







## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФРЕЗЫ-МЕТАТЕЛЯ ЛЕСОПОЖАРНОГО ГРУНТОМЕТА-ПОЛОСОПРОКЛАДЫВАТЕЛЯ


Михаил В. Драпалюк<sup>1</sup>, md@vglta.vrn.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>


Петр И. Попиков<sup>1</sup>, popikovpetr@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>

Павел Э. Гончаров<sup>1</sup>, prorektorvgltu-ahr@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-0941-175X>

Денис Ю. Дручинин<sup>1</sup>, druchinin.denis@rambler.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>

Максим А. Гнусов<sup>1</sup>✉, mgnusov@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>

Евгений В. Поздняков<sup>1</sup>, pozd.ev@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3904-867x>

Александр Ф. Петков<sup>1</sup>, alexanderpetkoff@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-1765-6781>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

На сегодняшний день проблема лесных пожаров не теряет своей актуальности. Производятся разработки новых технических средств для предупреждения и ликвидации лесного пожара. В статье описаны лабораторные испытания лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя. Для проведения экспериментов по исследованию и анализу процесса метания почвогрунта лесопожарным грунтометом-полосопрокладывателем была разработана и изготовлена лабораторная установка с возможностью изменения большого количества регулировочных параметров с возможностью работы в почвенном канале лаборатории МЛХ и ПМ. Программа экспериментальных исследований включала в себя изучение процесса метания почвогрунта фрезой-метателем, оснащённой 6, 4 или 3 лопатками, при совместной работе со сферическими дисками диаметром 440 мм. Проведение экспериментальных исследований проходило следующим образом: первоначально включением гидропривода в работу во вращение приводилась фреза-метатель экспериментального образца лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя. Частота вращения фрезы-метателя составляла 8,33 об/с. Затем в работу приводилось навесное устройство тягово-энергетической тележки, которое опускало фрезу-метатель до контакта с почвой. Тележка приводилась в движение с постоянной скоростью 0,28 м/с и проходила расстояние 10 м за время от 36 до 38 с с учетом разгона и торможения. Глубина хода фрезы-метателя составляла 0,15 м. По завершении движения происходило её торможение и выключение гидромотора, который приводил в движение фрезу-метатель. Снятие характеристик давления рабочей жидкости, а также динамических характеристик работы устройства происходило с помощью тензометрической станции ZetLab (ZET 058). По результатам обработки экспериментальных данных исследования процесса метания почвогрунта фрезой-метателем определено, что для оснащения конструкции фрезы-метателя рационально использовать 6 лопаток. Оптимальным значением угла  $\gamma$  их установки является  $-10^\circ$ .

**Ключевые слова:** почвогрунт, грунтомет, фреза-метатель, лабораторная установка, лесные пожары, тензометрическая станция ZETLAB

**Благодарности:** Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.


**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-38-60041.**


**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.


*Для цитирования:* Экспериментальная оптимизация параметров фрезы-метателя лесопожарной грунтометательной машины / М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, П. Э. Гончаров, Д. Ю. Дручинин, М. А. Гнусов, Е. В. Поздняков, А. Ф. Петков // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 2 (46). – С. 100–114. – Библиогр.: с. 112–113 (11 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/9>.


*Поступила:* 25.05.2022 *Принята к публикации:* 30.06.2022 *Опубликована онлайн:* 01.07.2022

### EXPERIMENTAL OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF THE CUTTER-THROWER OF FOREST FIRE SOIL-THROWING MACHINE WITH THE FUNCTION OF FIRE-BREAK MAKER


**Mikhail V. Drapalyuk**<sup>1</sup>, michael1@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>


**Petr I. Popikov**<sup>1</sup>, popikovpetr@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>

**Pavel E. Goncharov**<sup>1</sup>, prorektorvgtu-ahr@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-0941-175X>

**Denis Y. Druchinin**<sup>1</sup>, druchinin.denis@rambler.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>

**Maksim A. Gnusov**<sup>1</sup>✉, mgnusov@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>

**Evgeny V. Pozdnyakov**<sup>1</sup>, pozd.ev@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3904-867x>

**Alexander F. Petkov**<sup>1</sup>, alexanderpetkoff@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-1765-6781>

<sup>1</sup> FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 394087, 8 Timiryazeva street, Voronezh, Russian Federation

To date, the problem of forest fires does not lose its relevance. New technical means are being developed to prevent and eliminate forest fires. The article describes laboratory tests of a forest fire soil-throwing machine with the function of fire-break maker. To conduct experiments on the study and analysis of the process of throwing soil with a forest fire soil-throwing machine with the function of fire-break maker, a laboratory installation was developed and manufactured with the ability to change a large number of adjustment parameters with the ability to work in the soil channel of the MF and MD laboratory. The program of experimental studies included the study of the process of throwing soil with a throwing cutter equipped with 6, 4 or 3 blades, when working together with spherical disks with a diameter of 440 mm. The experimental studies were carried out as follows. Initially, by turning on the hydraulic drive, the cutter-thrower of the experimental sample of forest fire soil-throwing machine with the function of fire-break maker was put into rotation. The speed of the cutter-thrower was 500 rpm. Then the attachment of the traction and energy trolley was put into operation, which lowered the cutter-thrower to contact with the soil. The trolley was set in motion at a constant speed of 0.28 m/s and covered a distance of 10 m in 36 to 38 s, taking into account acceleration and deceleration. The depth of the cutter-thrower was 0.15 m. At the end of the movement, it was braked and the hydraulic motor was turned off, which set the cutter-thrower in motion. The pressure characteristics of the working fluid, as well as the dynamic characteristics of the operation of the device, were taken using the strain gauge station ZetLab (ZET 058). According to the results of processing the experimental data, it was determined that it is rational to use 6 blades to equip the design of the cutter-thrower. The optimal value of the angle  $\gamma$  of their installation is  $-10^\circ$ .

**Keywords:** soil, soil thrower, cutter-thrower, laboratory installation, forest fires, strain gauge station ZETLAB

**Acknowledgement:** The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this paper.

**The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 19-38-60041.**

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Drapalyuk M. V., Popikov P. I., Goncharov P. E., Druchinin D. Yu., Gnusov M. A., Pozdnyakov E. V., Petkov A. F. (2022) Experimental optimization of the parameters of the cutter-thrower of forest fire soil-throwing machine with the function of fire-break maker *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 12, No. 2 (46), pp. 100-114 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/9>.

**Received:** 25.05.2022 **Revised:** 25.06.2022 **Accepted:** 30.06.2022 **Published online:** 01.07.2022

### Введение

Общая площадь лесов в Российской Федерации составляет 1179 млн га, или около 31 % лесной площади земного шара [1]. Неконтролируемый лесной пожар за короткое время в состоянии нанести непоправимый вред экологии окружающей среды, а также состоянию лесного биогеоценоза, в связи с чем проблема тушения лесных пожаров является весьма актуальной [2]. Лесные пожары, распространяющиеся по большой площади, являются одним из основных негативных факторов вредных для окружающей среды изменений, которые ухудшают условия жизни населения [3]. Следует отметить, что тушение очагов лесных пожаров в некоторых особо удаленных районах затруднено, а их полная ликвидация практически невозможна из-за труднодоступности мест стихийного горения и малой проходимости автомобилей и аварийно-спасательных формирований к месту возникновения ЧС [4]. В Российской Федерации проблема с лесными пожарами так же, как и в мировом сообществе до конца не решена, но следует отметить, что в последние годы произведено достаточно серьезное накопление научно-экспериментального задела по данной проблеме [5]. Тушение лесных пожаров является критически важным вопросом для пожарных команд; огонь может распространяться по обширным территориям за относительно короткий промежуток времени [6]. За последние два десятилетия была проведена значительная исследовательская работа в области локальной и глобальной оптимизации параметров технических средств, в частности механизированных машин для тушения и предупреждения лесных пожаров грунтом. Тушить огонь почвогрунтом на сегодняшний день значительно дешевле, чем водой. Это не означает, что вода для тушения

менее эффективна. Вода достигает мест, где выбрасывание земли невозможно, но в местах, на которых возможно использовать грунт для тушения пожара, дешевле закупить несколько единиц грунтометательной техники. Механизированный способ подачи грунта реализуется с помощью комбинированной машины. Немаловажной частью конструкции машины являются активные рабочие органы с невысокой окружной скоростью, служащие для предварительной обработки почвы и формирования почвенного вала, с целью извлечения минерализованного слоя грунта на поверхность. Второй важной частью машины является фреза-метатель, которая, сообщая грунту кинетическую энергию, направляет его в сторону кромки низового пожара. Для управления потоком грунта применяется направляющий кожух. Эти исследования инициировали много теоретических, вычислительных и программных разработок [7]. Необходимость изучения различных математических методов возникает из-за повышения требований понимать, решать и/или оценивать различные типы уравнений, возникающих в результате математического моделирования явлений в естественных, социальных и инженерных науках [8]. Инженерия объясняет интегральные методы, вывод уравнений поля и операции [9]. На сегодняшний день проведение натурного эксперимента для лесной техники сопровождается применением автоматизированных записывающих устройств. Автор исследования [10] использовал отечественную разработку ZETLab, предназначенную для автоматизированного сбора и обработки различных первичных данных лабораторно-полевых экспериментов при различных частотных диапазонах. Таким образом, поставлена цель научного исследования по повышению эффективности тушения лесных

пожаров за счет оптимизации параметров фрезы-метателя лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя.

### Материалы и методы

Для проведения экспериментов по исследованию и анализу процесса метания почвогрунта лесопожарным грунтометом-полосопрокладывателем [11] была разработана и изготовлена лабораторная установка с

возможностью проведения исследований в почвенном канале (рис. 1).

Созданный лабораторный образец, используемый с тягово-энергетической тележкой, включает в себя навеску лабораторной установки 1, тензометрическую навеску 2, стойку 3 опорные колеса 4, дисковые рабочие органы 5; фрезу-метатель 6; направляющий кожух 7; кожух-гаситель 8; гидромотор фрезы-метатель 9 и раму 10.

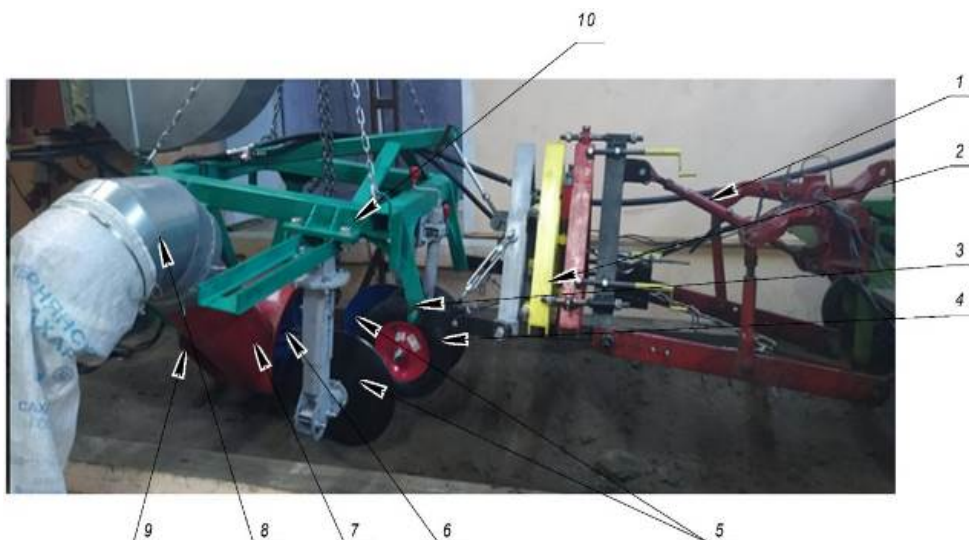


Рис. 1. Лабораторная установка для исследования процесса метания почвогрунта

Источник: собственные разработки авторов

Figure 1. Laboratory installation for the study of the process of throwing soil

Source: own developments of the authors

Таблица 1

Граничные условия изменяемого технологического фактора

Table 1

Boundary conditions of the variable technological factor

Код   Code	Фактор   Factor	Уровень варьирования   Level of variation			Интервал Варьирования   Variation interval, $\Delta_i$
		Нижний   Lower, $X_i^{(-)}$	Основной   Basic, $X_i^{(0)}$	Верхний   Upper, $X_i^{(+)}$	
X	Угол наклона лопаток, град.   Blade angle, city	-30	0	30	10

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

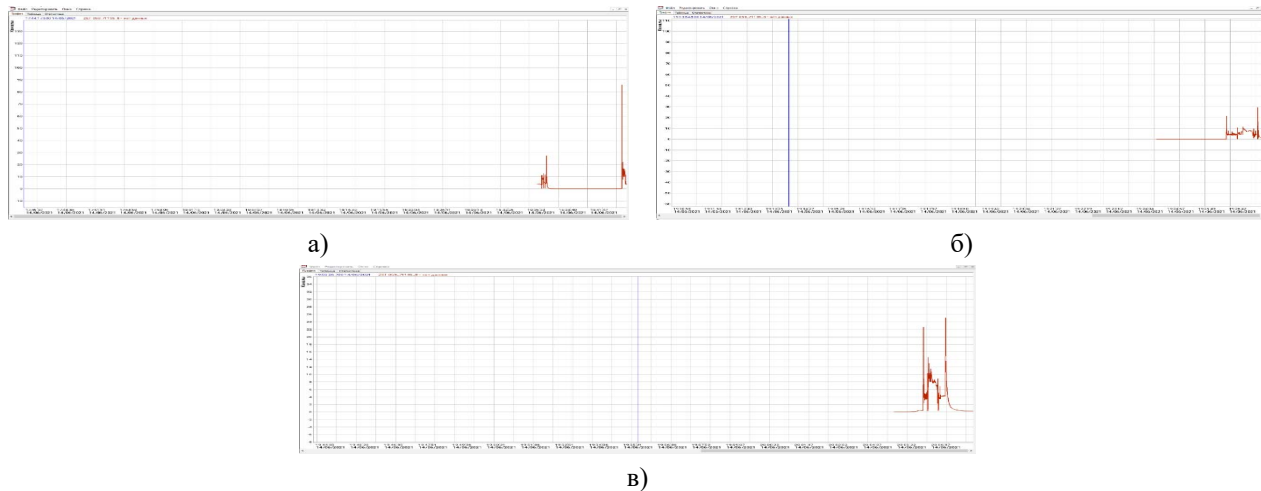


Рис. 2. Осциллограммы давления рабочей жидкости в напорной магистрали для различных углов установок:

а)  $\gamma = -30^\circ$ ; б)  $\gamma = 0^\circ$  и в)  $\gamma = 30^\circ$

Источник: собственные измерения авторов

Figure 2. Oscillograms of the pressure of the working fluid in the pressure line for different installation angles:

а)  $\gamma = -30^\circ$ ; б)  $\gamma = 0^\circ$  and в)  $\gamma = 30^\circ$

Source: authors' own measurements

Исследование включает в себя изучение процесса метания почвогрунта фрезой-метателем, оснащённой 6, 4 или 3 лопатками, в совокупной работе со сферическими дисками диаметром 440 мм. Лабораторный эксперимент проводился следующим образом. Первоначально включением гидропривода в работу во вращение приводилась фреза-метатель лабораторного образца машины, частота вращения составляла  $8,33 \text{ с}^{-1}$ , затем тягово-энергетическая тележка приводилась в движение, и на навесном устройстве лабораторный образец опускался в почвенный канал до контакта рабочих органов с почвой. Тягово-энергетическая тележка приводилась в движение с постоянной скоростью  $0,28 \text{ м/с}$  и проходила расстояние  $10 \text{ м}$  за время  $36-38$  секунд. Глубина хода фрезы-метателя составляла  $0,15 \text{ м}$ . По завершении движения тележки происходило торможение и выключение гидромотора вращения фрезы-метателя. Снятие характеристик давления рабочей жидкости машины происходило при помощи датчика давления и тензометрической станции ZetLab (измерительная тензометрическая система ZET 058). Тензометрическая станция представляет собой аппаратно-программный комплекс на базе многоканальных систем сбора данных ZET 058 и программного обеспечения ZETLAB TENZO.

Принцип действия основан на преобразовании аналоговых электрических сигналов тензометрических датчиков и тензорезисторов, датчиков с выходом по напряжению в цифровую форму и передачу измерительной информации по цифровым интерфейсам на ПК. Тензометрическая система ZET 058 обеспечивает питание первичных преобразователей как постоянным, так и переменным напряжением, за счёт чего может использоваться для сбора и обработки сигналов для съёма показаний при статических или динамических экспериментах. Для измерения давления рабочей жидкости в гидроприводе лабораторной установки применялся датчик динамического давления ZET 315 (BC 315). Предельное статическое давление датчика динамического давления ZET 315 (BC 315) было равно  $16 \text{ МПа}$ . На кожух лабораторной установки крепился резервуар размером  $1 \times 1 \times 1 \text{ м}$ , предназначенный для сбора метаемого почвогрунта. Собранный почвогрунт распределяли по ровной плоскости, таким образом, объём рассчитывался как  $V = a \cdot b \cdot c$ . В данном случае изменялась только одна контролируемая характеристика – высота отсыпаемого почвогрунта. При каждой серии экспериментов тару освобождали. Так как в начальный период работы

гидропривода происходил запуск фрезы-метателя, её опускание и заглубление на требуемую величину, а в конце хода тележки происходило её торможение и подъем оборудования, анализ величины давления осуществлялся с 7 по 35 секунду работы лабораторной установки при установившемся режиме работы, по итогам которого рассчитывался средний уровень наблюдаемого давления рабочей жидкости. При составлении плана эксперимента были намечены интервалы варьирования и уровни факторов (табл. 1).

Программное обеспечение ZETLAB TENZO позволило получить осциллограммы давления рабочей жидкости в напорной магистрали, указанные на рис. 2.

В процессе лабораторных исследований были проведены серии экспериментов в 10-кратной повторности по оценке влияния угла наклона лопаток фрезы-метателя  $\gamma$  на величину давления в гидросистеме и объем метаемого почвогрунта. Данный входной параметр варьировался по 7 уровням:  $-30^\circ$ ,  $-20^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $0^\circ$  (без наклона),  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  и  $30^\circ$  (рис. 3).

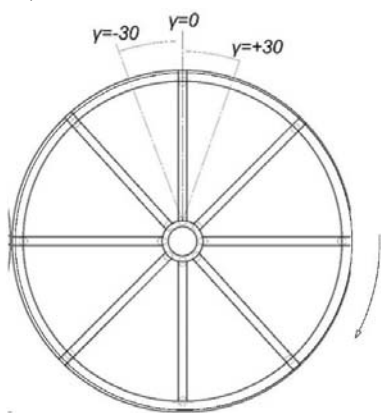


Рис. 3. Схема фрезы-метателя  
Источник: собственная схема авторов  
Figure 3. Scheme of the cutter-thrower  
Source: authors' own schema

По результатам опытов в почвенном канале были определены усредненные значения показаний датчика давления ZET 315, используемые в дальнейшем для статистической обработки.

Первоначально были выполнены эксперименты по оценке эффективности метания почвогрунта шестью лопатками фрезы-метателя с углом их установки на диске согласно матрице планирования эксперимента.

### Результаты и обсуждение

Результаты анализа представлены в табл. 2, 3, 4. При оценке статистических данных наблюдается нелинейная зависимость между средней величиной давления рабочей жидкости в гидроприводе фрезы-метателя и углом установки лопаток.

С учётом этого, для нахождения аналитического выражения зависимости величины давления от угла установки лопаток использована полиномиальная зависимость парной регрессии с функцией вида

$$Y = ax^2 + bx + c. \quad (1)$$

В случае нахождения прогнозных значений давления рабочей жидкости с использованием нелинейных регрессий немаловажным моментом является определение множественного коэффициента корреляции, показывающего величину взаимосвязи между факторным признаком и зависимой переменной  $Y$ . Как правило, при наличии значительной доли влияния факторного признака на выходной критерий коэффициент корреляции близок к единице. Усреднённые значения давления рабочей жидкости в гидроприводе фрезы-метателя и объем метаемого почвогрунта, приходящийся на квадратный метр площади, полученные на основе экспериментов, приведены в табл. 7.

Таблица 2

Данные описательной статистики, рассчитанные в программе Microsoft Excel, для экспериментов по метанию почвогрунта фрезой-метателем с шестью лопатками

Table 2

Descriptive statistics data calculated in Microsoft Excel for experiments on throwing soil with a cutter-thrower with six blades

<b>Замер давления (МПа) в гидросистеме привода фрезы-метателя с шестью лопатками   Measurement of pressure (MPa) in the hydraulic drive system of the cutter-thrower with six blades</b>							
Углы установки лопаток, град.   Blade angles, deg.	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°
Среднее   Average	9,27	8,44	7,97	7,63	8,59	9,22	9,53
Стандартная ошибка   Standard error	0,16	0,19	0,16	0,14	0,13	0,15	0,11
Медиана   Median	9,75	8,44	7,25	7,05	8,39	9,40	9,70
Стандартное отклонение   Standard deviation	2,80	3,28	2,83	2,35	2,27	2,63	1,99
Дисперсия выборки   Sample variance	7,87	10,77	8,02	5,54	5,15	6,92	3,97
Экцесс   Excess	1,92	0,54	3,18	0,53	0,73	1,06	-0,05
Асимметричность   Asymmetry	-0,25	0,10	1,27	-0,03	-0,10	-0,42	-0,74
Интервал   Interval	19,40	19,83	20,75	14,81	13,07	14,73	9,15
Минимум   Minimum	0,23	0,24	0,72	0,37	0,33	0,23	3,39
Максимум   Maximum	19,63	20,07	21,48	15,18	13,41	14,96	12,54
Сумма   Sum	2605,98	2373,88	2241,14	2069,61	2285,15	2592,05	2678,17

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Таблица 3

Данные описательной статистики, рассчитанные в программе Microsoft Excel, для экспериментов по метанию почвогрунта фрезой-метателем с четырьмя лопатками

Table 3

Descriptive statistics data calculated in Microsoft Excel for experiments on throwing soil with a four-bladed cutter-thrower

<b>Замер давления (МПа) в гидросистеме привода фрезы-метателя с четырьмя лопатками   Measurement of pressure (MPa) in the hydraulic drive system of the cutter-thrower with four blades</b>							
Углы установки лопаток, град.   Blade angles, deg.	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°
Среднее   Average	10,26	9,53	8,38	7,64	9,34	10,54	11,05
Стандартная ошибка   Standard error	0,22	0,11	0,12	0,24	0,21	0,18	0,20
Медиана   Median	11,43	9,70	8,51	6,72	9,18	10,80	11,96
Стандартное отклонение   Standard deviation	3,80	1,99	2,08	3,88	3,67	3,02	3,37
Дисперсия выборки   Sample variance	14,48	3,97	4,36	15,06	13,54	9,13	11,41
Экцесс   Excess	-0,55	-0,05	0,55	7,18	0,01	-0,18	0,47
Асимметричность   Asymmetry	-0,68	-0,74	-0,58	2,05	-0,28	-0,62	-1,08
Интервал   Interval	18,17	9,15	11,85	27,78	21,71	14,95	15,09
Минимум   Minimum	0,24	3,39	0,26	0,18	0,25	0,53	0,22
Максимум   Maximum	18,42	12,54	12,11	27,96	21,96	15,48	15,31
Сумма   Sum	2883,49	2678,17	2356,79	1896,06	2626,65	2962,59	2963,09

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations



Таблица 4

Данные описательной статистики, рассчитанные в программе Microsoft Excel, для экспериментов по метанию почвогрунта фрезой-метателем с тремя лопатками

Table 4

Descriptive statistics data calculated in Microsoft Excel for experiments on throwing soil with a three-blade cutter-thrower

<b>Замер давления (МПа) в гидросистеме привода фрезы-метателя с тремя лопатками   Measurement of pressure (MPa) in the hydraulic drive system of the cutter-thrower with three blades</b>							
Углы установки лопаток, град.   Blade angles, deg.	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°
Среднее   Average	9,22	7,97	7,63	6,45	7,63	9,53	10,23
Стандартная ошибка   Standard error	0,15	0,16	0,14	0,43	0,14	0,11	0,19
Медиана   Median	9,40	7,25	7,03	3,48	7,03	9,70	11,32
Стандартное отклонение   Standard deviation	2,63	2,83	2,48	7,21	2,48	1,99	3,18
Дисперсия выборки   Sample variance	6,92	8,02	6,17	52,06	6,15	3,97	10,16
Экссесс   Excess	1,06	3,18	0,96	2,51	0,93	-0,05	0,36
Асимметричность   Asymmetry	-0,42	1,27	0,16	1,86	0,17	-0,74	-1,11
Интервал   Interval	14,73	20,75	16,87	28,48	16,67	9,15	14,59
Минимум   Minimum	0,23	0,72	0,17	0,16	0,37	3,39	0,34
Максимум   Maximum	14,96	21,48	17,04	28,64	17,04	12,54	14,93
Сумма   Sum	2592,05	2241,14	2145,28	1815,13	2145,56	2678,17	2876,45

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Таблица 5

Результаты расчёта необходимых показателей для реализации метода Крамера в программе Microsoft Excel

Table 5

The results of calculating the necessary indicators for the implementation of the Cramer method in Microsoft Excel

№	X	Y	X <sup>2</sup>	X <sup>3</sup>	X <sup>4</sup>	X*Y	X <sup>2</sup> *Y	Y <sup>2</sup>
1	-30	9,27	900	-27000	810000	-278,22	8346,6	86,007
2	-20	8,44	400	-8000	160000	-168,94	3378,8	71,35
3	-10	7,97	100	-1000	10000	-79,75	797,5	63,60
4	0	7,63	0	0	0	0	0	58,30
5	10	8,59	100	1000	10000	85,9	859	73,78
6	20	9,22	400	8000	160000	184,48	3689,6	85,08
7	30	9,53	900	27000	810000	285,9	8577	90,82
<b>Сумм.   Total</b>	0	60,67	2800	0	1960000	29,37	25648,5	528,95
<b>Среднее   Average</b>								

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Для определения коэффициентов a, b и c регрессионного уравнения используется метод наименьших квадратов. Это основной метод выбора коэффициентов уравнения регрессии ввиду того, что сумма квадратов отклонений исходных значений зависимой величины от вычисленных по уравнению регрессии является наименьшей.

Применение данного метода позволяет составить систему алгебраических уравнений вида:

$$\begin{cases} \hat{a} \times \sum x^4 + \hat{b} \times \sum x^3 + \hat{c} \times \sum x^2 = \sum x^2 y \\ \hat{a} \times \sum x^3 + \hat{b} \times \sum x^2 + \hat{c} \times \sum x = \sum x y \\ \hat{a} \times \sum x^2 + \hat{b} \times \sum x + \hat{c} \times n = \sum y \end{cases} \quad (2)$$



Решение данной системы алгебраических уравнений выполняется на основе метода Крамера, используемого в случае, когда число уравнений системы равно числу неизвестных, а главный определитель матрицы отличен от нуля. Применение метода Крамера осуществляется на основе алгоритма, реализованного в программе Microsoft Excel.

Первоначально составляется таблица для подсчёта сумм при неизвестных в уравнении (2). Рассчитываются необходимые показатели с использованием математических функций программы Microsoft Excel (табл. 5).

На основе рассчитанных показателей сформируем матрицу  $A$ , столбцы которой состоят из коэффициентов при неизвестных коэффициентах в левых частях уравнений системы:

$$A = \begin{vmatrix} 1966000 & 0 & 2800 \\ 0 & 2800 & 0 \\ 2800 & 0 & 7 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

По аналогии составим три матрицы  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ , получаемые путём замены столбцов с тем же порядковым номером в исходной матрице на элементы правых частей уравнений системы (3). В результате получаем

$$A = \begin{vmatrix} 25648,5 & 0 & 2800 \\ 29,37 & 2800 & 0 \\ 60,676 & 0 & 7 \end{vmatrix};$$

$$A = \begin{vmatrix} 1966000 & 25648,5 & 2800 \\ 0 & 29,37 & 0 \\ 2800 & 60,676 & 7 \end{vmatrix};$$

$$A = \begin{vmatrix} 1966000 & 0 & 25648,5 \\ 0 & 2800 & 29,37 \\ 2800 & 0 & 60,676 \end{vmatrix}.$$

С использованием функции МОПРЕД программы Microsoft Excel вычислим определители для каждой из четырёх составленных матриц.

В результате вычислений установлены определители (детерминанты) для составленных матриц:  $D = 16464000000$ ,  $D_1 = 27010760$ ,  $D_2 = 172695600$ ,  $D_3 = 1.31906 \cdot 10^{11}$ .

Коэффициенты для регрессионного уравнения (3) рассчитываются на основании выражения

$$N = \frac{D_n}{D}, \quad (4)$$

где  $N$  – соответствующий коэффициент;  $D_n$  – определитель матрицы  $A_n$ ;  $D$  – определитель исходной матрицы  $A$ .

Расчёт коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $c$  также был произведён путём введения формул в ячейки рабочего листа программы Microsoft Excel:  $a = 0,001641$ ,  $b = 0,010489$ ,  $c = 8,011762$ . С учётом выполненных расчётов требуемое уравнение регрессии имеет вид  $Y_1 = 0,0016x^2 + 0,105x + 8,0118$ .

Производится расчёт индекса корреляции  $R$  между факторным признаком и зависимой переменной  $Y$ . Данный параметр для нелинейных регрессионных моделей применяется для оценки значимости признаков в составленных моделях по критерию Фишера. Он вычисляется по формуле

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (5)$$

В табл. 6 добавим столбец со значением  $Y^*$ , который рассчитывается по выражению уравнения регрессии  $Y = 0,0016x^2 + 0,105x + 8,0118$ . Среднее значение  $Y$  рассчитывается путём использования функции СРЗНАЧ, и находится квадрат разности между требуемыми параметрами.

Записав формулу (5) в требуемом виде, получаем значение индекса корреляции  $R = 0,92$ . Полученное значение, близкое к единице, говорит о тесной связи между величиной давления в гидросистеме привода фрезы-метателя и углом установки её лопаток.

Расчёт индекса детерминации выполняется путём возведения в квадрат индекса корреляции:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

В результате вычислений индекс детерминации  $R^2$  равняется 0,85. То есть, в 85 % случаев изменения угла установки лопаток приводят к изменению зависимой переменной  $Y$  – давления в гидросистеме. Точность составления уравнения регрессии находится на высоком уровне. Остальные 15 % изменения отслеживаемого критерия объясняются факторами, не учтёнными в модели.

Таблица 6

To the calculation of the correlation index R

№	X	Y	X <sup>2</sup>	X <sup>3</sup>	X <sup>4</sup>	X*Y	X <sup>2</sup> *Y	Y <sup>2</sup>	Y*	(Y-Y*) <sup>2</sup>	(Y-Y <sub>cp</sub> ) <sup>2</sup>
1	-30	9,27	900	-27000	810000	-278,22	8346,6	86,00	9,17	0,016	0,36
2	-20	8,44	400	-8000	160000	-168,94	3378,8	71,35	8,45	0,000126	0,04
3	-10	7,97	100	-1000	10000	-79,75	797,5	63,60	8,07	0,009202	0,48
4	0	7,63	0	0	0	0	0	58,30	8,01	0,14	1,06
5	10	8,59	100	1000	10000	85,9	859	73,78	8,28	0,09	0,006
6	20	9,22	400	8000	160000	184,48	3689,6	85,08	8,87	0,11	0,30
7	30	9,53	900	27000	810000	285,9	8577	90,82	9,80	0,07	0,74
<b>Сумм. Total</b>		60,67	2800	0	1960000	29,37	25648,5	528,95	60,67	0,45	3,01
<b>Среднее Average</b>		8,66									

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Расчёт средней ошибки аппроксимации A для оценки качества регрессионного уравнения по относительным отклонениям каждого наблюдения проводится по формуле

$$\tilde{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y - \tilde{y}_x}{y} \right| \times 100\%. \quad (7)$$

Производим вычисления для каждого значения Y. Результат расчёта средней ошибки аппроксимации равен A = 2,508182 %.

Расчёты показывают, что средняя ошибка аппроксимации равняется 2,5 %. Допустимым является значение, не превышающее 8-10 %.

Построенная по результатам анализа экспериментальных данных регрессионная зависимость влияния угла установки шести лопаток фрезы-метателя на величину давления её гидропривода в виде полинома второй степени приведена на рис. 4, а.

Затем была проведена следующая серия экспериментов по замеру объёма метаемого почвогрунта и давления рабочей жидкости в гидросистеме привода фрезы-метателя с четырьмя лопатками с углом их установки на диске согласно матрице планирования эксперимента.

Определение данных описательной статистики аналогичным образом было реализовано с использованием функции «Описательная статистика» в программе Microsoft Excel. При оценке статистических данных наблюдается нелинейная зависимость между

средней величиной давления рабочей жидкости в гидроприводе фрезы-метателя и углом установки лопаток. Аналогично, для нахождения аналитического выражения зависимости величины давления от угла установки лопаток применяется полиномиальная зависимость парной регрессии с функцией вида:  $Y = ax^2 + bx + c$ .

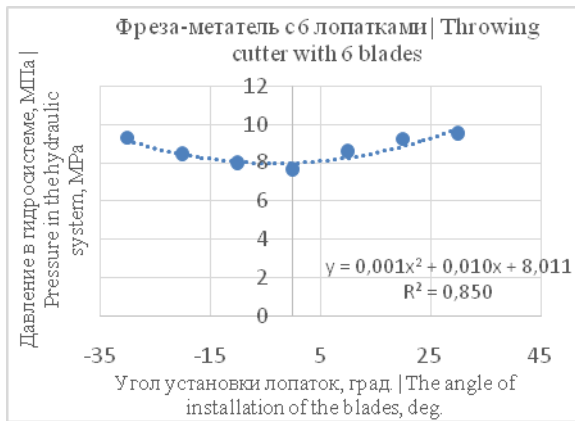
Расчёты показывают, что средняя ошибка аппроксимации равняется 3,99 %. Допустимым является значение, не превышающее 8-10 %.

Построенная по результатам анализа экспериментальных данных регрессионная зависимость влияния угла установки четырех лопаток фрезы-метателя на величину давления её гидропривода в виде полинома второй степени приведена на рис. 4, б.

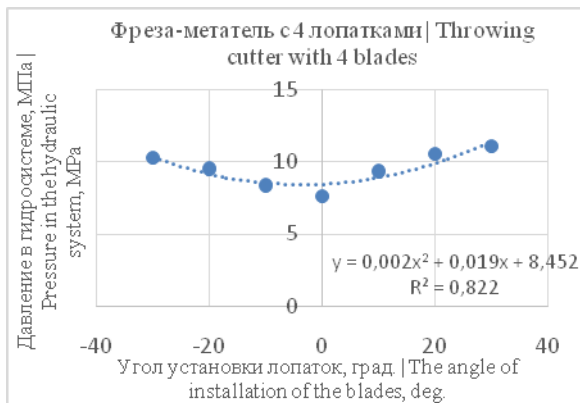
Построенная по результатам анализа экспериментальных данных регрессионная зависимость влияния угла установки трех лопаток фрезы-метателя на величину давления её гидропривода в виде полинома второй степени приведена на рис. 4, в.

На основании полученных данных необходимо решить следующую экспериментальную задачу оптимизации:

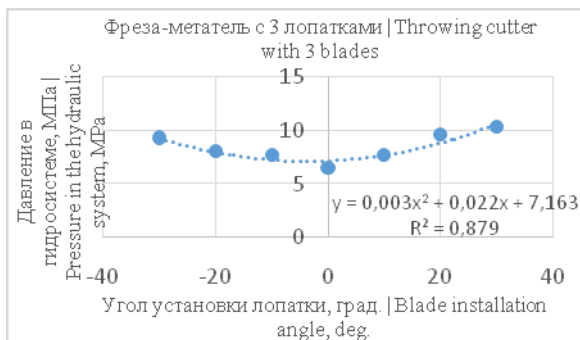
$$P(y) \rightarrow \min. \quad (8)$$



а) | a)



б) | b)



в) | v)

Рис. 4. Зависимость влияния угла установки лопаток фрезы-метателя на величину давления в гидросистеме:

а) 6 лопаток; б) 4 лопатки; в) 3 лопатки

Источник: собственные вычисления авторов

Figure 4. The dependence of the influence of the angle of installation of the blades of the cutter-thrower on the pressure in the hydraulic drive

а) 6 blades; б) 4 blades; в) 3 blades

Source: authors' own calculations

Изучение совместного положения графиков даёт понять, что наибольшая величина давления от

9 до 11 МПа в гидросистеме фрезы-метателя и, как следствие, наибольшая нагрузка на рабочий орган наблюдается при закреплении любого числа лопаток в крайних положениях с углом установки  $-30^\circ$  и  $30^\circ$ .

При приближении угла установки к нулевому значению отклонения наблюдаются минимальные значения давления рабочей жидкости на уровне 6...8 МПа.

Для наглядной оценки величины давления рабочей жидкости  $P$  в гидросистеме фрезы-метателя с различным числом лопаток от угла их установки  $\gamma$  совмещаем 3 графика на одной координатной плоскости (рис. 5).

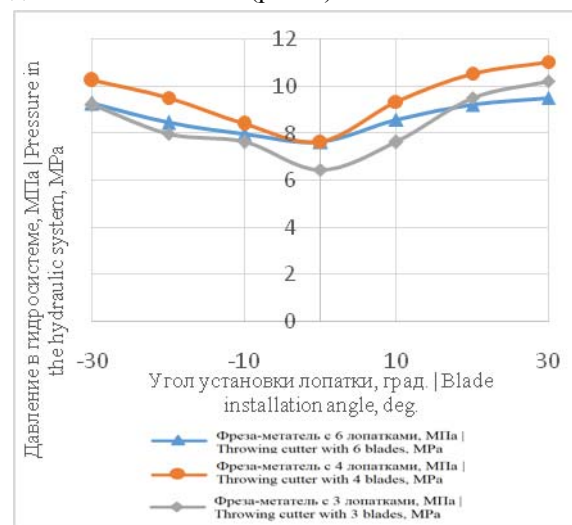


Рис. 5. Изменение величины давления в гидросистеме фрезы-метателя с 6, 4 и 3 лопатками в зависимости от угла установки лопаток  
Источник: собственные вычисления авторов  
Figure 5. Changing the pressure in the hydraulic drive of the cutter-thrower with 6, 4 and 3 blades depending on the angle of the blades  
Source: authors' own calculations

Source: authors' own calculations  
Однако другим немаловажным параметром, отслеживаемым в процессе экспериментов и характеризующим эффективность реализации процесса метания почвогрунта фрезой-метателем, является объем метаемого почвогрунта в пересчёте на квадратный метр покрываемой площади. В табл. 7 приведены экспериментальные данные по замеру обозначенного параметра в процессе исследований.

Полученные данные представлены в виде гистограммы (рис. 6).

Результаты экспериментальных замеров объёма метаемого почвогрунта

Table 7

The results of experimental measurements of the volume, thrown soil

Номер опыта   Experience number	Значение X   Meaning X	Объем грунта на квадратный метр, метаемого 6 лопатками, м <sup>3</sup>   The volume of soil per square meter thrown by 6 shovels, m <sup>3</sup>	Объем грунта на квадратный метр, метаемого 4 лопатками, м <sup>3</sup>   The volume of soil per square meter thrown by 4 shovels, m <sup>3</sup>	Объем грунта на квадратный метр, метаемого 3 лопатками, м <sup>3</sup>   The volume of soil per square meter thrown by 3 shovels, m <sup>3</sup>
1	-30	0,1	0,1	0,085
2	-20	0,1	0,095	0,08
3	-10	0,1	0,09	0,08
4	0	0,05	0,05	0,05
5	10	0,09	0,07	0,07
6	20	0,07	0,05	0,07
7	30	0,1	0,1	0,09

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

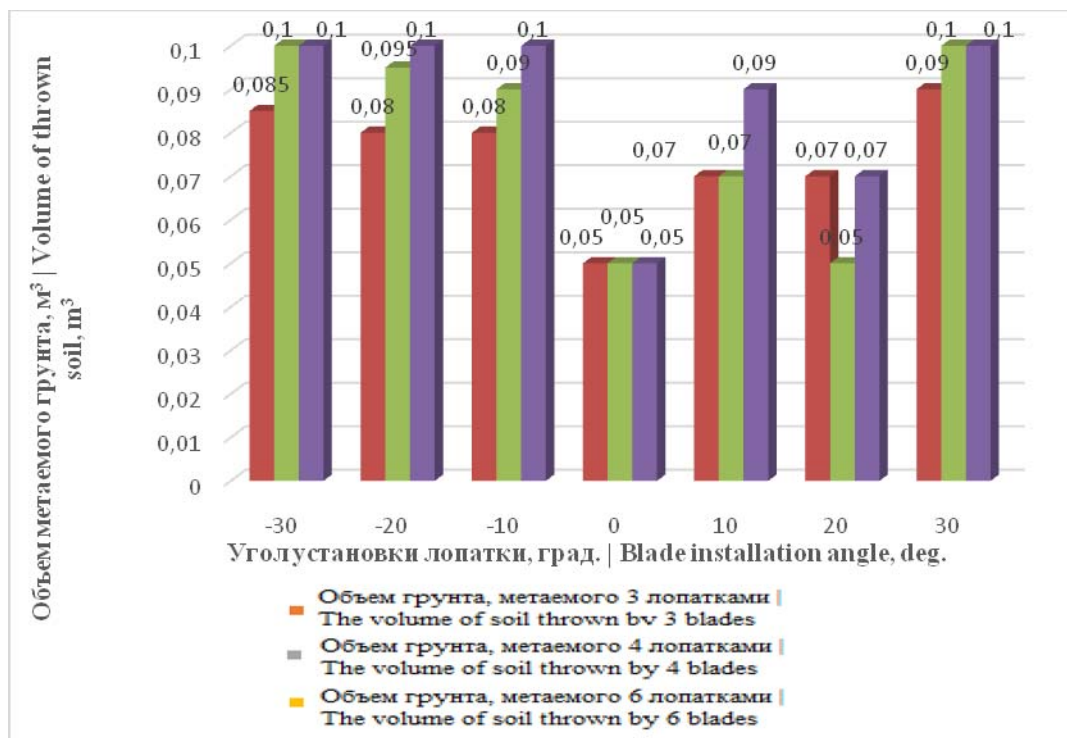


Рис. 6. Гистограмма зависимости объёма метаемого почвогрунта фрезой-метателем с 6, 4 и 3 лопатками от угла их установки

Источник: собственные вычисления авторов

Figure 6 - Histogram of the dependence of the volume of soil thrown by a milling cutter with 6, 4 and 3 blades on the angle of their installation

Source: authors' own calculations

### Выводы

С учётом требования к поставленной экспериментальной задаче по обеспечению минимального давления, оптимальным углом установки лопаток на фрезе-метателе является  $\gamma = -10^\circ$ , при таких параметрах обеспечивается эффективная работа любого из используемых в экспериментах числа лопаток. Метаемый объем почвогрунта превышает требуемый для локализации очага горения ( $0,06 \text{ м}^3$ ):  $0,08 \text{ м}^3$  при 3 лопатках,  $0,09 \text{ м}^3$  при 4 лопатках,  $0,1 \text{ м}^3$  при 6 лопатках. При данном угле установки для любого количества используемых лопаток величина давления изменяется в малом диапазоне от 7,634 МПа (3 лопатки) до 8,387

(4 лопатки). Однако при использовании 6 лопаток на фрезе-метателе наблюдается более плавная работа гидравлического привода без резких скачков давления, тем самым снижая его средний уровень. За счёт большего числа лопаток обеспечивается постоянный контакт рабочих поверхностей фрезы-метателя с почвогрунтом. Таким образом, по результатам обработки экспериментальных данных исследования процесса метания почвогрунта фрезой-метателем определено, что для оснащения конструкции фрезы-метателя рационально использовать 6 лопаток. Оптимальным значением угла  $\gamma$  их установки является  $-10^\circ$ .

### Список литературы

1. Berdnikova L. N. The Definition of ecological damage from natural fires. Vestnik KrasGAU. 2018 №2. p. 189-195.
2. Кухар И. В. и др. Влияние вредных и опасных факторов лесных пожаров на окружающую среду. Хвойные бореальной зоны. – 2019. – Т. 37. – №. 5. – С. 307-312.
3. Rakowska J. et al. Application tests of new wetting compositions for wildland firefighting. Fire technology. – 2017. – Т. 53. – №. 3. – С. 1379-1398.
4. Castillo M. E., Rodriguez F., Silva Y. Determining response times for the deployment of terrestrial resources for fighting forest fires. A case study: Mediterranean–Chile. Pontificia Universidad Catolica de Chile, Facultad de Agronomia e Ingenieria Forestal. – 2015. – Vol. 42. – pp. – 97-107.
5. Shegelman I. R. et al. The synthesis of solutions for the prevention and suppression of forest fires. Opción: Revista de Ciencias Humanas y Sociales. – 2019. – №. 24. – С. 218-231.
6. Ковалев А. П., Шешуков М. А., Позднякова В. В. Критерии приоритетности тушения лесных пожаров при массовом их возникновении. Лесохозяйственная информация. – 2015. – №. 3. – С. 47-55.
7. Gnusov M. A. et al. Improving the efficiency of forest fire prevention and suppression with of forest fire machine. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 919. – №. 3. – С. 032025.
8. Qian Y. H., Pan J. L., Chen S. P., Yao M. H. The Spreading Residue Harmonic Balance Method for Strongly Nonlinear Vibrations of a Restrained Cantilever Beam. Advances in Mathematical Physics. 2017, P. 1–8, doi:10.1155/2017/5214616.
9. Lambe C. G., Tranter C. J. Differential equations for engineers and scientists. Courier Dover Publications, 2018. 374 p.
10. Болотов А. Г. Определение теплофизических свойств почв с использованием систем измерения ZETLab. Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2012. – Т. 98. – №. 12. – С. 048-050
11. Патент № 2758319 С1 Российская Федерация, МПК А62С 27/00, А62С 3/02, E02F 3/04. Лесопожарный грунтосмет-полосопрокладыватель : № 2021105900 : заявл. 05.03.2021 : опубл. 28.10.2021 / М. А. Гнусов, М. В. Драпалюк, Д. Ю. Дручинин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова».

## References

1. Berdnikova L. N. The Definition of ecological damage from natural fires. Vestnik KrasGAU. 2018 №2. p. 189-195.
2. Kukhar I. V. et al. (2019) Vliyaniye vrednykh i opasnykh faktorov lesnykh pozharov na okruzhayushchuyu sredu [The impact of harmful and dangerous factors of forest fires on the environment] *Khvoynnye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], vol. 37. no. 5, pp. 307-312.
3. Rakowska J. et al. Application tests of new wetting compositions for wildland firefighting. Fire technology. – 2017. – Vol. 53. – №. 3. – P. 1379-1398.
4. Castillo M. E., Rodriguez F., Silva Y. Determining response times for the deployment of terrestrial resources for fighting forest fires. A case study: Mediterranean–Chile. Pontificia Universidad Catolica de Chile, Facultad de Agronomia e Ingenieria Forestal. – 2015. – Vol. 42. – pp. 97-107.
5. Shegelman I. R. et al. The synthesis of solutions for the prevention and suppression of forest fires. Opción: Revista de Ciencias Humanas y Sociales. – 2019. – №. 24. – P. 218-231.
6. Kovalev A. P., Sheshukov M. A., Pozdnyakova V. V. (2015) Kriterii prioritnosti tusheniya lesnykh pozharov pri massovom ikh vozniknovenii [Priority criteria for extinguishing forest fires in case of their mass occurrence], *Lesokhozyaystvennaya informatsiya*, [Forestry information], no 3, pp. 47-55.
7. Gnusov M. A. et al. Improving the efficiency of forest fire prevention and suppression with of forest fire machine. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. Vol. 919. №. 3. P. 032025.
8. Qian Y. H., Pan J. L., Chen S. P., Yao M. H. The Spreading Residue Harmonic Balance Method for Strongly Nonlinear Vibrations of a Restrained Cantilever Beam. Advances in Mathematical Physics. 2017, P. 1–8, doi:10.1155/2017/5214616.
9. Lambe C. G., Tranter C. J. Differential equations for engineers and scientists. Courier Dover Publications, 2018. 374 p.
10. Bolotov A. G. (2012) Opredeleniye teplofizicheskikh svoystv pochv s ispol'zovaniyem sistem izmereniya ZETLab [Determination of thermophysical properties of soils using ZETLab measurement systems] *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Altai State Agrarian University], vol. 98, no 12, pp. 048-050.
11. Gnusov M. A., Drapalyuk M. V., Druchinin D. Yu. Lesopozharnyy gruntomet-polosoprokladnyatel' [Forest fire soil thrower]. Patent RF no. 2758319.

## Сведения об авторах

*Драпалюк Михаил Валентинович* – доктор технических наук, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>, e-mail: [md@vlgta.vrn.ru](mailto:md@vlgta.vrn.ru)

*Попиков Петр Иванович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>; e-mail: [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru)

*Гончаров Павел Эдуардович* – кандидат технических наук, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0941-175X>, e-mail: [prorektorvlgta-ahr@yandex.ru](mailto:prorektorvlgta-ahr@yandex.ru)

*Дручинин Денис Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический универ-

ситет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687> e-mail: [druchinin.denis@rambler.ru](mailto:druchinin.denis@rambler.ru)

✉ *Гнусов Максим Александрович* – кандидат технических наук, научный сотрудник ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>, e-mail: [mgnusov@yandex.ru](mailto:mgnusov@yandex.ru)

*Поздняков Евгений Владиславович* – кандидат технических наук, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3904-867x>, e-mail: [pozd.ev@yandex.ru](mailto:pozd.ev@yandex.ru)

*Петков Александр Федорович* – аспирант, младший научный сотрудник, НИИ ИТЛК ВГЛУ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1765-6781> e-mail: [alexanderpetkoff@mail.ru](mailto:alexanderpetkoff@mail.ru)

### Information about the authors

*Drapalyuk Mikhail V.* – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>, e-mail: [md@vglta.vrn.ru](mailto:md@vglta.vrn.ru);

*Popikov Petr I.* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>; e-mail: [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru);

*Goncharov Pavel E.* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0941-175X>, e-mail: [prorektorvglu-ahr@yandex.ru](mailto:prorektorvglu-ahr@yandex.ru);

*Druchinin Denis Yu.* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>, e-mail: [druchinin.denis@rambler.ru](mailto:druchinin.denis@rambler.ru);

✉ *Gnusov Maksim A.* – Candidate of Technical Sciences, Researcher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>, e-mail: [mgnusov@yandex.ru](mailto:mgnusov@yandex.ru);

*Pozdnyakov Evgeny V.* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3904-867x>, e-mail: [pozd.ev@yandex.ru](mailto:pozd.ev@yandex.ru);

*Petkov Aleksandr F.* – post-graduate student, junior researcher, Research Institute of ITLC Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1765-6781> e-mail: [alexanderpetkoff@mail.ru](mailto:alexanderpetkoff@mail.ru).

✉ - Для контактов/Corresponding author