



РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА РОТОРА-МЕТАТЕЛЯ ЛЕСОПОЖАРНОЙ ГРУНТОМЕТАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

Михаил В. Драпалюк¹, michael1@yandex.ru, 0000-0002-8029-2706

Александр Ф. Петков¹✉, alexanderpetkoff@mail.ru, 0000-0002-6348-8934

Антон К. Поздняков¹, mcak74@gmail.com, 0000-0003-4590-695X

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

При решении проблемы повышения эффективности лесопожарной грунтометательной машины, содержащей многоступенчатый ротор-метатель, предлагается конструкция, в которой осуществляется полная подача почвенного вала одновременно ко всем лопаткам многоступенчатого ротора-метателя. Определение кинематических параметров процесса метания необходимо моделировать с учётом физико-механических свойств почвогрунта. Целью данной работы является повышение эффективности профилактики и тушения лесных пожаров грунтом путем обоснования параметров грунтометательной машины на основе имитационного моделирования рабочего процесса ротора-метателя. В результате проведения вычислительного эксперимента представлены графики по определению угла вылета почвогрунта и дальности выбрасывания с нулевым углом наклона лопатки и по определению угла вылета почвогрунта и дальности выбрасывания с комбинированным углом наклона лопатки. При заданных значениях радиусов дисков максимальная доля грунта выбрасывается третьим диском, а минимальная первым. Поэтому результат вычислительного эксперимента по соотношению предсказуемо помещает максимальное количество почвогрунта (более 30 %) на дальности перекрывания траекторий движения частиц почвогрунта, выбрасываемого первым и третьим дисками, а именно в интервале 10,4-11,2 м. Таким образом, программный комплекс может рассчитывать не только траектории движения почвогрунта в зависимости от конструктивных и технологических параметров ротора-метателя, по которым можно оценить величину слоя выбрасывания, но и распределения почвогрунта в слое. Полученное в результате вычислительного эксперимента распределение можно использовать для накопления базы данных по дальности наибольшей части выбрасываемого почвогрунта и уточнения слоя максимального засыпания с учётом физико-механических свойств почвогрунта.

Ключевые слова: рабочий орган, грунтомет, полосопрокладыватель, почвогрунт, имитационная модель

Благодарности: Авторы выражают признательность профессору кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Попикову П.И. за оказанную помощь в подготовке материалов для статьи. Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90159 "Аспиранты"

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Драпалюк М. В. Результаты имитационного моделирования рабочего процесса ротора-метателя лесопожарной грунтометательной машины / М. В. Драпалюк, А. Ф. Петков, А. К. Поздняков // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 2 (46). – С. 89–99. – Библиогр.: с. 97–99 (18 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/8>.

Поступила: 25.05.2022 **Принята к публикации:** 29.06.2022 **Опубликована онлайн:** 01.07.2022

THE RESULTS OF SIMULATION MODELING OF THE WORKING PROCESS OF THE ROTOR-THROWER OF A FOREST FIRE SOIL-THROWING MACHINE

Mikhail V. Drapalyuk¹, michael1@yandex.ru,  0000-0002-8029-2706

Alexander F. Petkov¹ , alexanderpetkoff@mail.ru,  0000-0002-6348-8934

Anton K. Pozdnyakov¹, mcak74@gmail.com,  0000-0003-4590-695X

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

Abstract

When solving the problem of increasing the efficiency of a forest fire soil-throwing machine containing a multi-stage rotor-thrower, a design is proposed in which the soil shaft is fully fed simultaneously to all blades of the multi-stage rotor-thrower. Determination of the kinematic parameters of the throwing process must be modeled taking into account physical and mechanical properties of soil. The purpose of this work is to increase the effectiveness of the prevention and extinguishing of forest fires with soil, by substantiating the parameters of a soil-throwing machine based on simulation of the working process of a rotor-thrower. As a result of the computational experiment, graphs are presented for determining the soil outlet angle and the ejection range with a zero blade inclination angle and for determining the soil outlet angle and ejection distance with a combined blade inclination angle. For given values of disk radii, the maximum soil fraction is ejected by the third disk, and the minimum by the first one. Therefore, the result of the computational experiment on the ratio predictably places the maximum amount of soil (more than 30%) at the distance of overlapping the trajectories of movement of soil particles ejected by the first and third disks, namely, in the range from 10.4-11.2 m. Thus, the software package can calculate not only the trajectory of soil movement depending on the design and technological parameters of the thrower rotor, by which it is possible to estimate the size of the ejection layer, but also the distribution of soil in the layer. The distribution obtained as a result of a computational experiment can be used to accumulate a database on the range of the largest part of the ejected soil and to refine the layer of maximum backfilling, taking into account physical and mechanical properties of soil.

Keywords: working body, soil thrower, fire-break maker, soil, simulation model

Acknowledgement: The authors express their gratitude to Professor Popikov P.I. (Forestry Mechanization and Machine Design dept.) for the assistance in the preparation of materials for the article. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 20-38-90159 "Postgraduate students"

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

For citation: Drapalyuk M. V., Petkov A. F., Pozdnyakov A. K. (2022) The results of simulation modeling of the working process of the rotor-thrower of a forest fire soil-throwing machine. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 12, No. 2 (46), pp. 89-99 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/8>.

Received: 25.05.2022 **Revised:** 24.06.2022 **Accepted:** 29.06.2022 **Published online:** 01.07.2022

Введение

Одна из наиболее актуальных проблем лесного хозяйства – проблема борьбы с лесными

пожарами, которая в настоящее время вышла за рамки лесной отрасли и стала важной частью охраны природы и окружающей среды, социально-

государственной задачей в обеспечении безопасности населенных пунктов и жизни человека. Самыми эффективными для профилактики и ликвидации низовых лесных пожаров являются грунтометательные машины [1; 2]. Процесс метания грунта в количестве, достаточном для тушения лесной наземной кромки огня, представляет собой сложную систему взаимодействия рабочего органа со средой сыпучих элементов. Основная проблема, на наш взгляд, связана с недостаточным объемом почвогрунта, подаваемым существующими агрегатами.

Для повышения качества подготовки почвенного вала перед фрезами-метателями при создании противопожарных минерализованных полос применяются вырезные дисковые рабочие органы с гидроприводом [3]. В ходе серии экспериментов было установлено, что изменение угла атаки дисков оказывает существенное влияние на качество подготовки почвы и потребляемую мощность принудительного вращения от гидромоторов.

Процесс создания новой и усовершенствования существующей лесной техники, в том числе лесопожарной, производится при помощи математического и имитационного моделирования. В работах [4-6] представлены математические модели взаимодействия рабочих органов лесопожарной грунтометательной машины с почвогрунтом. При исследовании использовался метод многофакторного теоретического изучения процессов формирования почвенного потока, его движения в воздухе и воздействия на опушку лесного пожара с использованием созданной модели. Разработаны компьютерные программы, позволяющие исследовать влияние основных параметров рабочих органов на производительность, качество и энергоёмкость лесопожарной грунтометательной машины.

Повышение эффективности рабочего процесса лесопожарной грунтометательной машины может быть достигнуто за счет обоснования параметров энергосберегающего гидропривода ротора-метателя, который позволил уменьшить количество

срабатываний предохранительных клапанов при встрече ротора-метателя с препятствиями в виде пней и крупных боковых корней [7].

В работе [8] получены формульные соотношения для модели в рамках физики полёта материальной точки под углом к горизонту при минимальном влиянии внешней среды (пренебрежимо малой вязкости воздуха). Тем не менее, для моделирования метания грунта в «кромку огня» вязкость воздуха может иметь важное значение, поскольку при увеличении температуры от 20 до 1200 градусов Цельсия кинематическая вязкость воздуха возрастает с $15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ до $233,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (то есть в 15 раз). С помощью этих соотношений модели можно определять в результате вычислительного эксперимента величину средней дальности полёта грунта. Физико-механические свойства почвогрунта многие авторы учитывают с использованием метода частиц [9]. Для обоснования модели используется тот факт, что в основе всего разнообразия бессеточных методов лежит концептуальный подход метода частиц.

Однако проведённых исследований взаимодействия ротора-метателя с почвогрунтом и его метания на кромку огня недостаточно для обоснования кинематических и динамических параметров.

Целью данной работы является повышение эффективности профилактики и тушения лесных пожаров грунтом путем обоснования параметров грунтометательной машины на основе имитационного моделирования рабочего процесса ротора-метателя.

Материалы и методы

В качестве прототипа для проведения имитационного моделирования предложили и использовали конструкцию лесопожарной грунтометательной машины (рис. 1), в которой осуществляется полная подача почвенного вала одновременно ко всем лопаткам многоступенчатого ротора-метателя [10].

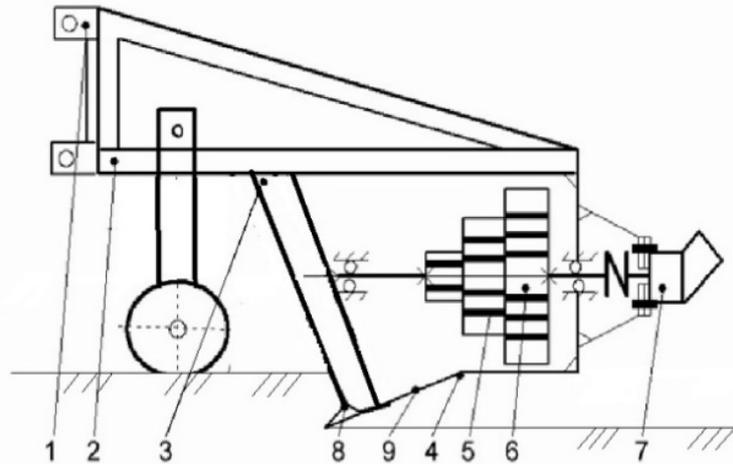


Рис. 1. Схема лесопожарной грунтометательной машины: 1 – механизм навески; 2 – рама; 3 – наклонные ножи; 4 – кожух-рыхлитель; 5 – лопатки; 6 – многоступенчатый ротор-метатель; 7 – гидромотор; 8 – скобы с лемехом; 9 – лопатка-подъемник

Figure 1. Scheme of a forest fire ground-sweeping machine: 1 – suspension mechanism; 2 – frame; 3 – inclined knives; 4 – casing-ripper; 5 – blades; 6 – multistage rotor-thrasher; 7 – hydraulic motor; 8 – brackets with a ploughshare; 9 – blade-lift

Источник: Лесопожарная грунтометательная машина. Бартенев Иван Михайлович, Попиков Петр Иванович, Петков Александр Федорович, Поздняков Антон Константинович: патент на изобретение 2762965, 24.12.2021. Заявка № 2021121717 от 21.07.2021

Source: Forest fire soil thrower Bartenev Ivan Mikhailovich, Popikov Petr Ivanovich, Petkov Alexander Fedorovich, Pozdnyakov Anton Konstantinovich patent for invention 2762965 c1, 2021-12-24. Application No. 2021121717; 2021-07-21

Приведённая конструкция содержит: механизм навески 1, раму 2, наклонные ножи 3, кожух-рыхлитель 4, лопатки 5, многоступенчатый ротор-метатель 6, гидромотор 7, скобы с лемехом 8, лотка-подъемник 9.

The above design contains: a suspension mechanism 1, a frame 2, inclined knives 3, a ripper casing 4, blades 5, a multistage rotor-thrasher 6, a hydraulic motor 7, brackets with a ploughshare 8, a tray-lift 9.

При однородном почвогрунте средний диск будет выбрасывать большую часть почвогрунта (более 12,53 %) по траектории с максимальной дальностью, тогда как углы метания первого диска ротора-метателя будут соответствовать баллистическим и их дальность не будет превышать 6 м. Неоднородность почвогрунта в модели будет характеризоваться комбинированным разбросом углов по дискам.

Поскольку основной частью исследуемого рабочего процесса является собственно процесс метания почвогрунта и выявление зависимости его кинематических параметров от таких технологиче-

ских параметров ротора-метателя, как скорость вращения, то на этапе исходного приближения необходимо определить базовые предположения для процесса кинематики полета грунта. Для решения этой задачи можно использовать модель поступательного движения материальной точки в поле силы тяжести, выброшенной под углом α к горизонту с высоты $h_{мет}$ с начальной скоростью $V_{мет}$. В этой модели движение материальной точки можно моделировать в двухкоординатном приближении, тогда при условии малости сопротивления воздуха в направлении метания (X) можно с большой долей вероятности полагать о постоянстве скорости, а в перпендикулярном направлении движения (Y) – о наличии ускорения (ускорения свободного падения g). Тогда зависимость координат от времени будет определяться известными соотношениями:

$$x(t) = V_{мет} t \cos(\alpha)$$

$$y(t) = h_{мет} + V_{мет} t \sin(\alpha) \quad (1)$$

Длительность полёта почвогрунта t можно определить из вполне логичного предположения, что в момент времени падения $y(t) = 0$. Таким образом, в результате решения квадратного уравнения получим модельное соотношение

$$t = \frac{V_{изг} \sin(\alpha) + \sqrt{(V_{изг} \sin(\alpha))^2 + \frac{2gh_{изг}}{g}}}{g} \quad (2)$$

С учётом (1) дальность метания будет определяться формульным соотношением

$$S = V_{изг} \frac{V_{изг} \sin(\alpha) + \sqrt{(V_{изг} \sin(\alpha))^2 + 2gh_{изг}}}{g} \cdot g \quad (3)$$

Соотношение (3) определяет кинематический параметр процесса метания почвогрунта в зависимости от угла вылета, величины скорости изначальной высоты метания. Эти параметры в случае использования трёхступенчатого ротора-метателя будут определяться такими конструктивными параметрами, как радиусы дисков, длина и угол наклона лопатки с учётом соотношений (1 и 2).

При нулевом угле наклона лопатки величина угла метания полностью определяется соотношением (2). Для уменьшения разброса почвогрунта от дисков ротора-метателя был введён такой конструктивный параметр, как угол наклона лопаток γ . При его комбинированном подборе можно добиться уменьшения разброса практически вдвое (рис. 2, б). Корректирование аксиоматики для угла и скорости метания трансформирует формульные соотношения:

$$\alpha_i = 0,5\pi - \arcsin \frac{h_i}{R} \quad (4)$$

$$V_i = \omega(R|i + 0,5L \cos(\gamma)) \quad (5)$$

Определение кинематических параметров процесса метания необходимо моделировать с учётом физико-механических свойств почвогрунта. В противном случае модель нельзя будет адаптировать к различным типам почвогрунта, а также к его слоистости. Поэтому классические модели, используемые для определения таких кинематических параметров, как дальность метания и разброс почвогрунта, требуют дальнейшей корректировки при условии сохранения их зависимости от технологических и конструктивных параметров ротора-метателя и функциональных факторов гидромотора и гидронасоса. В рамках такого подхода предлагаем адаптировать соотношения (1) к условиям реша-

емой задачи, оставив аксиомы для определения скорости вращения без корректировки.

Основной кинематической характеристикой имитационного моделирования процесса метания почвогрунта является его траектория. Поэтому в качестве выходной характеристики процесса была выбрана в двухкоординатном приближении функция $y(x)$. При этом для имитации траектории движения в качестве базовых аксиом выбраны рекуррентные соотношения для координат частиц почвогрунта в дискретные моменты времени t_j . Число дискретных моментов времени определяется шаговым интервалом моделирования (в настоящей реализации программного комплекса эта величина составляет 0,01 с)

$$x_i(t_j) = \begin{cases} V_i t_j \cos(\alpha_i), \text{ при } y_i(t_{j-1}) > y_{min} \\ x_i(t_{j-1}), \text{ при } y_i(t_{j-1}) < y_{min} \end{cases}$$

$$y_i(t_j) = \begin{cases} h_i + V_i t_j \sin(\alpha_i) - \frac{gt_j^2}{2}, \text{ при } y_i(t_{j-1}) > 0 \\ 0, \text{ при } y_i(t_{j-1}) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

В этих соотношениях $i = 1, 2, 3$ – номер диска ротора-метателя, соответственно, угол и скорость метания почвогрунта моделируются соотношениями

$$\alpha_i = 0,5\pi - \arcsin \frac{h_i}{R} \quad (5)$$

$$V_i = \omega \quad (6)$$

При этом h_i – высота метания для каждого диска, определяется согласно конструктивным параметрам ротора-метателя из табл. 1, рассчитанной из величины радиусов ступеней ротора-метателя.

Таблица 1

Конструктивные параметры ротора-метателя

Table 1

Design parameters of the thrower rotor

Номер диска i Disk number i	1	2	3
h_i , м h_i , m	0,6 м m	0,45 м m	0,3 м m
γ_i	51	33	19

Примечание: i – номер диска; h_i – высота метания диска; γ_i – угол наклона лопаток

Note: i – the disc number; h_i – the disc throwing height; γ_i – the angle of the blades

Источник: собственные вычисления автор(ов)
Source: own calculations

Таким образом, программный комплекс может рассчитывать не только траектории движения почвогрунта в зависимости от конструктивных и технологических параметров ротора-метателя, по которым можно оценить величину слоя выбрасывания, но и распределения грунта в слое. Полученное в результате вычислительного эксперимента распределение можно использовать для накопления базы данных по дальности наибольшей части выбрасываемого почвогрунта и уточнения слоя максимального засыпания с учётом физико-механических свойств почвогрунта.

Результаты и обсуждение

В результате проведения вычислительного эксперимента представлены графики по определению угла вылета почвогрунта (а) и дальности выбрасывания грунта (б) с нулевым углом наклона лопатки (рис. 2) и по определению угла вылета

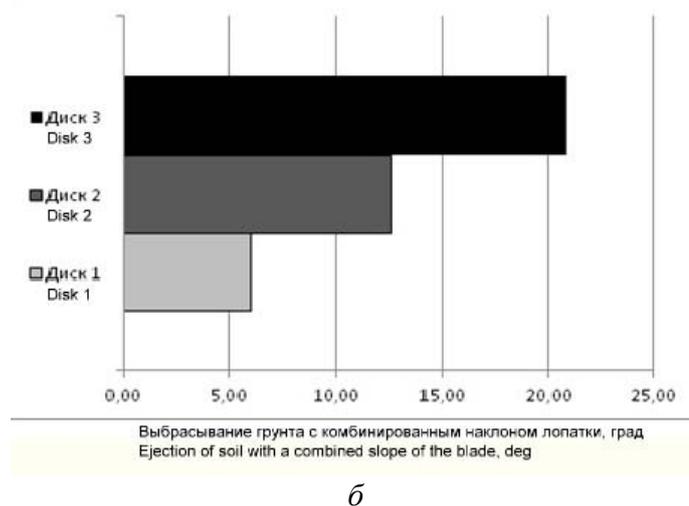
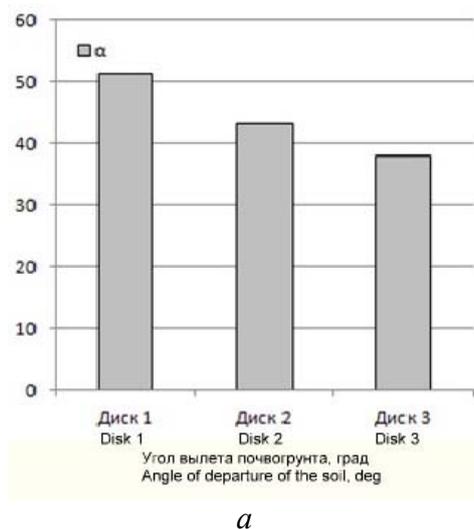


Рис. 2. Результаты вычислительного эксперимента по определению угла вылета почвогрунта (а) и дальности выбрасывания грунта (б) с нулевым углом наклона лопатки.
Figure 2. The results of a computational experiment to determine the angle of departure of the soil (a) and the range of ejection of soil (b) with a zero angle of inclination of the blade.

Источник: Лесопожарная грунтometательная машина. Бартенев Иван Михайлович, Попиков Петр Иванович, Петков Александр Федорович, Поздняков Антон Константинович: патент на изобретение 2762965, 24.12.2021. Заявка № 2021121717 от 21.07.2021.

Source: Forest fire soil thrower Bartenev Ivan Mikhailovich, Popikov Petr Ivanovich, Petkov Alexander Fedorovich, Pozdnyakov Anton Konstantinovich patent for invention 2762965 c1, 2021-12-24. Application No. 2021121717; 2021-07-21.

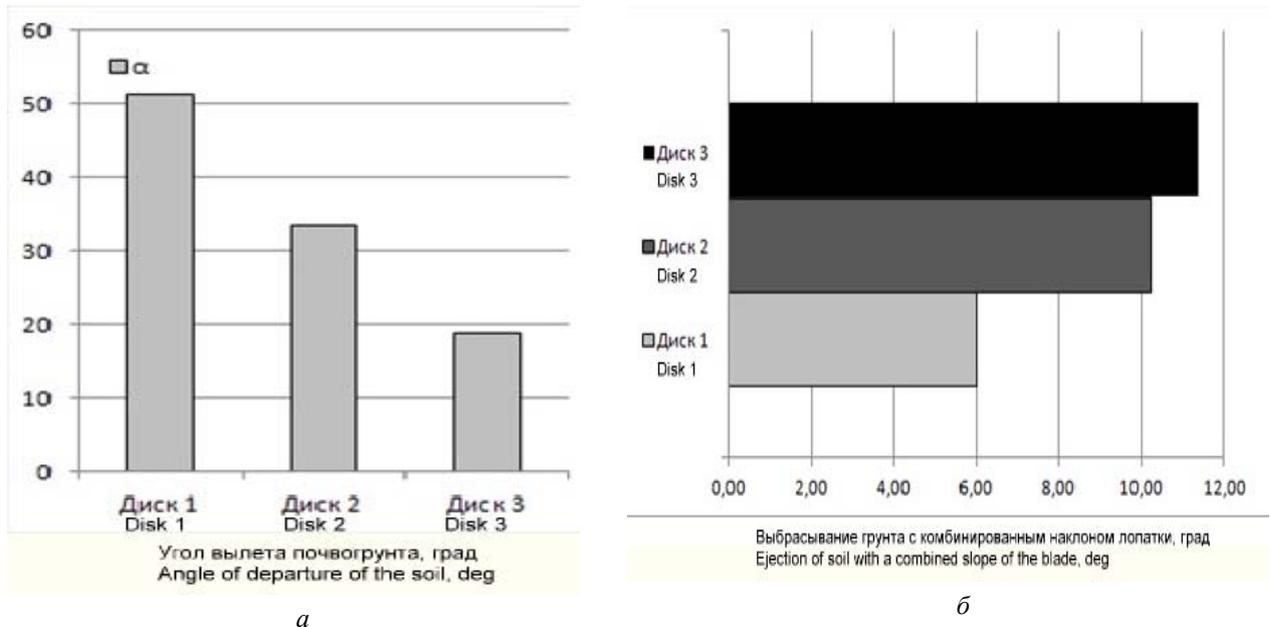


Рис. 3. Результаты вычислительного эксперимента по определению угла вылета почвогрунта (а) и дальности выбрасывания грунта (б) с комбинированным углом наклона лопатки
 Figure 3. Results of a computational experiment to determine the angle of departure of the soil (a) and the range of ejection of soil (b) with a combined angle of inclination of the blade

Источник: Лесопожарная грунтометательная машина. Бартенев Иван Михайлович, Попиков Петр Иванович, Петков Александр Федорович, Поздняков Антон Константинович: патент на изобретение 2762965, 24.12.2021. Заявка № 2021121717 от 21.07.2021

Source: Forest fire soil thrower Bartenev Ivan Mikhailovich, Popikov Petr Ivanovich, Petkov Alexander Fedorovich, Pozdnyakov Anton Konstantinovich patent for invention 2762965 c1, 2021-12-24. Application No. 2021121717; 2021-07-21

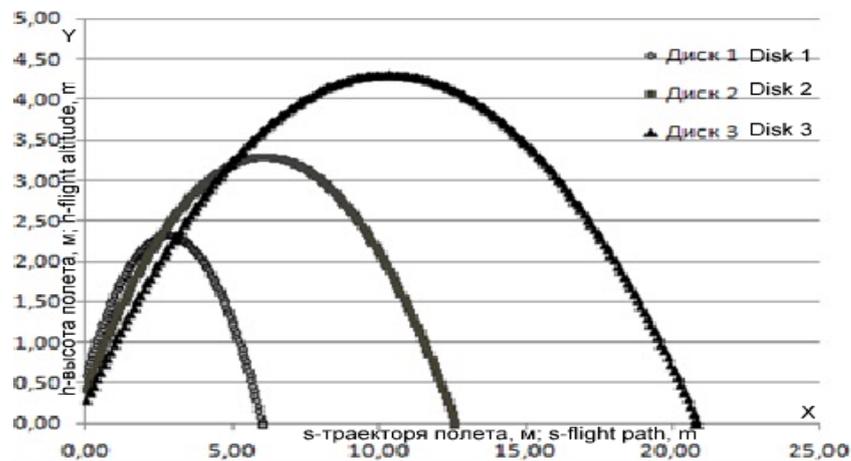


Рис. 4. Результаты вычислительного эксперимента по моделированию зависимости траектории движения частиц почвогрунта при нулевом угле наклона лопатки
 Figure 4. Results of a computational experiment on modeling the dependence of the trajectory of soil particles at zero angle of inclination of the blade

Источник: Лесопожарная грунтометательная машина. Бартенев Иван Михайлович, Попиков Петр Иванович, Петков Александр Федорович, Поздняков Антон Константинович: патент на изобретение 2762965, 24.12.2021. Заявка № 2021121717 от 21.07.2021

Source: Forest fire soil thrower Bartenev Ivan Mikhailovich, Popikov Petr Ivanovich, Petkov Alexander Fedorovich, Pozdnyakov Anton Konstantinovich patent for invention 2762965 c1, 2021-12-24. Application No. 2021121717; 2021-07-21

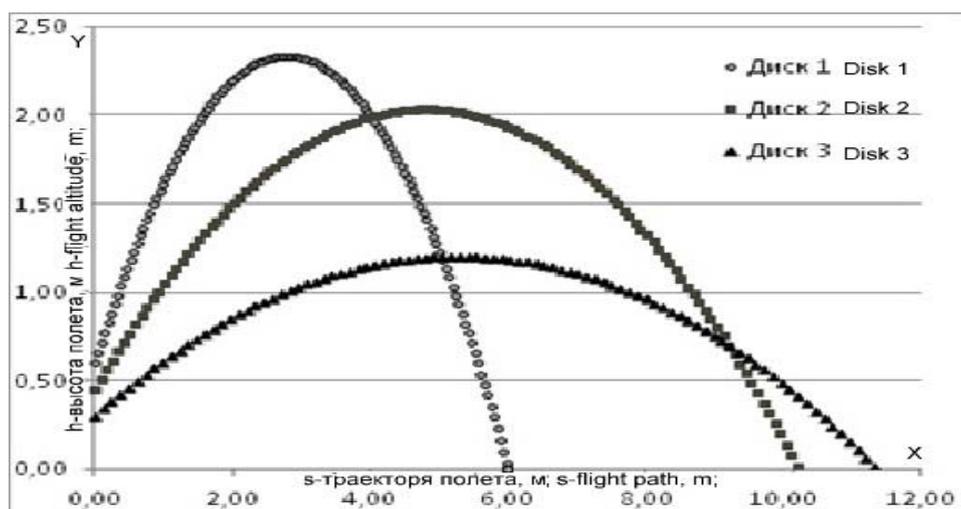


Рис. 5. Результаты вычислительного эксперимента по моделированию зависимости траектории движения частиц почвогрунта при комбинированном угле наклона лопатки
 Figure 5. The results of a computational experiment on modeling the dependence of the trajectory of the movement of soil particles at a combined angle of inclination of the blade

Источник: Лесопожарная грунтометательная машина. Бартенев Иван Михайлович, Попиков Петр Иванович, Петков Александр Федорович, Поздняков Антон Константинович: патент на изобретение 2762965, 24.12.2021. Заявка № 2021121717 от 21.07.2021

Source: Forest fire soil thrower Bartenev Ivan Mikhailovich, Popikov Petr Ivanovich, Petkov Alexander Fedorovich, Pozdnyakov Anton Konstantinovich patent for invention 2762965 c1, 2021-12-24. Application No. 2021121717; 2021-07-21

В результате проведения вычислительного эксперимента выяснилось, что без учёта физико-механических свойств почвогрунта дальность его полёта при нулевом угле наклона лопаток практически совпадает с результатами, вычисленными по формуле (6) с учётом конструктивных параметров дисков ротора-метателя (рис. 4). В случае же комбинированного распределения угла наклона лопаток (углы наклона лопаток приведены в табл. 1) дальности несколько меньше, но отличия не превышают нескольких процентов (рис. 5).

Заключение

Скорость вращения ротора-метателя во многом определяет скорость метания почвогрунта, таким образом, технические характеристики гидромотора и гидронасоса вместе с конструктивными и технологическими параметрами ротора-метателя существенно влияют на траекторию движения почвогрунта при метании и на распределение почвогрунта в слое выбрасывания. На основании таких выходных характеристик процесса метания, как траектория движения почвогрунта и распределение массы почвогрунта, в слое выбрасывания можно сформировать следующие критерии для многокри-

териальной оптимизации параметров трёхступенчатого ротора-метателя: величина слоёв высыпания от каждой ступени, дальность выбрасывания большей части почвогрунта и общая величина слоя высыпания. Таким образом, можно определить долю в процентах почвогрунта, распределённого каждым диском ротора-метателя. В результате можно определить по диаграмме распределения почвогрунта в слое выброса полосу, в которую выбрасывается более 50 % почвогрунта 3,6 м (интервал от 10,4 м до 14 м). По этой же диаграмме можно определить дальность, на которую выбрасывается большая часть почвогрунта 10,5 м.

При заданных значениях радиусов дисков максимальная доля грунта выбрасывается третьим диском, а минимальная – первым. Поэтому результат вычислительного эксперимента предсказуемо помещает максимальное количество грунта (более 30,33 %) на дальности перекрывания траекторий движения частиц почвогрунта, выбрасываемого первым и третьим дисками, а именно в интервале 10,4-11,2 м.

Программный комплекс может рассчитывать не только траектории движения почвогрунта в

зависимости от конструктивных и технологических параметров ротора-метателя, по которым можно оценить величину слоя выбрасывания, но и распределения грунта в слое, необходимого для повышения эффективности профилактики и тушения лесных пожаров.

Таким образом, рекуррентные соотношения для имитационного моделирования траекторий полёта почвогрунта при метании трёхступенчатым ротором-метателем (4-6) сформированы в рамках классической механики.

Список литературы

1. Бартенев 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.
2. Результаты экспериментальных исследований режимов работы лесопожарного полосопрокладывателя с гидроприводом вырезных дисковых рабочих органов / С. В. Зимарин, М. А. Гнусов, В. П. Попиков, Н. А. Шерстюков // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 1 (41). – С. 155–162.
3. 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.
4. Gnusov M. A., Drapalyuk M. V., Druchinin D. Y. Theoretical study of forest fire extinguishing machine use. Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1515. – №. 5. – С. 052066.
5. Bartenev I., Malyukov S., Gnusov M., Stupnikov D. (2018) Study of efficiency of soil-thrower and fire-break major on the basis of mathematic simulation. International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 9. 1008-1018.
6. Popikov P. I., Gnusov M. A., Popikov V. P., Sharov A. V. Increasing the efficiency of the working process of a forest fire ground-sweeping machine with an energy - saving hydraulic drive of the throwing rotor. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Сер. "International Scientific and Practical Conference Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering, ERSME 2020" 2020. С. 012021.
7. Bartenev I. M., Petkov A. F., Kamalova N. S. Mathematical model of the working process of a rotor-thrower of a forest fire ground-throwing machine. Forestry Journal. – 2021. – Vol. 11. – №. 1 (41). – Pp. 172-180.
8. Sun Z. et al. Technology of locating loose particles inside sealed electronic equipment based on Parameter-Optimized Random Forest. Measurement. 2021. Т. 186. С. 110164.
9. Лесопожарная грунтометательная машина. Бартенев Иван Михайлович, Попиков Петр Иванович, Петков Александр Федорович, Поздняков Антон Константинович. патент на изобретение 2762965 с1, 24.12.2021. Заявка № 2021121717 от 21.07.2021.
10. Цунадава Ю., Сигето Ю., Токоро С., Сакаи М. (2015). Численное моделирование процесса заполнения промышленных штампов методом дискретных элементов. Химическая инженерная наука, 138, 791-809. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.23.11876.
11. Дидманидзе О. Н., Андреев О. П., Парлюк Е. П. Оптимизация параметров машинно-тракторных агрегатов. 2017.
12. Sun Z. et al. Technology of locating loose particles inside sealed electronic equipment based on Parameter-Optimized Random Forest. Measurement. – 2021. – Т. 186. – С. 110164.
13. Механика жидкости и газа : лабораторный практикум / Н. С. Камалова, Н. Ю. Евсикова, В. И. Лисицын, В. В. Саушкин. – Воронеж, 2018. – 67 с.
14. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах: Учебник. 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Университетская книга, Логос, 2008. – 392 с.
15. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий ; пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. – Москва: Радио и связь, 1993. – 278 с.

16. Денисова О. К. Применение метода анализа иерархий для ранжирования бизнес-процессов (на примере вуза). Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. – 2013. – № 1-1 (163). – С. 166-173.

17. Кузнецов Д. С., Поздняков Е. В., Евсикова Н.Ю. Применение метода анализа иерархий для обоснования выбора наиболее эффективного корчевателя. Воронежский научно-технический вестник. 2020. Т. 1, № 1 (31). С. 133–139.

18. Князев А. Г., Камалова Н. С., Юдин Р. В. Системный подход к сравнительному анализу плугов для обработки почв при лесовосстановлении. Воронежский научно-технический Вестник. 2020. Т. 4. № 4 (34). С. 23–29.

References

1. 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.

2. Zimarin S. V., Gnusov M. A., Popikov V. P., Sherstyukov N. A. (2021) Results of experimental studies of the modes of operation of a forest fire strip-laying machine with a hydraulic drive of cut-out disc working bodies. Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering journal]. Vol. 11. № 1 (41), pp. 155-162 (in Russian).

3. 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.

4. Gnusov M. A., Drapalyuk M. V., Druchinin D. Y. Theoretical study of forest fire extinguishing machine use. Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1515. – №. 5. – С. 052066.

5. Bartenev I., Malyukov S., Gnusov M., Stupnikov D. (2018) Study of efficiency of soil-thrower and fire-break major on the basis of mathematic simulation. International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 9. 1008-1018.

6. Popikov P. I., Gnusov M. A., Popikov V. P., Sharov A. V. Increasing the efficiency of the working process of a forest fire ground-sweeping machine with an energy - saving hydraulic drive of the throwing rotor. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Сер. "International Scientific and Practical Conference Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering, ERSME 2020" 2020. С. 012021.

7. Bartenev I. M., Petkov A. F., Kamalova N. S. Mathematical model of the working process of a rotor-thrower of a forest fire ground-throwing machine. Forestry Journal. – 2021. – Vol. 11. – №. 1 (41). – Pp. 172-180.

8. Sun Z. et al. Technology of locating loose particles inside sealed electronic equipment based on Parameter-Optimized Random Forest. Measurement. 2021. Т. 186. С. 110164.

9. Forest fire ground-sweeping machine / Bartenev Ivan Mikhailovich, Popikov Peter Ivanovich, Petkov Alexander Fedorovich, Pozdnyakov Anton Konstantinovich patent for invention 2762965 c1, 12/24/2021. Application No. 2021121717 dated 21.07.2021.

10. 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.

11. Didmanidze O. N., Andreev O. P., Parlyuk E. P. Optimization of parameters of machine-tractor units. 2017.

12. Sun Z. et al. Technology of locating loose particles inside sealed electronic equipment based on Parameter-Optimized Random Forest. Measurement. – 2021. – Т. 186. – С. 110164.

13. Mechanics of liquid and gas : laboratory workshop / N. S. Kamalova [et al.]. - Voronezh, 2018. - 67 p.

14. Larichev O. I. Theory and methods of decision-making, as well as the Chronicle of events in Magic countries: Textbook. 3rd ed., revised and added. Moscow: University book, Logos, 2008. - 392 p.

15. Saaty T. Decision making. Hierarchy analysis method. - Moscow: Radio and communication, 1993. - 278 p.

16. Denisova O. K. Application of the hierarchy analysis method for ranking business processes (on the example of a university). Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnic University. Economic sciences. - 2013. - No. 1-1 (163). - S. 166-173.

17. Kuznetsov D. S., Pozdnyakov E. V., Evsikova N. Yu. Application of the Hierarchy Analysis Method to Justify the Choice of the Most Efficient Grubber. Voronezh Scientific and Technical Bulletin. 2020. Vol. 1, No. 1(31). pp. 133-139.

18. Knyazev A. G., Kamalova N. S., Yudin R. V. Systematic approach to the comparative analysis of plows for tillage during reforestation // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. 2020. V. 4. No. 4 (34). pp. 23-29.

Сведения об авторах

Драпалюк Михаил Валентинович – доктор технических наук, профессор, ректор 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: michael1@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.

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

Information about the authors

Drapalyuk Mikhail Valentinovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector, 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: michael1@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.

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: mcaк74@gmail.com.

✉ - Для контактов/Corresponding author