



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШНЕКОВОГО БАРАБАНА ЛЕСОПОЖАРНОГО ГРУНТОМЕТА-ПОЛОСОПРОКЛАДЫВАТЕЛЯ НА КАЧЕСТВО ОЧИСТКИ ПОТОКА ГРУНТА ОТ НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА

Петр И. Попиков<sup>1</sup>, [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru), 0000-0002-6348-8934

Антон К. Поздняков<sup>1</sup>✉, [mcaak74@gmail.com](mailto:mcaak74@gmail.com), 0000-0003-4590-695X

Максим А. Гнусов<sup>1</sup>, [ko407@yandex.ru](mailto:ko407@yandex.ru), 0000-0003-1653-4595

Александр Ф. Петков<sup>1</sup>, [alexanderpetkoff@mail.ru](mailto:alexanderpetkoff@mail.ru), 0000-0002-6348-8934

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

В настоящее время самым распространенным способом предупреждения и тушения лесных низовых пожаров является прокладка минерализованных полос и канав с применением лесных плугов, фрезерных полосопрокладывателей и грунтометательных машин. Однако грунтометы-полосопрокладыватели не снабжены устройствами для удаления напочвенного покрова с горючими растительными остатками из потока грунта, подаваемого в зону огня при тушении лесных низовых пожаров, что значительно снижает эффективность машины. Перспективными являются шнековые рабочие органы с гидроприводом, которые позволяют удалять напочвенный покров, однако необходимы дополнительные исследования кинематических и динамических параметров. Цель настоящей работы – повышение качества очистки потока грунта от напочвенного покрова, подаваемого на кромку огня лесопожарным полосопрокладывателем, за счет обоснования параметров шнековых рабочих органов. Анализ литературных источников показал, что при разработке лесопожарной грунтометательной машины целесообразно использовать современные математические модели взаимодействия объекта и среды, основанные на методе динамики частиц. Представлена новая конструкция лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя со шнековыми рабочими органами, которые предназначены для удаления напочвенного покрова. Составлена имитационная модель рабочего процесса шнековых рабочих органов с применением метода динамики частиц. Проведен базовый компьютерный эксперимент по очистке потока грунта от лесной подстилки. Установлено, что при разгоне рабочего органа давление в гидромоторе снижается приблизительно по экспоненциальному закону, а частота вращения рабочего органа увеличивается также приблизительно по экспоненциальному закону до  $4 \text{ с}^{-1}$ . Взаимодействие рабочего органа с пнем приводило к появлению отрицательного тормозящего момента до 4,5 КНм. В результате этого частота вращения барабана уменьшалась от 4 об/с практически до нуля. При уменьшении частоты вращения повышалось давление в гидромоторе привода рабочего органа до 12,5 МПа. Шнековый рабочий орган обеспечивает приблизительно одинаковую эффективность очистки потока грунта при толщине напочвенного покрова до 20 см, при этом полнота очистки составляет не менее 0,86, а потребляемая мощность не более 8 кВт.

**Ключевые слова:** моделирование, напочвенный покров, шнековый рабочий орган, грунтометательная машина

**Благодарности:** Авторы выражают признательность заведующему кафедрой механизации лесного хозяйства и проектирования машин доценту Дручинину Денису Юрьевичу за оказанную помощь в подготовке материалов для статьи.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90082 "Аспиранты"*

Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.



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


*Для цитирования:* Исследование влияния параметров шнекового барабана лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя на качество очистки грунта от напочвенного покрова / П. И. Попиков, А. К. Поздняков, М. А. Гнусов, А. Ф. Петков // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 2 (46). – С. 126–134. – Библиогр.: с. 131–133 (13 назв.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/11>

*Поступила:* 06.04.2022 *Принята к публикации:* 27.06.2022 *Опубликована онлайн:* 01.07.2022

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF AUGER DRUM PARAMETERS OF FOREST FIRE SOIL-THROWING MACHINE WITH THE FUNCTION OF FIRE-BREAK MAKER ON THE QUALITY OF SOIL FLOW CLEANING FROM THE GROUND COVER

**Petr I. Popikov**<sup>1</sup>, [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru),  0000-0002-6348-8934

**Anton K. Pozdnyakov**<sup>1</sup> , [mcak74@gmail.com](mailto:mcak74@gmail.com),  0000-0003-4590-695X

**Maksim A. Gnusov**<sup>1</sup>, [ko407@yandex.ru](mailto:ko407@yandex.ru),  0000-0003-1653-4595

**Alexander F. Petkov**<sup>1</sup>, [alexanderpetkoff@mail.ru](mailto:alexanderpetkoff@mail.ru),  0000-0002-6348-8934

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

### Abstract

Currently, the most common way to prevent and extinguish forest ground fires is laying of mineralized strips and ditches using forest plows, milling strip-laying machines and soil throwers. However, fire-break making soil throwers are not equipped with devices for removing the ground cover with combustible plant residues from the soil flow supplied to the fire zone when extinguishing forest ground fires, which significantly reduces the efficiency of the machine. Augers with a hydraulic drive are promising, which allow removing the ground cover, however, additional studies of kinematic and dynamic parameters are needed. The purpose of this work is to improve the quality of cleaning the flow of soil from the ground cover supplied to the edge of the fire by a forest fire stripper by substantiating the parameters of the auger working bodies. The analysis of literary sources showed that it is advisable to use modern mathematical models of the interaction between an object and the environment, based on the particle dynamics method, in the development of a forest fire soil-throwing machine. A new design of a forest fire soil thrower with auger working bodies, which are designed to remove the ground cover, is presented. A simulation model of the working process of auger working bodies using the particle dynamics method was compiled. A basic computer experiment was carried out to clean the soil flow from the forest litter. It has been established that pressure in the hydraulic motor decreases approximately exponentially, and the rotational speed of the working body also increases approximately exponentially up to 4 rpm during the acceleration of the working body. The interaction of the working body with the stump led to the appearance of a negative braking torque of up to 4.5 kNm. As a result, the rotational speed of the drum decreased from 4 rpm to almost zero. With a decrease in the rotational speed, the pressure in the hydraulic motor of the drive of the working body increased to 12.5 MPa. The auger working body provides approximately the same cleaning efficiency of the soil flow with a ground cover thickness of up to 20 cm, while the cleaning completeness is at least 0.86, and the power consumption is not more than 8 kW.

**Keywords:** modeling, ground cover, auger working body, soil-throwing machine

**Acknowledgement:** The authors express their gratitude to the head of Forestry Mechanization and Machine Design dept., Associate Professor Denis Yurievich Druchinin, for his assistance in preparing materials for the article.

*The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 20-38-90082 "Postgraduate students".*

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

**For citation:** Popikov P. I., Pozdnyakov A. K., Gnusov M. A., Petkov A. F. (2022) Investigation of the influence of auger drum parameters of forest fire soil-throwing machine with the function of fire-break maker on the quality of soil flow cleaning from the ground cover. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 12, No. 2 (46), pp. 126-134 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/11>.

**Received:** 06.04.2022 **Revised:** 15.05.2022 **Accepted:** 25.06.2022 **Published online:** 01.07.2022

## Введение

В настоящее время самым распространенным способом предупреждения и тушения лесных низовых пожаров является прокладка минерализованных полос и канав с применением лесных плугов, фрезерных полосопрокладывателей и грунтометательных машин. Однако грунтометы-полосопрокладыватели не снабжены устройствами для удаления напочвенного покрова с горючими растительными остатками из потока грунта, подаваемого в зону огня при тушении лесных низовых пожаров, что значительно снижает эффективность машины. Перспективными являются шнековые рабочие органы с гидроприводом, которые позволяют удалять напочвенный покров, однако необходимы дополнительные исследования кинематических и динамических параметров [2, 3, 9].

При разработке лесопожарной грунтометательной машины целесообразно использовать математическое моделирование, позволяющее с достаточной высокой точностью изучить эффективность машины и оптимизировать ее параметры без изготовления опытного образца [11, 12]. Современные математические модели взаимодействия объекта и среды, основанные на методе динамики частиц, позволяют с высокой физической адекватностью и высоким пространственным разрешением имитировать работу машины [4-6]. Толщина слоя лесной подстилки (напочвенного покрова) может существенно варьировать на лесных объектах различных типов или в пределах одного лесного объекта [13]. Лесопожарная грунтометательная машина со шнековым рабочим органом должна обеспечивать эффективную работу в широком диапазоне толщин напочвенного покрова [7].

Цель настоящей работы – повышение качества очистки потока грунта от напочвенного покрова, подаваемого на кромку огня лесопожарным полосопрокладывателем, за счет обоснования параметров шнековых рабочих органов.

## Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбрана новая конструкция лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя со шнековым рабочим органом [7].

Согласно изобретению, шнек снабжен радиальными зубьями и установлен на раме посредством стоек с подвижным соединением, при этом между рамой и шнеком установлена демпфирующая пружина с возможностью регулирования усилия сжатия и давления шнека на опорную поверхность, причем усилие на демпфирующей пружине не превышает предельное окружное усилие на концах радиальных зубьев шнека, развиваемое гидромотором при перекачивании шнека через препятствие.

На рис. 1 представлен общий вид лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя.

Разработанная имитационная модель обладает достаточной универсальностью и позволяет исследовать влияние десятков конструктивных, технологических параметров машины, а также параметров почвенно-растительной среды. Нами рассмотрено влияние на показатели эффективности только нескольких основных параметров для данной конструкции [9].

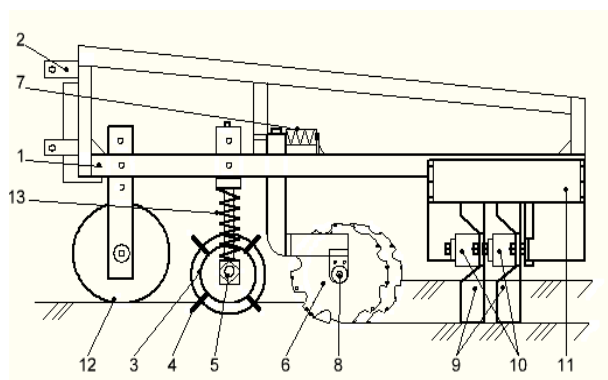


Рис. 1. Общий вид лесопожарного грунтоте-та-полосопрокладывателя, вид сбоку:

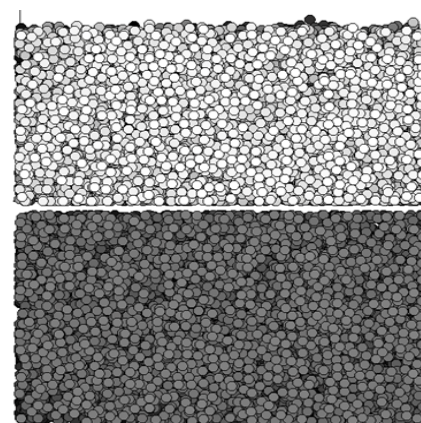
1-рама; 2-механизм навески; 3-шнек; 4-радиальные зубья; 5,8,10-гидромотор; 6-сферические диски; 7-предохранительные пружины растяжения; 9-фрезы метатели 9; 11-кожухи-направители; 12-опорные катки; 13-демпфирующая пружина

Figure 1. General view of the forest fire grunt-strip-laying machine, side view

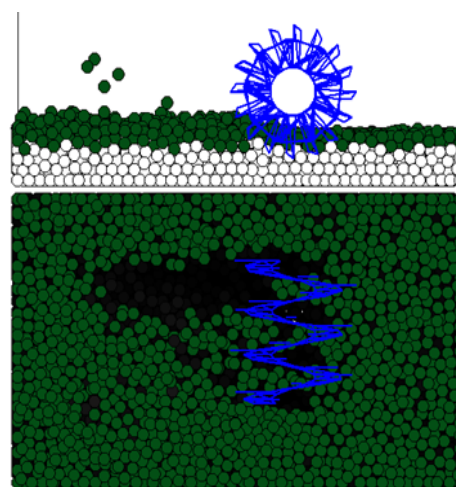
1-frame; 2-suspension mechanism; 3-auger; 4-radial teeth; 5,8,10-hydraulic motor; 6-spherical discs; 7-tension safety springs; 9-thrower cutters 9; 11-guide casings; 12-support rollers; 13-damping spring

Дальнейшее теоретическое исследование заключается в поочередном изменении параметров шнекового барабана и поиске диапазонов изменения их параметров, в которых показатели эффективности машины максимальны.

Базовый компьютерный эксперимент по очистке полосы от лесной подстилки состоял из четырех этапов. На первом этапе необходимое количество элементов (около 8000) распределялось случайным образом по объему моделирования (рис. 2, а). Под действием силы тяжести и межэлементных сил элементы оседали и формировали случайную плотную упаковку в нижней части пространства моделирования [8]. По завершении формирования плотной упаковки срезалась верхняя часть поверхности для выравнивания, и элементы разделялись на два слоя: нижний слой почвы и верхний слой напочвенного покрова (лесной подстилки) (рис. 2, б).



а



б

Рис. 2. Этапы движения шнекового рабочего органа в процессе компьютерного эксперимента по очистке поверхности почвы (вверху – проекция XZ, внизу – XY): а – начальное случайное размещение элементов перед формированием плотной упаковки; б – разделение элементов на почву и напочвенный покров и начальное размещение шнекового рабочего органа

Figure 2. The stages of movement of the screw working body in the process of a computer experiment on cleaning the soil surface (XZ projection at the top, XY at the bottom): а - initial random placement of elements before forming a dense package; б - separation of elements into soil and ground cover and initial placement of the screw working body

## Результаты и обсуждение

Эффективность фрагментации и скорость бокового движения напочвенного покрова зависит от частоты вращения  $f$  шнекового рабочего органа

на [10]. Для изучения влияния  $f$  на эффективность очистки полосы обработки провели серию компьютерных экспериментов, в которых  $f$  изменяли от 0 до 6 об/с с шагом 1 об/с. (рис. 3, а, б)

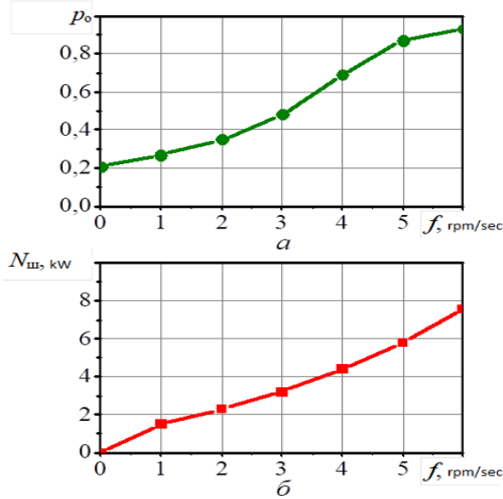


Рис. 3. Влияние частоты вращения шнекового барабана  $f$  на полноту очистки поверхности грунта от лесной подстилки  $p_0$  (а) и потребляемую шнеком мощность  $N_{ш}$  (б)

Figure 3. The effect of the rotation frequency of the screw drum  $f$  on the completeness of cleaning the soil surface from the forest litter  $p_0$  (a) and the power consumed by the screw  $N_{ш}$  (b)

Установлено, что зависимость полноты очистки от частоты вращения рабочего органа имеет сигмоидальный характер (рис. 3, а). При слишком малой частоте вращения 0 ... 3 об/с шнек не успевает сдвинуть вбок от полосы обработки весь фрагментированный объем напочвенного покрова [1]. При достаточно большой частоте вращения более 5 об/с шнек успевает сдвинуть вбок фрагментированный напочвенный покров, но определенная часть напочвенного покрова перемешивается с почвой и остается в полосе обработки, поэтому полнота очистки достигает более 0,9, но не достигает 1,0. С увеличением частоты вращения рабочего органа потребляемая гидромотором мощность увеличивается по закону, близкому к квадратичному (рис. 3, б).

Статистическая оценка полноты очистки от частоты вращения приведена в табл. 1.

Для проверки влияния толщины подстилки на показатели эффективности пашины проведена

серия компьютерных экспериментов, в которых изменяли толщину напочвенного покрова от 0 до 30 см с шагом 5 см.

Таблица 1  
Статистическая оценка полноты очистки  
от частоты вращения

Table 1  
Statistical relations of the completeness of cleaning  
from the speed of rotation

f	p	Статистический анализ Statistical analysis	
0	0,2	Среднее Average	0,536923
0,5	0,24	Стандартная ошибка Standard error	0,073706
1	0,27	Медиана Median	0,46
1,5	0,31	Мода Fashion	-
2	0,36	Стандартное отклонение Standard deviation	0,26575
2,5	0,4	Дисперсия выборки Sample variance	0,070623
3	0,46	Экспесс Excess	-1,66219
3,5	0,58	Асимметричность Asymmetry	0,261614
4	0,7	Интервал Interval	0,72
4,5	0,8	Минимум Minimum	0,2
5	0,85	Максимум Maximum	0,92
5,5	0,89	Сумма The amount	6,98
6	0,92	Счет Account	13

Обнаружено, что шнековый рабочий орган обеспечивает эффективную очистку до толщины напочвенного покрова 20 см: полнота очистки составляет не менее 0,86 (рис. 4, а), потребляемая мощность составляет не более 8 кВт (рис. 4, б). Здесь и далее эффективность процесса очистки лесной поверхности шнековым рабочим органом оценивалась двумя показателями:

$p_0$  – полнота очистки полосы обработки, рассчитываемая как отношение объемов удаленного напочвенного покрова к изначально присутствующему;

$N_{ш}$  – мощность, потребляемая шнековым рабочим органом, усредненная за время компьютерного эксперимента.

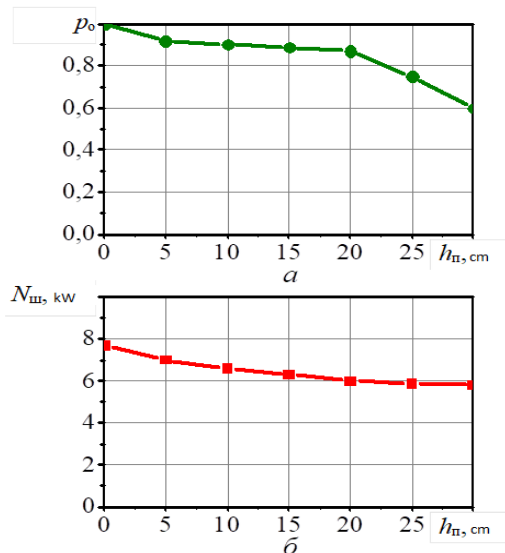


Рис. 4. Влияние толщины слоя лесной подстилки  $h_n$  на полноту очистки поверхности грунта от лесной подстилки  $p_0$  (а) и потребляемую шнеком мощность  $N_{ш}$  (б)

Figure 4. The effect of the thickness of the forest litter layer  $h_n$  on the completeness of cleaning the soil surface from the forest litter  $p_0$  (a) and the power consumed by the auger  $N_{ш}$  (b)

С увеличением толщины напочвенного покрова более 20 см значительно ухудшается полнота очистки, при этом снижается также потребляемая рабочим органом мощность. Если грунтометательная машина рассчитана на работу в условиях мощного напочвенного покрова, целесообразно увеличивать глубину нарезки шнека [3].

Таким образом, шнековый рабочий орган обеспечивает приблизительно одинаковую эффективность очистки полосы обработки при толщине напочвенного покрова до 20 см, при этом полнота очистки составляет не менее 0,86, а потребляемая мощность не более 8 кВт.

#### Заключение

1. Разработанная имитационная модель позволила получить кинематические и динамические характеристики (вращающий момент, частота вращения, давление в гидромоторе привода) шнекового рабочего органа в процессе очистки полосы. По мере разгона рабочего органа давление в гидромоторе снижается приблизительно по экспоненциальному закону, а частота вращения рабочего органа увеличивается также приблизительно по экспоненциальному закону до 4 об/с.

2. Взаимодействие рабочего органа с пнем приводило к появлению отрицательного тормозящего момента до 4,5 КНм. В результате этого частота вращения барабана уменьшалась от 4 об/с практически до нуля. При уменьшении частоты вращения повышалось давление в гидромоторе привода рабочего органа до 12,5 МПа. Шнековый рабочий орган обеспечивает приблизительно одинаковую эффективность очистки полосы обработки при толщине напочвенного покрова до 20 см, при этом полнота очистки составляет не менее 0,86, а потребляемая мощность не более 8 кВт.

#### Список литературы

1. 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. – 2019. – no. 226 (1). – 012052. – DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012052.
2. Попиков П. И. и др. Теоретическое исследование кинематических и динамических характеристик шнекового рабочего органа лесопожарной грунтометательной машины // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 3 (43). – С. 140–151.
3. Бартнев И. М., Поздняков А. К. Анализ рабочих органов технических средств для тушения лесных пожаров. Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – Воронеж, 2020. – № 1 (48). – С. 119–122. DOI: 10.34220/2308-8877-2020-8-1-119-122.
4. Zaitsev A. S. et al. Why are forest fires generally neglected in soil fauna research? A mini-review. Applied soil ecology. – 2016. – Т. 98. – P. 261-271.
5. Lourinho G., Brito P. Assessment of biomass energy potential in a region of Portugal (Alto Alentejo). Energy. – 2015. – Т. 81. – P. 189-201.

6. Бартенев И. М. и др. Комбинированный лесопожарный грунтотмет и рекомендации по его применению. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – №. 84. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kombinirovannyy-lesopozharnyy-gruntomet-i-rekomendatsii-po-ego-primeneniyu> (дата обращения: 10.03.2022).
7. Патент № 2762160 Российская Федерация, МПК E02 F 3/18 (2006.01). Лесопожарный грунтотмет-полосопрокладыватель : № 2021117040; заявл. 10.06.2021; опублик. 16.12.2021 / П.И. Попиков, И.М. Бартенев, А.К. Поздняков, М.Н. Лысыч, В.П. Попиков, А.Ф. Петков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова». URL: <https://patents.google.com/patent/RU2541987C1/ru> (дата обращения: 10.03.2022).
8. Kitun A. V. et al. Determination of power to the drive of screw mixing working bodies. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Agrarian Series. – 2016. – №. 1. – С. 104-108.
9. Гнусов М. А., Попиков П. И., Малуков С. В., Шерстюков Н. А., Поздняков А. К. (2020) Повышение эффективности предупреждения и тушения лесных пожаров с помощью лесопожарной машины. ИОР: Материаловедение и инженерия (Том 919, № 3, стр. 032025). Издательство ВГД. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-rezhimov-raboty-lesopozharnoy-gruntometatelnoy-mashiny-s-gidroprivodom-na-pokazateli-effektivnosti> (дата обращения: 22.02.2022).
10. Thornton C., Cummins S. J., Cleary P. W. On elastic-plastic normal contact force models, with and without adhesion. Powder Technology. 2017. Vol. 315. P. 339-346.
11. Tsunazawa Y., Shigeto Y., Tokoro C., Sakai M. (2015). Numerical simulation of industrial die filling using the discrete element method. Chemical engineering science, 138, 791-809. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.23.11876.
12. Guo Y., Curtis J. S. (2015). Discrete element method simulations for complex granular flows. Annual Review of Fluid Mechanics, 47, 21-46. URL: <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-fluid-010814-014644> (дата обращения: 21.01.2022).
13. Орловский С. Н. Методика расчета рабочего органа грунтотмета для тушения кромки лесного низового пожара. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2014. – №. 4 (340). – С. 52-60.

### References

1. 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. – 2019. – no. 226 (1). – 012052. – DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012052.
2. Popikov P. I. et al. Theoretical study of kinematic and dynamic characteristics of the screw working body of a forest fire ground-sweeping machine. Forestry engineering journal. – 2021. – Vol. 11. – no. 3 (43). – P. 140-151.
3. Bartenev I. M., Pozdnyakov A. K. Analysis of working bodies of technical means for extinguishing forest fires. Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. Voronezh, 2020. № 1 (48). Pp. 119-122. DOI: 10.34220/2308-8877-2020-8-1-119-122.
4. Zaitsev A. S. et al. Why are forest fires generally neglected in soil fauna research? A mini-review. Applied soil ecology. – 2016. – Vol. 98. – P. 261-271.
5. Lourinho G., Brito P. Assessment of biomass energy potential in a region of Portugal (Alto Alentejo). Energy. – 2015. – Vol. 81. – P. 189-201.
6. Bartenev I. M. Kombinirovannyy lesopozharnyy gruntomet i rekomendatsii po ego primenenii [Combined forest fire gruntomet and recommendations for its use]. Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. 2012. no. 84. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kombinirovannyy-lesopozharnyy-gruntomet-i-rekomendatsii-po-ego-primeneniyu> (date of the application: 10.03.2022).
7. Patent No. 2762160 Russian Federation, IPC E02F 3/18 (2006.01). Forest fire grunt-strip-laying machine : No. 2021117040; application 10.06.2021; publ. 16.12.2021 / P.I. Popikov, I.M. Bartenev, A.K. Pozdnyakov,

M.N. Lysych, V.P. Popikov, A.F. Petkov; applicant and patent holder of the Federal State Educational Institution "VGLTU named after G.F. Morozov". <https://patents.google.com/patent/RU2541987C1/ru> (accessed: 03/10/2022).

8. Kitun A. V. et al. Determination of power to the drive of screw mixing working bodies. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Agrarian Series. – 2016. – №. 1. – С. 104-108.

9. Gnusov M. A., Popikov P. I., Malyukov S. V., Sherstyukov N. A., Pozdnyakov A. K. (2020) Improving the effectiveness of prevention and extinguishing of forest fires with the help of a forest fire engine. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 919, no. 3, p. 032025). VGD Publishing House. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-rezhimov-raboty-lesopozharnoy-gruntometatelnoy-mashiny-s-gidroprivodom-na-pokazateli-effektivnosti> (date of access: 22.02.2022).

10. Thornton C., Cummins S. J., Cleary P. W. On elastic-plastic normal contact force models, with and without adhesion. Powder Technology. 2017. Vol. 315. P. 339-346.

11. Tsunazawa Y., Shigeto Y., Tokoro C., Sakai M. (2015). Numerical simulation of industrial die filling using the discrete element method. Chemical engineering science, 138, 791-809. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.23.11876.

12. Guo Y., Curtis J. S. (2015). Discrete element method simulations for complex granular flows. Annual Review of Fluid Mechanics, 47, 21-46. URL: <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-fluid-010814-014644> (date of access 21.01.2022)

13. Orlovsky, S. N. Method of calculation of the working body of a grenade launcher for extinguishing the edge of a forest grass-roots fire // Izvestiya vuzov. Forest journal. – 2014. – no. 4 (340). – P. 52-60.

### Сведения об авторах

*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)

✉ *Поздняков Антон Константинович* – аспирант 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/0000-0003-4590-695X>, e-mail: [mcaк74@gmail.com](mailto:mcaк74@gmail.com)

*Гнусов Максим Александрович* – кандидат технических наук кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, заведующий лабораторией 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: [ko407@yandex.ru](mailto:ko407@yandex.ru)

*Петков Александр Федорович* – аспирант 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: [alexanderpetkoff@mail.ru](mailto:alexanderpetkoff@mail.ru)

### Information about the authors

*Popikov Petr Ivanovich* – DSc (Engineering), 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)

✉ *Pozdnyakov Anton Konstantinovich* – post-graduate student 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/0000-0003-4590-695X>, e-mail: [mcak74@gmail.com](mailto:mcak74@gmail.com).

*Gnusov Maksim Aleksandrovich* – Candidate of Technical Sciences of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Head of the Laboratory, 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: [ko407@yandex.ru](mailto:ko407@yandex.ru)

*Petkov Aleksandr Fedorovich* – post-graduate student 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: [alexanderpetkoff@mail.ru](mailto:alexanderpetkoff@mail.ru).

- Для контактов/Corresponding author