

МНОГОФАКТОРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФРЕЗЕРНОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА ЛЕСОПОЖАРНОЙ ГРУНТОМЕТАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

кандидат технических наук **С.В. Малюков**кандидат технических наук **Д.С. Ступников****А.В. Шаров****А.С. Ступников**ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

Среди большого количества конструктивных параметров фрезерного рабочего органа лесопожарной грунтометательной машины наиболее существенное влияние на эффективность технологического процесса оказывают параметры длины l_n и ширины h_n лопаток. В данной работе была проведена многофакторная оптимизация этих параметров. В качестве критериев эффективности были выбраны средняя дальность выброса грунта, затрачиваемая мощность и производительность. Задача оптимизации заключалась в поиске таких значений параметров l_n и h_n , при которых средняя дальность выброса грунта L_{cp} и производительность машины P были бы как можно больше, а затрачиваемая лесопожарной грунтометательной машиной мощность N – наименьшей. Для решения поставленной задачи была проведена серия из 16 компьютерных экспериментов разработанной конструкции. В данной серии параметр длины лопатки l_n изменяли на уровнях 170, 200, 230, 260 мм, а параметр ширины лопатки h_n – на уровнях 160, 180, 200, 220 мм. Аппроксимация полученных результатов экспериментальных исследований проводилась при помощи математической программы MathCAD 15 методом наименьших квадратов. Для проведения статистической оценки значимости коэффициентов полиномов использовали F-критерий (критерий Фишера). Полученные аналитические закономерности для удобства восприятия и анализа были отображены в виде графических изображений при помощи поверхностей отклика и линий уровней. Также были получены поверхность отклика и линии уровней, на которых отображена общая оптимальная область всех трех критериев эффективности. Проанализировав полученные зависимости, можем рекомендовать в качестве оптимальных значений длины и ширины лопатки $l_n = 200 \dots 230$ мм, $h_n = 180 \dots 250$ мм.

Ключевые слова: лесопожарная грунтометательная машина, оптимизация, аппроксимация, производительность, затрачиваемая мощность

MULTI-FACTOR OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF THE MILLING WORKING BODY OF A FOREST-FIRE CAMERA MACHINE

PhD (Engineering) **S.V. Malyukov**PhD (Engineering) **D.S. Stupnikov****A.V. Sharov****A.S. Stupnikov**FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh,
Russian Federation

Abstract

Among a large number of design parameters of a milling working body of a forest fire priming machine, the parameters of length l_n and width h_n of blades have the most significant effect on the efficiency of the process. In this paper, multifactor optimization of these parameters was carried out. The following efficiency criteria were chosen: the average distance of the soil release, the power expended and the productivity. The optimization task was to find such values of the parameters l_n and h_n , at which the average distance of the soil release L_{cp} and the productivity of the ma-

chine P would be as large as possible, and the power N spent by the fire-fighting soil-measuring machine - the smallest. To solve the problem, a series of 16 computer experiments of the developed design was carried out. In this series, the blade length parameter l_n was changed at levels 170, 200, 230, 260 mm, and the blade width parameter h_n was changed at levels 160, 180, 200, 220 mm. The approximation of the experimental results obtained was carried out using the mathematical program MathCAD 15 by the method of least squares. To carry out a statistical assessment of the significance of the coefficients of polynomials, the F-criterion was used. The obtained analytical laws for the convenience of perception and analysis were displayed in the form of graphic images using response surfaces and level lines. Also obtained were the response surface and the level lines on which the overall optimal range of all three performance criteria is displayed. After analyzing the obtained dependencies, we can recommend $l_n = 200 \dots 230$ mm, $h_n = 180 \dots 250$ mm as optimal values for the length and width of the blade.

Keywords: forest fire soil spreading machine, optimization, approximation, performance, power consumption

Введение

Леса являются важной частью экосистемы и играют значимую роль в сохранении и поддержании окружающей среды. Главная опасность – лесные пожары, поскольку их последствия наносят серьезный урон природе. Рост количества пожаров связан с глобальными климатическими изменениями на нашей планете. Поэтому необходимо своевременно обнаружить и погасить огонь, прежде чем он распространится [1, 3, 4]. Распространение лесных пожаров – сложный процесс, на который влияют множество факторов. Понимание отношений между этими факторами и тенденцией распространения лесных пожаров имеет жизненно важное значение для прогнозирования быстрого распространения огня.

Материал и методы исследования

Среди большого количества конструктивных и кинематических параметров лесопожарной грунтометательной машины наиболее существенное влияние на эффективность осуществления технологического процесса оказывают параметры лопаток фрезы-метателя, такие как длина лопасти l_n и ширина лопасти h_n . Для того чтобы определить оптимальные показатели параметров l_n и h_n , требуется провести их оптимизацию. Обычно основными критериями оптимизации являются такие параметры, как: производительность разработанной конструкции, качество осуществления технологического процесса, а также экономическая эффективность [2, 5, 6].

Для лесопожарной грунтометательной машины такими критериями являются:

L_{cp} – средняя дальность выброса грунта, м;

P – производительность машины, m^3/c ;

N – мощность, затрачиваемая гидросистемой агрегата на осуществление эффективного рабочего процесса, кВт.

Задача оптимизации заключается в поиске таких значений параметров l_n и h_n , при которых затрачиваемая лесопожарной грунтометательной машиной мощность N была бы наименьшей, а средняя дальность выброса грунта L_{cp} и производительность машины P были бы как можно больше. Задача оптимизации, в нашем случае, может быть записана с помощью, следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} L_{cp}(l_n, h_n) \rightarrow \max; \\ P(l_n, h_n) \rightarrow \max; \\ N(l_n, h_n) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (1)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Для того чтобы решить поставленную задачу оптимизации и выявить взаимосвязи между необходимыми критериями и параметрами, была проведена серия из 16 компьютерных экспериментов разработанной конструкции (табл. 1) [7, 11, 12, 13, 14].

В данной серии параметр длины лопатки l_n изменяли на уровнях 170, 200, 230, 260 мм, а параметр ширины лопатки h_n – на уровнях 160, 180, 200, 220 мм.

Аппроксимация полученных результатов экспериментальных исследований проводилась при помощи математической программы MathCAD 15 методом наименьших квадратов. После проведения аппроксимации были получены следующие аналитические выражения:

$$L_{cp}(l_n, h_n) = 0,413l_n + 0,173h_n + 1,2 \cdot 10^{-4}l_n \cdot h_n - 9,375 \cdot 10^{-4}l_n^2 - 3,889 \cdot 10^{-4}h_n^2 - 50,032; \quad (2)$$

$$P(l_n, h_n) = -3,715 \cdot 10^{-3}l_n + 3,382 \cdot 10^{-4}h_n + 4,767 \cdot 10^{-6}l_n \cdot h_n + 8,75 \cdot 10^{-6}l_n^2 - 2,222 \cdot 10^{-6}h_n^2 + 0,418; \quad (3)$$

$$N(l_n, h_n) = -0,101l_n + 0,072h_n - 7 \cdot 10^{-5}l_n \cdot h_n + 3,437 \cdot 10^{-4}l_n^2 - 9,722 \cdot 10^{-5}h_n^2 + 33,402, \quad (4)$$

где l_n и h_n – длина и ширина лопатки фрезы-метателя, измеряются в миллиметрах (мм);

L_{cp} – средняя дальность выброса грунта, м;

P – производительность машины, м³/с;

N – затрачиваемая мощность, кВт.

Для проведения статистической оценки значимости коэффициентов полиномов использовали F-критерий (критерий Фишера). Полученные аналитические закономерности $L_{cp}(l_n, h_n)$, $P(l_n, h_n)$,

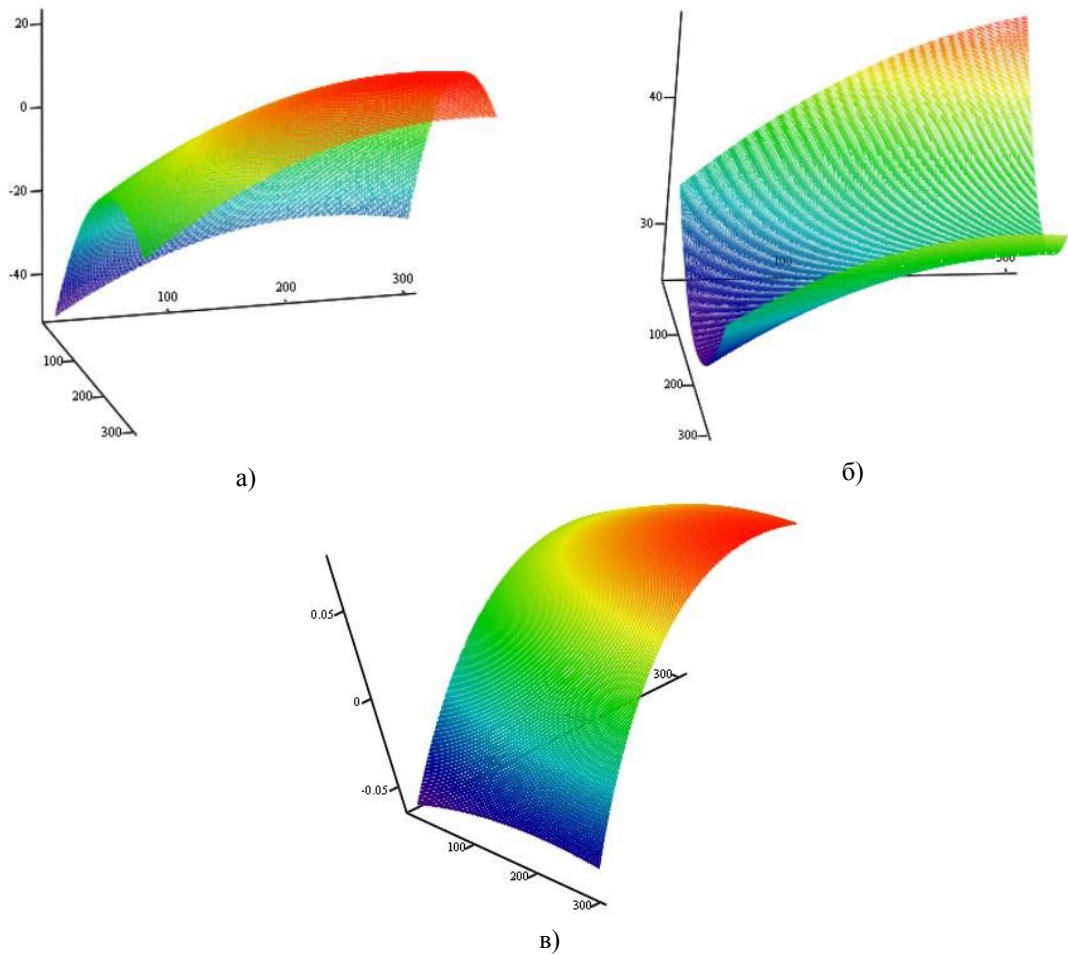
$N(l_n, h_n)$ для удобства восприятия были отображены в виде графических изображений при помощи поверхностей отклика (рис. 1).

Полученные поверхности отклика при дальнейшем количественном анализе были представлены в виде линий уровня (рис. 2). На каждой из полученных линий уровня и поверхности отклика факторное пространство (l_n, h_n) разбито на области: благоприятную (область красного цвета), в которой необходимый параметр оптимизации показывает максимальное или минимальное значение, и неблагоприятную (область фиолетового цвета), в которой нужный нам критерий оптимизации принимает обратное, негативное значение.

Таблица 1

Результаты теоретических экспериментов влияния конструктивных параметров фрезерного рабочего органа ЛГМ на показатели ее эффективности

№	h_n , мм	l_n , мм	N , кВт	L , м	P , м ³ /с
1	160	170	33,2	14,2	0,057
2	160	200	34,5	14,9	0,063
3	160	230	35	15,6	0,066
4	160	260	35,8	16,1	0,067
5	180	170	34,2	15,2	0,058
6	180	200	34,7	17,1	0,064
7	180	230	34,9	17,8	0,068
8	180	260	35	18,4	0,068
9	200	170	34,5	17,7	0,06
10	200	200	34,8	19,7	0,068
11	200	230	35	20,1	0,071
12	200	260	35,4	20,5	0,071
13	220	170	34,4	18	0,06
14	220	200	35,3	19,8	0,069
15	220	230	36,1	21,3	0,072
16	220	260	36,4	20,6	0,072



а – для средней дальности выброса грунта L_{cp} , м; б – для потребляемой мощности N , кВт;
 в – для производительности P , m^3/c ; где ось OX – длина лопатки l_l , мм, OY – ширина лопатки h_l , мм,
 OZ – один из показателей эффективности

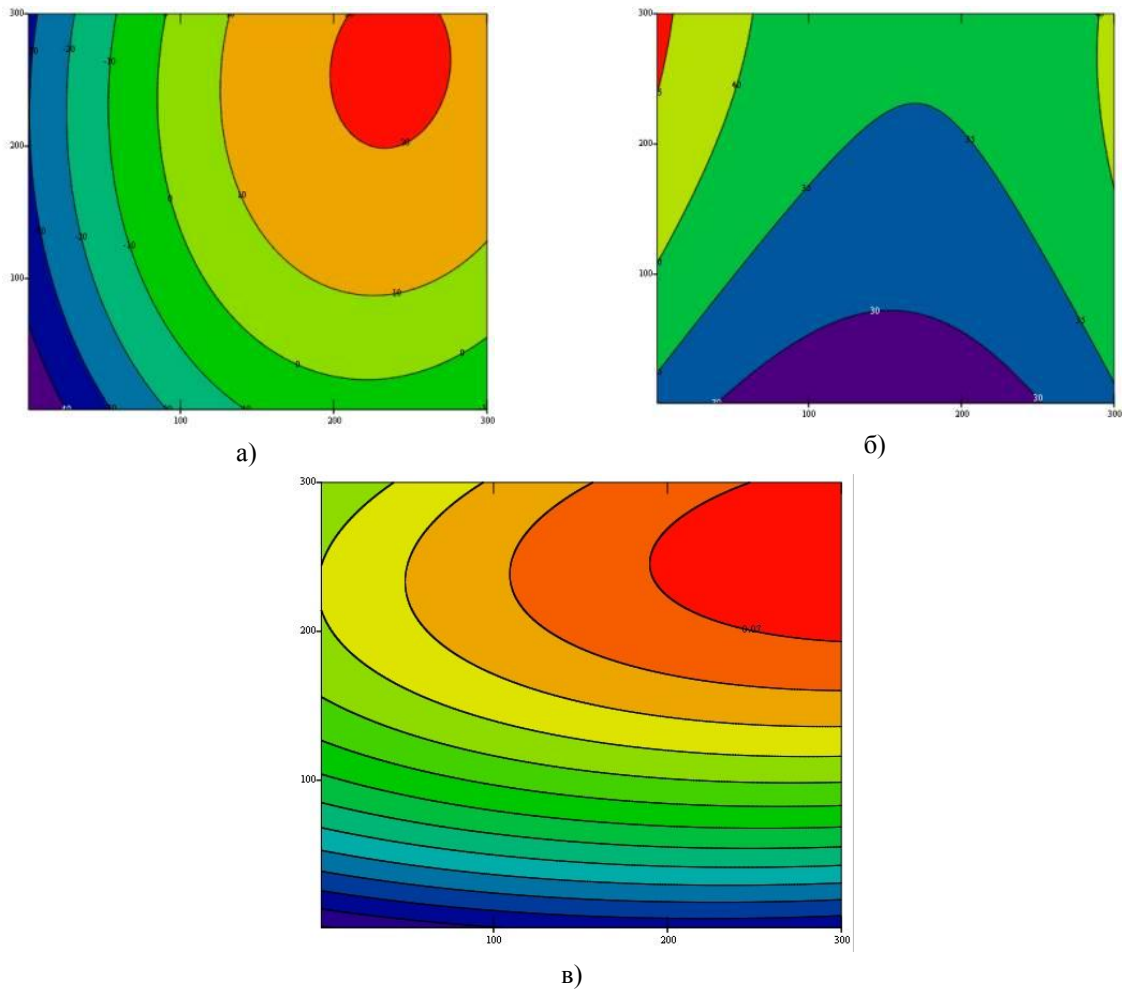
Рис. 1. Частные поверхности отклика при оптимизации конструктивных параметров l_l и h_l

Для того чтобы установить граничные значения необходимых параметров, которые будут делить неблагоприятные и благоприятные области, мы использовали общепринятое правило: благоприятная область должна занимать от 10 до 30 % факторного пространства, при этом не включать в себя области резких перепадов функции, а также должна иметь привязку к нормативным значениям каждого критерия [8, 9, 10].

В качестве границы между неблагоприятной и благоприятной областями для функции $L_{cp}(l_l, h_l)$ была принята изолиния 20 м; для $N(l_l, h_l)$ – изолиния 35 кВт; для $P(l_l, h_l)$ – изолиния $0,07 m^3/c$.

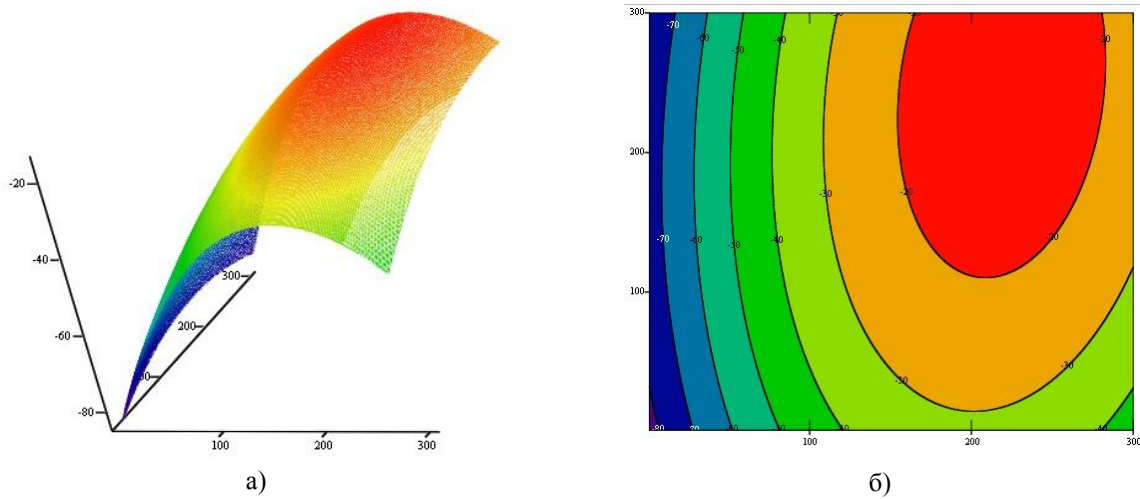
В результате полученные оптимизационные карты позволяют инженеру выбрать такие значения параметров длины и ширины лопаток фрезы грунтомета, при которых показатели эффективности находились бы в наиболее оптимальном диапазоне.

В дальнейшем благоприятные области трех критериев эффективности были наложены друг на друга (рис. 2, а, б, в). В результате получили поверхность отклика и линии уровней, которые являются общими для всех трех параметров. На них отображена общая оптимальная область всех трех критериев эффективности (рис. 3, а, б).



a – для $L_{cp}(l_l, h_l)$; $б$ – для $N(l_l, h_l)$; $в$ – для $P(l_l, h_l)$; где ось OX – длина лопатки l_l , мм, OY – ширина лопатки h_l , мм

Рис. 2. Оптимальные области факторного пространства



a – поверхность отклика; $б$ – линии уровней

Рис. 3. Общая оптимальная область факторного пространства параметров l_l и h_l ; где ось OX – длина лопатки l_l , мм, OY – ширина лопатки h_l , мм

Выводы

Анализ полученного рис. 3 показывает, что наиболее оптимальное сочетание конструктивных параметров длины и ширины лопатки имеет общую оптимальную зону всех трех параметров эффективности.

Проанализировав полученные зависимости, можем рекомендовать в качестве оптимальных значений длины и ширины лопатки $l_{л} = 200-230$ мм, $h_{л} = 180-250$ мм.

При этом лесопожарная грунтометательная машина выбрасывает грунт в зону пожара на расстоянии до 21 м, потребляет не более 38 кВт мощности, а производительность составляет, в среднем, $0,07$ м³/с.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации в рамках научного проекта № МК-6621.2018.8.

Библиографический список

1. Гнусов, М. А. Обоснование параметров комбинированных рабочих органов грунтомета для прокладки минерализованных полос в лесу : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : дис. ... канд. техн. наук : защищена 12.09.2014 / Гнусов Максим Александрович. – Воронеж, 2014. – 140 с.
2. Федорченко, И. С. Результаты экспериментальных исследований грунтомета лесопожарного / И. С. Федорченко // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – Красноярск, 2012. – № 9. – С. 162–166.
3. Комбинированный лесопожарный грунтомет и рекомендации по его применению / И. М. Бартенев, М. В. Драпалюк, П. Э. Гончаров [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 84. – С. 174–184.
4. Перспективные конструкции противопожарных грунтометов / П. Э. Гончаров, П. И. Попиков, М. А. Гнусов, Н. А. Шерстюков // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. – № 2-2 (7-2). – С. 54–59.
5. Кривцов, А. М. Деформирование и разрушение тел с микроструктурой / А. М. Кривцов. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 304 с.
6. Гончаров, П. Э. Лесопатрульный автомобиль на базе тяжелого грузового автомобиля повышенной проходимости / П. Э. Гончаров, П. И. Попиков, М. А. Гнусов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. – № 2-2 (7-2). – С. 64–69.
7. Обоснование параметров лесного грунтомета с комбинированными рабочими органами / М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, П. Э. Гончаров, М. А. Гнусов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. – № 2-2 (7-2). – С. 77–81.
8. Оптимизация параметров комбинированной машины для тушения лесных пожаров на основе теоретических и экспериментальных исследований / Л. Д. Бухтояров, М. А. Гнусов, М. В. Шавков [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 84. – С. 373–382.
9. Есков, Д. В. Оптимизация параметров и математическая модель процесса выброса грунта комбинированным фрезерным пожарным грунтометом / Д. В. Есков // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. – № 4-2 (9-2). – С. 208–212.
10. Study of efficiency of soil-thrower and fire-break major on the basis of mathematic simulation / I. M. Bartenev, S. V. Malyukov, M. A. Gnusov, D. S. Stupnikov // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 9. – Issue 4. – P. 1008–1018.
11. Three-Dimensional Dynamic Simulation System for Forest Surface Fire Spreading Prediction / J. Li, X. Li, C. Chen, H. Zheng, N. Liu // International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence. – 2018. – Vol. 32. – Issue 8. – DOI: 10.1142/S021800141850026X.

12. Modern designs of forest fires machines for soil extinguishment of fire / I. M. Bartenev, S. V. Malyukov, M. A. Gnusov, D. S. Stupnikov, A. D. Platonov // Engineering and earth sciences: applied and fundamental research (isees 2018). – Grozni, 2018. – P. 48–53.

13. Bartenev, I. M. Research and development of the method of soil formation and delivery in the form of a concentrated flow to the edge of moving ground forest fire / I. M. Bartenev, P. I. Popikov, S. V. Malyukov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science International Jubilee Scientific and Practical Conference "Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (FORESTRY-2018)". – 2019. – No. 226 (1) 012052. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012052.

14. Mikulas, M. Forest fires extinguishing using suitable fire-fighting equipment / M. Mikulas // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1001. – P. 318-323. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1001.318.

References

1. Gnusov M. A. *Obosnovanie parametrov kombinirovannyh rabochih organov gruntometa dlja prokladki mineralizovannyh polos v lesu* dis. kand. teh. nauk [Substantiation of the parameters of the combined working bodies of the ground meter for laying mineralized strips in the forest. Dis Ph.D. in Engineering]. Voronezh, 2014, 140 p. (In Russian).

2. Fedorchenko I. S. *Rezultaty jeksperimental'nyh issledovanij gruntometa lesopozharnogo* [The results of experimental studies of the soil fireman of the forest fire] *Vestnik krasnojarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University]. Krasnoyarsk, 2012, no. 9, pp. 162-166. (In Russian).

3. Bartenev I. M., Drapalyuk M. V., Goncharov P. E. et al. *Kombinirovannyj lesopozharnyj gruntomet i rekomendacii po ego primeneniju* [Combined forest fire primer paper and recommendations for its use] *Politematicheskij setевой elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polytematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], 2012, no. 84, pp. 174-184. (In Russian).

4. Goncharov P. E., Popikov P. I., Gnusov M. A., Sherstyukov N. A. *Perspektivnye konstrukcii protivopozharnyh gruntometov* [Perspective designs of fireproof primers] *Aktual'nye napravlenija nauchnyh issledovanij XXI veka: teorija i praktika* [Actual areas of research of the XXI century: theory and practice], 2014, Vol. 2, no. 2-2 (7-2), pp. 54-59. (In Russian).

5. Krivtsov A. M. *Deformirovanie i razrushenie tel s mikrostrukturaj* [Deformation and destruction of bodies with a microstructure]. Moscow, 2007, 304 p. (In Russian).

6. Goncharov P. E., Popikov P. I., Gnusov M. A. *Lesopatrul'nyj avtomobil' na baze tjazhelogo gruzovogo avtomobilja povyshennoj prohodimosti* [Forest patrol vehicle based on a heavy off-road truck] *Aktual'nye napravlenija nauchnyh issledovanij XXI veka: teorija i praktika* [Actual areas of research of the XXI century: theory and practice], 2014, Vol. 2, no. 2-2 (7-2), pp. 64-69. (In Russian).

7. Drapalyuk M. V., Popikov P. I., Goncharov P. E., Gnusov M. A. *Obosnovanie parametrov lesnogo gruntometa s kombinirovannyimi rabochimi organami* [Justification of the parameters of the forest soil with combined working bodies] *Aktual'nye napravlenija nauchnyh issledovanij XXI veka: teorija i praktika* [Actual areas of research of the XXI century: theory and practice], 2014, Vol. 2, no. 2-2 (7-2), pp. 77-81. (In Russian).

8. Bukhtoyarov L. D., Gnusov M. A., Shavkov M. V. et al. *Optimizacija parametrov kombinirovannoj mashiny dlja tushenija lesnyh pozharov na osnove teoreticheskikh i jeksperimental'nyh issledovanij* [Optimization of parameters of a combined machine for extinguishing forest fires on the basis of theoretical and experimental research] *Politematicheskij setевой elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polytematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], 2012, no. 84, pp. 373-382. (In Russian).

9. Eskov D. V. *Optimizacija parametrov i matematicheskaja model' processa vybrosa grunta kombinirovannyim frezernym pozharnym gruntometom* [Optimization of parameters and mathematical model of the process of ejection of the soil combined milling fire primer] *Aktual'nye napravlenija nauchnyh issledovanij XXI veka:*

teorija i praktika [Actual areas of research of the XXI century: theory and practice], 2014, Vol. 2, no. 4-2 (9-2), pp. 208-212. (In Russian).

10. Bartenev I. M., Malyukov S. V., Gnusov M. A., Stupnikov D. S. Study of efficiency of soil-thrower and fire-break major on the basis of mathematic simulation. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, Volume 9, Issue 4, pp. 1008-1018.

11. Li J., Li X., Chen C., Zheng H., Liu N. Three-Dimensional Dynamic Simulation System for Forest Surface Fire Spreading Prediction, *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2018, Volume 32, Issue 8, DOI: 10.1142/S021800141850026X.

12. Bartenev I. M., Malyukov S. V., Gnusov M. A., Stupnikov D. S., Platonov A. D. Modern designs of forest fires machines for soil extinguishment of fire. *Engineering and earth sciences: applied and fundamental research (isees 2018)*, Grozni, 2018, pp 48-53.

13. Bartenev, I. M., Popikov P. I., Malyukov S. V. Research and development of the method of soil formation and delivery in the form of a concentrated flow to the edge of moving ground forest fire. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science International Jubilee Scientific and Practical Conference "Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (FORESTRY-2018)"*, 2019, no. 226 (1) 012052, DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012052

14. Mikulas, M. Forest fires extinguishing using suitable fire-fighting equipment. *Advanced Materials Research*, 2014, Volume 1001, pp. 318-323. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1001.318

Сведения об авторах

Малюков Сергей Владимирович – доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат технических наук, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: malyukovsergey@yandex.ru.

Ступников Дмитрий Сергеевич – преподаватель кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат технических наук, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: Neiti1992@mail.ru.

Шаров Андрей Викторович – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: androsharo2014@.yandex.ru.

Ступников Александр Сергеевич – магистр кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: Praim7@yandex.ru.

Information about authors

Malyukov Sergey Vladimirovich – Associate Professor, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», PhD (Engineering), Voronezh, Russian Federation; e-mail: malyukovsergey@yandex.ru.

Stupnikov Dmitriy Sergeevich – Lecturer, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», PhD (Engineering), Voronezh, Russian Federation; e-mail: Neiti1992@mail.ru.

Sharov Andrey Victorovich – post-graduate student, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation; e-mail: androsharo2014@.yandex.ru.

Stupnikov Alexandr Sergeevich – Master, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation; e-mail: Praim7@yandex.ru.