного лесовосстановления в условиях криолитозоны // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6, № 4 (40). С. 25—29.

17. 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.
18. Перспективы импортозамещения систем машин для искусственного лесовосстановления / О. И. Григорьева, В. А. Макуев, Е. В. Барышникова [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3 (55). С. 78—84.
19. 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.
20. Григорьев И. В., Григорьева О. И., Никифорова А. И. Возможности биоконсервации при проведении сплошных рубок леса // Биоразнообразие. Биоконсервация. Биомониторинг: Сб. материалов Междунар. научно-практич. конф. / Ред.: А. С. Замотайлов, М. И. Шаповалов. Майкоп: ФГБОУ ВПО «Адыгейский государственный университет», НИИ комплексных проблем, 2013. С. 109—111.
21. Рудов С. Е., Григорьева О. И., Григорьев И. В. Эффективное восстановление лесов на вечной мерзлоте // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: Материалы 86-й научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). Минск, 2022. С. 38—41.
22. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974. 108 с.
23. Мацкевич И. П., Свирид Г. П. Теория вероятностей и математическая статистика. Минск: Вышэйшая школа, 1993.

## References

1. Grigorev I. V., Grigoreva O. I. Efficiency of forest management in Russia. *Energy: economics, technology, ecology*, 2016, no. 5, pp. 24—30. (In Russ.)
2. Grigorev I. V., Grigoreva O. I. The main directions of ensuring environmental safety of logging production. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 2-1 (13-1), pp. 202—205. (In Russ.)
3. 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.)
4. Khitrov E. G., Khakhina A. M., Dmitrieva M. N., Peskov V. B., Grigoreva O. I. A refined model for evaluating the traction properties of a wheeled propulsion of a forest machine. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Academy*, 2016, no. 217, pp. 108—119. (In Russ.)
5. Chemshikova Yu. M., Davtyan A. B., Grigoreva O. I. Transport-technological systems for afforestation based on tracked all-terrain vehicles. *Transport and transport-technological systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Editor N. S. Zakharov. Tyumen, 2020, pp. 400—403. (In Russ.)
6. Teterevleva E. V., Grinko O. I., Grigoreva O. I. Transport-technological machines for extinguishing forest fires on the basis of wheeled all-terrain vehicles. *Transport and transport-technological systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Editor N. S. Zakharov. Tyumen, 2020, pp. 374—377. (In Russ.)
7. Grigorev I. V., Churakov A. A., Grigoreva O. I. Perspective design of an all-terrain vehicle for forestry. *Transport and transport-technological systems: Materials of the international scientific and technical conference*. Tyumen, 2017, pp. 136—139. (In Russ.)

8. Grigoreva O. I., Davtyan A. B., Grinko O. I., Voynash S. A. The concept of a universal machine for performing forestry work and extinguishing forest fires. *Mashinostroenie: new concepts and technologies: Collection of works All-Russian Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists*. Krasnoyarsk, 2020, pp. 45—49. (In Russ.)
9. Tyurin N. A., Grigorev I. V., Grigoreva O. I. Problems of training specialists in logging production for sustainable forest management. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2014, vol. 2, no. 2-3 (7-3), pp. 363—367. (In Russ.)
10. 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, PetrSU Publishing House, 2015, pp. 9—11. (In Russ.)
11. Grigorev I. V., Grigoreva O. I. Improving the ecological 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.)
12. 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.)
13. Grigoreva O. I. A new machine for clearing cutting areas. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2014, vol. 2, no. 5-3 (10-3), pp. 96—99. (In Russ.)
14. 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.)
15. Grigorev I. V., Churakov A. A., Grigoreva O. I. Perspective design of a tracked forwarder. *Transport and transport-technological systems: Materials of the international scientific and technical conference*. Tyumen, 2017, pp. 140—144. (In Russ.)
16. Grigoreva O. I. Features of natural reforestation in the cryolithozone. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2018, vol. 6, no. 4 (40), pp. 25—29. (In Russ.)
17. Nikiforova A. I., Grigoreva O. I., Kiselyov D. S., Khakhina A. M., Rudov M. E. Assessment of ecological safety of forest machines. *Natural resources and ecology of the Far Eastern region: Materials of the International Scientific and Practical Forum*. Khabarovsk, 2013, pp. 134—138. (In Russ.)
18. Grigoreva O. I., Makuev V. A., Baryshnikova E. V., Burmistrova O. N., Shvetsova V. V., Grigorev I. V., Ivanov V. A. Prospects of import substitution of machine systems for artificial reforestation. *Systems. Methods. Technologies*, 2022, no. 3 (55), pp. 78—84. (In Russ.)
19. 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.)
20. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Nikiforova A. I. Possibilities of bioconservation during continuous logging. *Biodiversity. Bioconservation. Biomonitoring: Collection of materials of the International scientific and Practical Conference*. Editors: A. S. Zamotailov, M. I. Shapovalov. Maykop, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Adygea State University», Research Institute of Complex Problems, 2013, pp. 109—111. (In Russ.)

21. Rudov S. E., Grigoreva O. I., Grigorev I. V. Effective restoration of forests on permafrost. *Forest engineering, materials science and design: Materials of the 86th scientific and Technical conference of the teaching staff, researchers and postgraduates (with international participation)*. Minsk, 2022, pp. 38—41. (In Russ.)
22. Zaidel A. N. *Measurement errors of physical quantities*. Leningrad, Nauka, 1974. 108 p. (In Russ.)
23. Matskevich I. P., Svirid G. P. *Probability theory and mathematical statistics*. Minsk, Higher School, 1993. (In Russ.)

© Зорин М. В., Должиков И. С., Юдильевич А. М., Кривошеев А. А., Куницкая О. А,  
Михайлова Л. М., 2024