

Оптимизация формализованной модели ротора-метателя лесопожарной грунтометательной машины к условиям тушения

М.В. Драпалюк^a, Н.С. Камалова^b, А.Ф. Петков^c

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова,
ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Россия

^a michael1@yandex.ru, ^b rc@icmail.ru, ^c alexanderpetkoff@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-0889-2694>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-1765-6781>

Статья поступила 08.04.2022, принята 29.04.2022

Процессы создания новой и усовершенствования существующей лесной техники, в том числе лесопожарной, производятся при помощи имитационного моделирования. Одним из этапов имитационного моделирования является проведение компьютерных элементов для дальнейшей оптимизации параметров. Оптимизация параметров производилась на «Программном комплексе для моделирования траектории движения частиц почвогрунта в процессе работы лесопожарной грунтометательной машины, снабженной многоступенчатым ротором-метателем», который позволил изменять параметры модели и отслеживать изменения, подбирая таким образом наиболее удачные значения. На первом этапе моделирования было принято решение, что основным параметром эффективности модернизации станет величина средней дальности полета почвогрунта. Эффективность тушения лесного низового пожара повышается за счет полной подачи почвенного вала одновременно ко всем радиальным лопаткам многоступенчатого ротора-метателя. В спектре проблем, решаемых современной наукой, защита леса от неконтролируемых лесных пожаров не потеряет своей актуальности, поскольку их последствия катастрофичны и слабо предсказуемы. Поэтому развитие грунтометательной техники для профилактики и ликвидации лесных низовых пожаров могло бы внести свой вклад в расширение методов локализации и ликвидации очагов возгорания. Формализованное моделирование процесса взаимодействия комбинированного ротора-метателя с почвогрунтом с оптимизацией параметров для условий лесного пожара выявило влияние скорости вращения, параметров трехступенчатого ротора-метателя и адгезионных и адсорбционных свойств на траектории движения частиц почвогрунта, формирование слоя выбрасывания и распределение почвогрунта в слое выбрасывания. Результаты вычислительного эксперимента с помощью программного комплекса для имитационного моделирования траекторий движения частиц почвогрунта при вращении в кожухе комбинированного трехступенчатого ротора-метателя подтверждают, что углы наклона лопаток и радиусы ступеней влияют на траектории движения почвогрунта в процессе разбрасывания и на распределение почвогрунта в слое выбрасывания даже в условиях лесного низового пожара. 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 многокритериальной оптимизации параметров трехступенчатого ротора-метателя, как величина слоев высыпания от каждой ступени, дальность выбрасывания большей части почвогрунта и общая величина слоя высыпания.

Ключевые слова: многоступенчатый ротор-метатель; радиальные лопатки; U-образная скоба; лоткоподъемник; разрыхленный пласт почвогрунта; грунтомет; оптимизация; ротор-метатель; эксперимент; кинематические параметры.

Optimization of a formalized model of the soil rotor-thrower of a forest-fire machine to extinguishing conditions

M.V. Drapalyuk^a, N.S. Kamalova^b, A.F. Petkov^c

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov; 8, Timiryazev St., Voronezh, Russia

^a michael1@yandex.ru, ^b rc@icmail.ru, ^c alexanderpetkoff@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-0889-2694>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-1765-6781>

Received 08.04.2022, accepted 29.04.2022

The process of creating new and improving existing forestry equipment, including forest fire equipment, is carried out using simulation. One of the stages of simulation modeling is the implementation of computer elements for further optimization of the parameters. The optimization of the parameters is carried out on the "Software package for modeling the trajectory of the movement of soil particles during the operation of a forest fire ground-throwing machine equipped with a multi-stage rotor-thrower", which made it possible to change the model parameters and track changes, thus, selecting the most successful values. At the first stage of modeling, it was decided that the main parameter of the effectiveness of modernization will be the value of the average flight range of the soil. The efficiency of extinguishing a forest ground fire is increased due to the complete supply of the soil shaft simultaneously to all the radial blades of the multistage rotor-thrower. In the spectrum of problems solved by modern science, the protection of the forest from uncontrolled forest

fires will not lose its relevance, since the consequences are catastrophic and poorly predictable. Therefore, the development of soil throwing equipment for the prevention and elimination of forest ground fires could contribute to the expansion of methods for localizing and eliminating fires. Formalized modeling of the process of interaction of the combined rotor-thrower with the soil with optimization of parameters for forest fire conditions revealed the influence of the rotation speed, the parameters of the three-stage rotor-thrower and the adhesion and adsorption properties on: the trajectory of the soil movement, the formation of the ejection layer and the distribution of the soil in the ejection layer. The results of a computational experiment using a software package for simulating the trajectories of movement of soil particles during rotation in the casing of a combination three-stage rotor-thrower confirm that the angles of inclination of the blades and the radii of the steps affect the trajectories of movement of the soil in the process of spreading and the distribution of soil in the ejection layer even under conditions forest ground fire. The speed of rotation of the throwing rotor will largely determine the speed of throwing soil, thus, the technical characteristics of the hydraulic motor and hydraulic pump, together with the design and technological parameters of the throwing rotor, significantly affect the trajectory of the soil during throwing and the distribution of soil in the ejection layer. Based on such output characteristics of the throwing process as the trajectory of soil movement and the distribution of soil mass in the ejection layer, it is possible to form the following criteria for multicriteria optimization of the parameters of a three-stage thrower rotor, such as the size of the precipitation layers from each stage, the ejection ranges of most of the soil and the total size of the layer rashes.

Keywords: multistage rotor-thrower, radial blades, U-shaped bracket, tray-lifter, loosened soil layer, soil thrower, optimization, rotor-thrower, experiment, kinematic parameters.

Введение. Процесс создания новой и усовершенствования существующей лесной техники, в том числе лесопожарной, происходит при помощи имитационного моделирования. Одним из этапов имитационного моделирования является проведение компьютерных элементов [1; 2] для дальнейшей оптимизации параметров [3–9]. Поскольку невозможно управлять оптимизацией только математическим методом [10], оптимизация параметров производилась на программном комплексе для моделирования траектории движения частиц почвогрунта в процессе работы лесопожарной грунтометательной машины, снабженной многоступенчатым ротором-метателем [11], который позволил изменять параметры модели и отслеживать изменения, таким образом, подбирая наиболее удачные значения. На первом этапе моделирования было принято решение, что основным параметром эффективности модернизации станет величина средней дальности полета почвогрунта. Машина с многоступенчатым ротором-метателем показана на рис. 1 [12].

Эффективность тушения лесного низового пожара повышается за счет полной подачи почвенного вала одновременно ко всем радиальным лопаткам многоступенчатого ротора-метателя. Это достигается благодаря тому, что в лесопожарной грунтометательной машине ротор-метатель выполнен многоступенчатым и установлен на горизонтальной оси вращения выше уровня поверхности почвы и снабжен радиальными лопатками, размещенными со смещением по винтовой линии на каждой последующей ступени и регулируемые по углу установки относительно радиального положения, а рабочий орган для подготовки почвогрунта к перемещению в сторону кромки огня — в виде U-образной скобы с лемехом, по краям и по центру которой установлены наклонные черенковые ножи, и лотка-подъемника, наклоненного к горизонту на угол менее угла трения почвы о сталь.

В спектре проблем, решаемых современной наукой, защита леса от неконтролируемых лесных пожаров не теряет своей актуальности, поскольку последствия катастрофичны и слабопредсказуемы. Поэтому развитие грунтометательной техники для профилактики и ликвидации лесных низовых пожаров могло бы внести свой вклад в расширение методов локализации и ликвидации очагов возгорания.

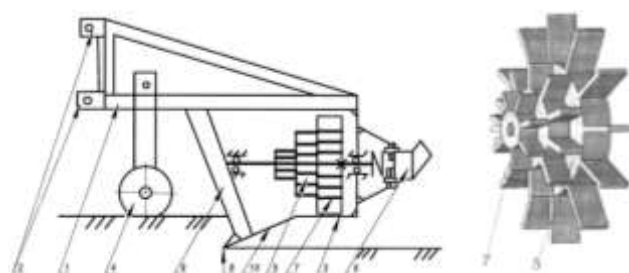


Рис. 1. Лесопожарная грунтометательная машина [12]

Целью статьи является оптимизация вычислительного эксперимента по определению критериев эффективности рабочего процесса трехступенчатого ротора-метателя к условиям низового лесного пожара. Объектом исследования будут кинематические параметры процесса метания почвогрунта на линию огня.

Объекты и методы исследования. *Корректировка базовых аксиом при оптимизации модели к условиям лесного низового пожара.* При наличии очага возгорания в воздушной среде на линии огня формируется устойчивая разность температур в определенном пространстве из-за низкого коэффициента теплопроводности λ воздушной среды. Поэтому на линии огня изменение энтропии в сферическом слое толщиной Δr за время Δt можно оценить как [13]:

$$dS = -\frac{\delta Q}{T} = -\frac{\lambda 4\pi r^2 dT \Delta t}{\Delta r T} \quad (1)$$

где T — температура в кельвинах, а dT — ее изменение.

С другой стороны, приращение энтропии, согласно известной формуле Больцмана, пропорционально относительному изменению термодинамической вероятности (dW/W) (коэффициент пропорциональности k_B , известная константа Больцмана). Определяя термодинамическую вероятность и ее приращение как $dW = dN/N_0$ и $W = N/N_0$ через отношение количества частиц почвогрунта или его приращение в исследуемом слое к общему числу частиц, можно получить из (1) соотношения:

$$\frac{dN}{N} = -\frac{\lambda 4\pi r^2 dT \Delta t}{\Delta r k_B T} \quad (2)$$

Если в правой части соотношения (2) числитель и знаменатель умножить на элементарную массу частицы

почвогрунта, то соотношение (2) трансформируется в соотношение для оценки относительного:

$$\frac{dm}{m} = -\frac{\lambda 4\pi r^2 dT \Delta t}{\Delta r k_B T} \quad (3)$$

Интересно, что величина $\chi = \frac{\lambda 4\pi r^2 dT}{\Delta r k_B}$ безразмерна. Если рассматривать соотношение (3) как дифференциальное уравнение первого порядка с начальными условиями $m=m_0$ при температуре $T=T_0$, то для убывания массы почвогрунта вблизи линии огня, обусловленного относительным изменением температуры, получится соотношение:

$$\Delta m = m_0 \exp\left(-\chi \ln\left(\frac{\Delta T}{T}\right)\right) \quad (4)$$

которое теоретически определяет тот неоспоримый факт, что частицы почвогрунта вытесняются от линии огня. Другими словами, вблизи линии огня сопротивление воздушной среды начинает стремительно увеличиваться, кроме того, почвогрунт в реакции сгорания преобразуется в некую субстанцию, которая, перемещаясь с налетающим почвогрунтом, с достаточной долей вероятности можно моделировать сплошной средой, в которой в направлении X действует сила сопротивления Стокса [14–15], определяемой для круглой частицы соотношением $F_C = 4\pi d \eta V_i$, где η — коэффициент динамической вязкости среды, а d — характеристический размер частицы почвогрунта. В рамках такого подхода уравнение динамики для частицы почвогрунта массой m_0 :

$$m_0 \frac{dV_i}{dt} = 4\pi d \eta V_i \quad (5)$$

Таким образом, величина скорости метания на полёте к линии огня в условиях низового лесного пожара будет меняться. Если в соотношении (5) ввести обозначение $\zeta = \frac{4\pi \eta d}{m_0}$, то это дифференциальное уравнение, которое имеет аналитическое решение с начальным условием $V_i(t_0) = V_{i0}$ — скорость метания ротора при вылете почвогрунта. Решение этого уравнения определяет формульное соотношение для корректировки аксиом модели при оптимизации для условий низового пожара.

Траектории движения в процессе метания почвогрунта в условиях лесного низового пожара. Решение уравнения (6) определяет величину скорости полета почвогрунта в дискретные моменты времени t_j как:

$$V_i(t_j) = \begin{cases} V_{i0} \exp(-\zeta(t_j - t_0)), & t_j > t_0 \\ V_{i0}, & t_j < t_0 \end{cases}, \quad (6)$$

где V_{i0} определяется соотношением $V_{i0} = \omega(R_i + 0,5L \cos(\gamma_i))$, а:

$$t_0 = x_0 / (V_{i0} \cos(\alpha_{ik})) \quad (7)$$

определяется расстоянием x_0 от ротора-метателя до области действия линии огня на состояние частиц почвогрунта. Таким образом, параметры оптимизации x_0 и ζ через изменение величины скорости метания (рис. 2) изменяют траектории движения частиц почвогрунта (2). Сравнение результатов вычислительного эксперимента по формированию траектории движения почвогрунта с оптимизацией модели на условия лесного низового по-

жара (рис. 3) и без обнаруживает существенное изменение дальности полета почвогрунта от всех дисков трехступенчатого ротора-метателя на величину слоя выбрасывания. Следовательно, оптимизация модели неминуемо отразится и на распределении почвогрунта в слое выбрасывания (рис. 4).

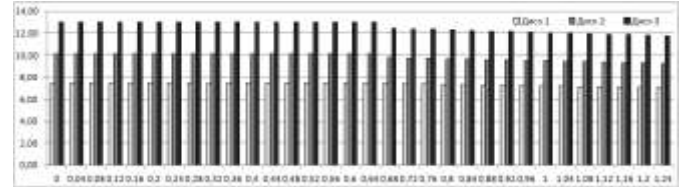


Рис. 2. Результаты вычислительного эксперимента по зависимости изменения величины скорости метания для различных дисков ротора-метателя с течением времени в условиях низового лесного пожара

Физический смысл параметра ζ связан с величиной интервала времени τ , в течение которого скорость полета почвогрунта уменьшится приблизительно в 2,7 раза. При этом он зависит от вязкости среды, характерного размера и массы частиц почвогрунта, которые можно определять для накопления в соответствующую базу данных в процессе комбинирования вычислительных экспериментов и натуральных испытаний.

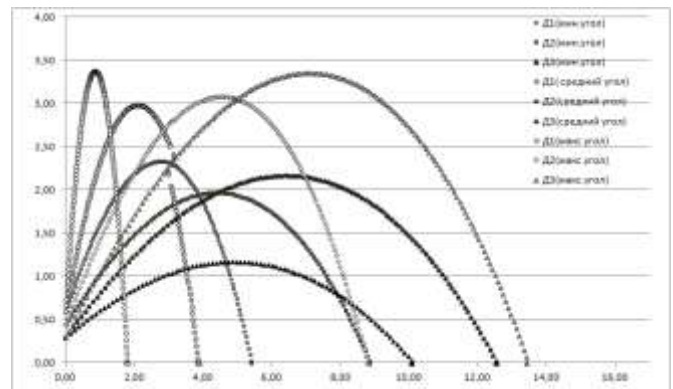


Рис. 3. Результаты вычислительного эксперимента зависимости по оптимизации кинетических и динамических параметров метания почвогрунта в условиях лесного низового пожара

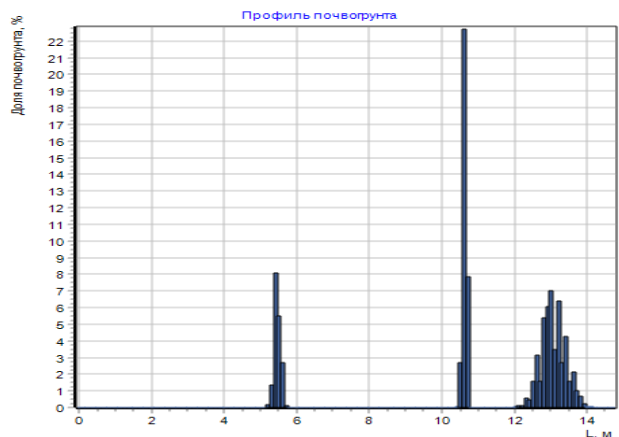


Рис. 4. Результаты вычислительного эксперимента по моделированию зависимости распределения доли выбрасываемого почвогрунта в слое выбрасывания в условиях низового лесного пожара

Базовая концепция для многокритериальной оптимизации параметров комбинированного ротора-метателя на основе выявленных закономерностей. Формализованное моделирование процесса взаимодействия комбинированного ротора-метателя с почвогрунтом с оптимизацией параметров для условий лесного пожара выявило влияние скорости вращения, параметров трехступенчатого ротора-метателя и адгезионных и адсорбционных свойств на следующие факторы:

- траектория движения почвогрунта;
- формирование слоя выбрасывания;
- распределение почвогрунта в слое выбрасывания.

Формирование базовой концепции для многокритериальной оптимизации параметров ротора-метателя с использованием выявленных закономерностей.

Выявление закономерностей и обоснование критериев для многокритериальной оптимизации параметров ротора-метателя. Результаты вычислительного эксперимента с помощью программного комплекса для имитационного моделирования траекторий движения частиц почвогрунта при вращении в кожухе комбинированного трехступенчатого ротора-метателя убедительно подтверждают, что углы наклона лопаток и радиусы ступеней влияют на траектории движения почвогрунта в процессе разбрасывания (рис. 3) и на распределение почвогрунта в слое выбрасывания (рис. 4) даже в условиях лесного низового пожара.

Скорость вращения ротора-метателя во многом определяют 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 многокритериальной оптимизации параметров трехступенчатого ротора-метателя: величина слоев высыпания от каждой ступени, дальность выбрасывания большей части почвогрунта и общая величина слоя высыпания.

В процессе метания почвогрунта согласно (8) с учетом физико-механических свойств почвогрунта (9) координата X каждой траектории формируется соотношением:

$$x_{ik}(t_j) = \begin{cases} V_i t_j \cos(\alpha_{ik}), \text{ п р и } y_{ik}(t_{j-1}) > y_{min} \\ x_{ik}(t_{j-1}), \text{ п р и } y_{ik}(t_{j-1}) < y_{min} \end{cases} \quad (8)$$

Из этого соотношения можно определить для всех возможных траекторий почвогрунта для каждого диска по данным программы полосу выброса из простого соотношения:

$$S_i = \max(x_{ik}) - \min(x_{ik}).$$

Тогда полная величина слоя выбрасывания:

$$S_0 = \max(x_{ik}) - \min(x_{ik}). \quad (9)$$

При этом долю почвогрунта, выбрасываемого каждым диском, можно определить, используя соотношение (8) как:

$$\delta_i = \Delta_i \cdot 100 \sum_{k=1}^N P(\alpha_{ik}) \varepsilon(\max(x_{ik}); \min(x_{ik})), \quad (10)$$

где $\varepsilon(\max(x_{ik}); \min(x_{ik}))$ - функция принадлежности к полосе выбрасывания диска, а Δ_i - определяется по соотношению

$$\Delta_i = \frac{V_i}{V_0} = \frac{R_i^2 - R_{i-1}^2}{R_3^2 - R_0^2},$$

а $P(\alpha_{ik})$ - определяется соотношением

$$P(\alpha_{ik}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\alpha_{ik} - \alpha_i - \Delta\alpha_i)^2}{2\sigma^2}\right).$$

Таким образом, можно определить долю в процентах почвогрунта, распределенного каждым диском ротора-метателя. В результате можно определить по диаграмме распределения почвогрунта в слое выброса полосу, в которую выбрасывается более 50 % почвогрунта S_f . По этой же диаграмме можно определить дальность, на которую выбрасывается большая часть почвогрунта L_f . Например, по диаграмме (рис. 2) $S_f = 3,6$ м (интервал от 10,4 до 14 м), а $L_f = 10,5$ м.

В результате критерием равномерности разброса почвогрунта можно считать величину:

$$\theta = \frac{S_f}{S_0} (\%). \quad (11)$$

Конструктивные параметры ротора-метателя и его скорость вращения позволяют определить такой критерий эффективности, как доля Ω выбрасываемого лопатками почвогрунта из кожуха поперечным сечением O в единицу времени в процентах, с учетом скорости движения трактора (V_T). Если считать, что почвогрунт собирается лопаткой в форме правильной пирамиды (высота пирамиды практически равна широте лопатки D), то искомым критерий можно оценить с помощью соотношения:

$$\Omega = \frac{\omega L D^2 (N_1 + N_2 + N_3)}{\sigma \pi O V_i}. \quad (12)$$

Таким образом, для многокритериальной оптимизации параметров комбинированного ротора-метателя на основе выявленных закономерностей можно использовать, в зависимости от целей, такие критерии, как равномерность разброса почвогрунта (θ) (11), доля выбрасываемого ротором почвогрунта Ω (12), величина полосы наибольшего выбрасывания почвогрунта S_f и дальность выбрасывания большей части почвогрунта L_f , а также величину слоя выбрасывания S_0 (9).

Реализовать многокритериальную оптимизацию с использованием численных методов можно, например, используя метод сравнения альтернатив Саати [16–20].

Заключение

Вблизи линии огня сопротивление воздушной среды начинает стремительно увеличиваться, кроме того, почвогрунт в реакции сгорания преобразуется в некую субстанцию, которая, перемешиваясь с налетающим почвогрунтом, с достаточной долей вероятности можно моделировать сплошной средой, в которой в направлении X действует сила сопротивления Стокса. 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 распределения массы почвогрунта, в слое выбрасывания можно сформировать следующие критерии для многокритериальной оптимизации параметров трехступенчатого ротора-метателя: величина слоев высыпания от каждой ступени, дальность выбрасывания большей части почвогрунта и общая величина слоя высыпания. Таким образом, можно определить

долю в процентах почвогрунта, распределенного 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 до 14 м). По этой же диаграмме можно определить дальность, на которую выбрасывается большая часть почвогрунта — 10,5 м.

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

Литература

1. Drapalyuk M.V., Druchinin D.Y., Pozdnyakov E.V. Theoretical research of the work of technological equipment for lifting large planting material with a soil clod // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2020. V. 595. № 1. P. 012017.
2. 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. V. 1515. № 5. P. 052066.
3. Бухтояров Л.Д. Оптимизация параметров комбинированной машины для тушения лесных пожаров на основе теоретических и экспериментальных исследований // Политематический сетевой электр. науч. журнал Кубанского гос. аграрного ун-та. 2012. № 84. С. 373-382.
4. Дидманидзе О.Н., Андреев О.П., Парлюк Е.П. Оптимизация параметров машинно-тракторных агрегатов: моногр. М.: ООО «УМЦ Триада», 2017. 77 с.
5. Аббасов А.Э. Оптимизация параметров моделируемых устройств // Инновационные аспекты социально-экономического развития региона: сб. тр. конф. (Королев, 18 дек. 2014 г.). М., 2014. С. 10-19.
6. Хажметова А.Л. Оптимизация параметров и режимов работы фрезерного рабочего органа агрегата для обработки междурядий и приствольных полос плодовых насаждений // Политематический сетевой электр. науч. журнал Кубанского гос. аграрного ун-та. 2019. № 153. С. 159-169.
7. Vrugt J.A. Application of stochastic parameter optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting model // Journal of Hydrology. 2006. V. 325. № 1-4. P. 288-307.
8. Sun Z. Technology of locating loose particles inside sealed electronic equipment based on Parameter-Optimized Random Forest // Measurement. 2021. V. 186. P. 110164.
9. Бартенев И.М., Петков А.Ф., Камалова Н.С. Математическая модель рабочего процесса ротора-метателя лесопожарной грунтометательной машины // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11. № 1 (41). С. 172-180.
10. Драпалюк М.В., Камалова Н.С., Гнусов М.А., Петков А.Ф. Программный комплекс для моделирования траектории движения частиц почвогрунта в процессе работы лесопожарной грунтометательной машины, снабженной многоступенчатым ротором-метателем // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021669645, 01.12.2021. Заявка № 2021669306 от 01.12.2021.
11. Бартенев И.М., Попиков П.И., Петков А.Ф., Поздняков А.К. Лесопожарная грунтометательная машина: пат. на изобретение 2762965 С1, 24.12.2021; заяв. 21.07.2021; опубл. 24.12.2021.
12. Лисицын В.И., Евсикова Н.Ю., Камалова Н.С. Термодинамический подход к моделированию динамики хода роста древостоев // Воронежский науч.-технический вестн. 2020. Т. 2. № 2 (32). С. 11-17.
13. Гиргидов А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика). 2-е изд., испр. и доп. М.: ИНФРА-М, 2018. 704 с. [Электронный ресурс]. URL:

- <https://znanium.com/catalog/document?id=117606&> (дата обращения: 29.04.2022).
14. Камалова Н.С., Камалова Н.С., Евсикова Н.Ю., Лисицын В.И., Саушкин В.В. Механика жидкости и газа. Воронеж, 2018. 67 с.
 15. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Логос, 2008. 392 с.
 16. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий; пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
 17. Денисова О.К. Применение метода анализа иерархий для ранжирования бизнес-процессов (на примере вуза) // Науч.-технические ведомости С.-Петерб. гос. политехнического ун-та. Экономические науки. 2013. № 1-1 (163). С. 166-173.
 18. Кузнецов Д.С., Поздняков Е.В., Евсикова Н.Ю. Применение метода анализа иерархий для обоснования выбора наиболее эффективного корчевателя // Воронежский науч.-технический вестн. 2020. Т. 1. № 1 (31). С. 133-139.
 19. Князев А.Г., Камалова Н.С., Юдин Р.В. Системный подход к сравнительному анализу плугов для обработки почв при лесовосстановлении // Воронежский науч.-технический вестн. 2020. Т. 4. № 4 (34). С. 23-29.

References

1. Drapalyuk M.V., Druchinin D.Y., Pozdnyakov E.V. Theoretical research of the work of technological equipment for lifting large planting material with a soil clod // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2020. V. 595. № 1. P. 012017.
2. 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. V. 1515. № 5. P. 052066.
3. Buhtoyarov L.D. Optimization of the parameters of a combined machine for extinguishing forest fires based on theoretical and experimental studies // Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. 2012. № 84. P. 373-382.
4. Didmanidze O.N., Andreev O.P., Parlyuk E.P. Optimization of parameters of machine-tractor units: monogr. M.: ООО «УМЦ Триада», 2017. 77 p.
5. Abbasov A.E. Optimization of the parameters of the simulated devices // Innovacionnye aspekty social'no-ekonomicheskogo razvitiya regiona: sb. tr. konf. (Korolev, 18 dek. 2014 g.). M., 2014. P. 10-19.
6. Hazhmetova A.L. Optimization of the parameters and modes of operation of the milling working body of the unit for processing row spacings and tree trunks of fruit plantations // Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. 2019. № 153. P. 159-169.
7. Vrugt J.A. Application of stochastic parameter optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting model // Journal of Hydrology. 2006. V. 325. № 1-4. P. 288-307.

8. Sun Z. Technology of locating loose particles inside sealed electronic equipment based on Parameter-Optimized Random Forest // *Measurement*. 2021. V. 186. P. 110164.
9. Bartenev I.M., Petkov A.F., Kamalova N.S. Mathematical model of the working process of the rotor-thrower of a forest fire soil throwing machine // *Forestry Engineering Journal*. 2021. V. 11. № 1 (41). P. 172-180.
10. Drapalyuk M.V., Kamalova N.S., Gnusov M.A., Petkov A.F. Software package for modeling the trajectory of movement of soil particles in the process of operation of a forest fire soil-throwing machine equipped with a multi-stage rotor-thrower // *Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM 2021669645*, 01.12.2021. Zayavka № 2021669306 ot 01.12.2021.
11. Bartenev I.M., Popikov P.I., Petkov A.F., Pozdnyakov A.K. Forest fire soil-throwing machine: pat. na izobrenie 2762965 C1, 24.12.2021; zayav. 21.07.2021; opubl. 24.12.2021.
12. Lisicyn V.I., Evsikova N.YU., Kamalova N.S. Thermodynamic approach to modeling the dynamics of the growth of forest stands // *Voronezh Scientific and Technical Journal*. 2020. V. 2. № 2 (32). P. 11-17.
13. Girgidov A.D. Fluid and gas mechanics (hydraulics). 2-e izd., ispr. i dop. M.: INFRA-M, 2018. 704 p. [Elektronnyj resurs]. URL: [https://znanium.com/catalog/document?id=117606&\(data obrashcheniya: 29.04.2022\)](https://znanium.com/catalog/document?id=117606&(data obrashcheniya: 29.04.2022)).
14. Kamalova N.S., Kamalova N.S., Evsikova N.YU., Lisicyn V.I., Saushkin V.V. Mechanics of liquid and gas. Voronezh, 2018. 67 p.
15. Larichev O.I. Theory and methods of decision-making, as well as the Chronicle of events in Magic countries. 3-e izd., pererab. i dop. M.: Logos, 2008. 392 p.
16. Saati T. Decision making. Hierarchy analysis method; per. s angl. R.G. Vachnadze. M.: Radio i svyaz', 1993. 278 p.
17. Denisova O.K. Application of the hierarchy analysis method for ranking business processes (on the example of a university) // *St. Petersburg state polytechnical university journal. Economics*. 2013. № 1-1 (163). P. 166-173.
18. Kuznecov 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 Journal*. 2020. V. 1. № 1 (31). P. 133-139.
19. 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 Journal*. 2020. V. 4. № 4 (34). P. 23-29.