

Математическая модель комбинированного грунтомета-полосопрокладывателя

М.В. Драпалюк^a, И.М. Бартенев^b, М.А. Гнусов^c, Д.Ю. Дручинин^d, А.В. Князев^e

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

^a md@vglta.vrn.ru, ^b kafedramehaniza@mail.ru, ^c mgnusov@yandex.ru,

^d druchinin.denis@rambler.ru, ^e mashina.76@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-7335-2862>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>,

^d <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-3305-7850>

Статья поступила 05.10.2020, принята 26.10.2020

Подавление лесного пожара грунтометанием имеет высокую эффективность за счет наличия неограниченного количества грунта для перемещения в зону горения и возможности его оперативного использования с одновременным созданием минерализованной противопожарной полосы. В данной статье описаны возможности использования компьютерных технологий для изучения процесса ликвидации лесных низовых пожаров с помощью направленно-регулируемого потока почвогрунта путем применения современных математических методов. Разработана высокодетализированная имитационная модель процесса, ориентированная на использование высокопроизводительной вычислительной техники с возможностью изучения физико-механического взаимодействия почвогрунта с рабочими органами лесопожарной техники. Подъем грунта и придание его частицам механического импульса — важная задача, стоящая при создании грунтометов. Стоит отметить, что большую ценность представляет исследование одновременного влияния нескольких параметров на показатели эффективности работы лесопожарного агрегата. Это позволяет выполнить многофакторную оптимизацию конструкции грунтомета, а также его эксплуатационных характеристик. Во время воспроизведения процесса подачи почвогрунта в модели необходимо корректно описывать взаимодействие рабочей среды с направляющим кожухом. Для изучения формирования потока почвогрунта с помощью направляющего кожуха предлагается использовать высокоадекватную имитационную модель на основе современных высокопроизводительных математических методов, использующих дискретные частицы с взаимосвязями каждого отдельного элемента, движущиеся по законам классической механики и аэродинамики. Разработана имитационная модель, позволяющая изучить процесс ликвидации лесных пожаров направленно-регулируемым потоком почвогрунта с полноценно описанным движением потока внутри направляющего кожуха. Для изучения процесса создания направляющего кожуха необходимо рассматривать направляющий кожух в модели как две составные части: защитный кожух и почвопровод. Направляющий кожух имеет большое количество показателей, влияющих на эффективность подачи почвогрунта в зону кромки лесного низового пожара, поэтому многофакторная оптимизация конструкции в условиях единой модели грунтомета позволяет определить рациональные параметры. Обсуждаемая модель выполнена в визуальной среде объектно-ориентированного моделирования. Рассмотрен процесс описания направляющего кожуха для этапов моделирования и проведена оптимизация основных параметров, влияющих на эффективность.

Ключевые слова: фрезерный лесопожарный грунтомет; движение почвогрунта в воздушной среде; низовые лесные пожары; почвопровод; направляющих кожух.

Mathematical model of a combined soil launcher-strip paver

M.V. Drapalyuk^a, I.M. Bartenev^b, M.A. Gнусov^c, D.Yu. Druchinin^d, A.V. Knyazev^e

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

^a md@vglta.vrn.ru, ^b kafedramehaniza@mail.ru, ^c mgnusov@yandex.ru,

^d druchinin.denis@rambler.ru, ^e mashina.76@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-7335-2862>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>,

^d <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-3305-7850>

Received 05.10.2020, accepted 26.10.2020

Suppression of a forest fire by ground-throwing is highly effective due to the presence of an unlimited amount of soil to move to the combustion zone and the possibility of its operational use with the simultaneous creation of a mineralized fire strip. This article describes the possibilities of using computer technologies to study the process of liquidation of forest ground fires using a directionally-regulated flow of soil by applying modern mathematical methods. A highly detailed simulation model of the process has been developed, focused on the use of high-performance computer technology with the ability to study the physical and mechanical interaction of the soil with the working bodies of forest fire equipment. Raising the soil and imparting a mechanical impulse to its particles is an important task facing the creation of ground guns. It should be noted that the study of the simultaneous influence of several parameters on the performance indicators of the forest fire unit is of great value. This allows fulfilling multifactorial optimization of the design of the soil gun, as well as its performance. During the reproduction of the process of feeding the soil in the model, it is necessary to correctly de-

scribe the interaction of the working environment with the guide casing. To study the formation of soil flow using a guiding casing, it is proposed to use a highly adequate simulation model based on modern high-performance mathematical methods using discrete particles with the interconnections of each individual element and moving according to the laws of classical mechanics and aerodynamics. A simulation model has been developed that makes it possible to study the process of eliminating forest fires by a directionally-controlled flow of soil with a fully described flow movement inside the guide casing. To study the process of creating a guiding casing, it is necessary to consider the guiding casing in the model as two components: a protective casing and a soil conduit. The guide casing has a large number of indicators that affect the efficiency of soil supply to the zone of the edge of a forest ground fire, therefore, multifactorial optimization of the design under the conditions of a single model of a soil gun allows determining rational parameters. The discussed model is made in a visual environment of object-oriented modeling. The process of describing the guide casing for the modeling stages is considered and the optimization of the main parameters affecting the efficiency is carried out.

Keywords: milling forest fire dredger; ground movement in the air; ground forest fires; soil pipe; guiding casing.

Введение. Сохранение лесного фонда Российской Федерации на фоне масштабных природных возгораний — одна из наиболее острых проблем [1; 2]. Серьезную опасность для лесных насаждений несут лесные низовые пожары. На сегодняшний день использование почвогрунта, а именно минерального слоя для прямого тушения и предотвращения лесных пожаров имеет большую перспективу по сравнению с другими методами [3; 4].

В мировой практике для профилактики и предупреждения распространения очагов пожара создаются новые и обновляются уже существующие минерализованные полосы в массивах леса с помощью пассивных и активных рабочих органов фрезерных орудий [5; 6]. Эти же орудия используются и для локализации лесных низовых пожаров направленно-регулируемым потоком почвогрунта. Для разработки и создания эффективных лесопожарных грунтометательных машин требуются более глубокие теоретические и экспериментальные исследования процесса формирования направленного потока почвогрунта, метаемого в зону пожара [7; 8].

Следует отметить, что на сегодняшний день остается множество нерешенных вопросов, связанных с движением лесного минерализованного почвогрунта как в воздушной среде, так и в замкнутом пространстве направляющего кожуха [9]. Перспективным направлением исследований в данной области является разработка детализированных имитационных моделей процесса на основе современных математических методов, ориентированных на использование высокопроизводительной вычислительной техники [10]. Однако следует отметить, что для успешной разработки имитационных моделей необходимо учитывать большое количество факторов процесса взаимодействия почвогрунта с рабочими органами машины, а также его движение в воздушной среде.

Целью исследования является создание имитационной среды для моделирования процесса формирования эффективного потока почвогрунта для борьбы с лесными пожарами, которая будет учитывать основные конструктивные и структурные параметры формирования направленного потока почвогрунта, к которым относятся форма, ширина, длина направляющего кожуха грунтометательной машины и т. д.

Объекты и методы исследования. Математическая модель должна всесторонне описывать происходящие физико-механические процессы при метании почвогрунта: взаимодействие поверхностей машины при поступательном и вращательном движении с рабочей средой моделирования (почвогрунтом), движение

почвогрунта в воздушном пространстве и его взаимодействие с внутренними стенками направляющего кожуха [11]. Модель должна обладать высоким пространственным разрешением, чтобы корректно воспроизвести движение почвогрунта, а также высокими временными интервалами, чтобы с большей адекватностью воспроизвести контакт при взаимодействии рабочих поверхностей машины с почвогрунтом в процессе его метания [12].

Современные возможности компьютерных средств позволяют воспроизводить имитационные модели с большим числом учетных условий и взаимодействий [13]. В пределах конечно-элементного приближения почвогрунт показан как комплекс большого порядка от 10^3 до 10^5 отдельных шарообразных элементов.

Метод динамики частиц лежит в основе поведения частиц почвогрунта при моделировании физико-механического взаимодействия [14; 15]. Различные модификации этого метода используются при имитации большого спектра физических исследований, от молекул и атомов до Вселенной и галактик [16–18]. Активное использование метода наблюдается при создании и описании различных изучаемых состояний газообразных, жидких, фрагментируемых, сыпучих компонентов в компьютерной графике [19; 20].

В модели рассматривается однорядный грунтомет (либо половина двухрядного грунтомета). Защитный кожух представляет собой часть поверхности цилиндра вокруг ротора. Нижняя половина поверхности цилиндра отсутствует, верхняя часть переходит в эллиптическую цилиндрическую поверхность почвопровода. Базовые точки защитного кожуха нумеруются, начиная с 301, а почвопровода — начиная с 501 (см. рис. 1).

При разработке модели намеренно принята такая нумерация для удобства работы с индексами: для каждой части грунтомета нумерация начинается с $100 \cdot n + 1$. Координаты базовых точек защитного кожуха задавались следующими выражениями:

$$x_{301} = x_{\Gamma} + x_P;$$

$$y_1 = y_{\Gamma} + y_P + d_K;$$

$$z_1 = z_{\Gamma} + z_P;$$

$$x_{302} = x_{\Gamma} + x_P;$$

$$y_2 = y_{\Gamma} + y_P - B_{\Gamma} - d_K;$$

$$z_2 = z_{\Gamma} + z_P;$$

$$x_{301+2i} = x_{\Gamma} + x_P + R_K \cos\left(\pi - (i-1) \frac{\pi}{4}\right); (1)$$

$$\begin{aligned}
 y_{301+2i} &= y_{\Gamma} + y_P + d_K; \\
 z_{301+2i} &= z_{\Gamma} + z_P + R_K \sin\left(\pi - (i-1)\frac{\pi}{4}\right); \\
 x_{302+2i} &= x_{\Gamma} + x_P + R_K \cos\left(\pi - (i-1)\frac{\pi}{4}\right); \\
 y_{302+2i} &= y_{\Gamma} + y_P - B_{Л} - d_K; \\
 z_{302+2i} &= z_{\Gamma} + z_P + R_K \sin\left(\pi - (i-1)\frac{\pi}{4}\right),
 \end{aligned}$$

где $i = 1...4$; d_K — боковой просвет между ротором и поверхностью оснований цилиндра; R_K — радиус цилиндра защитного кожуха.

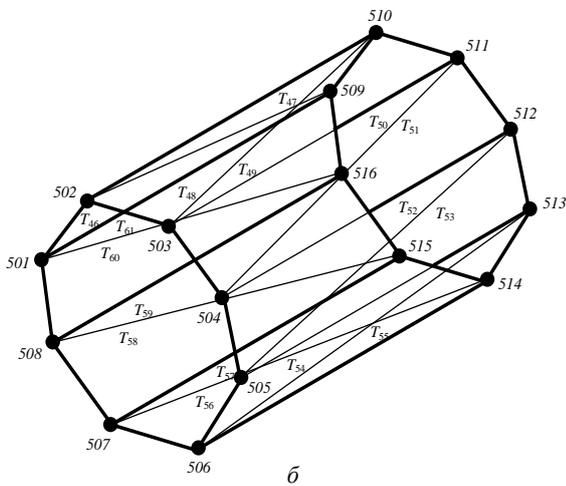
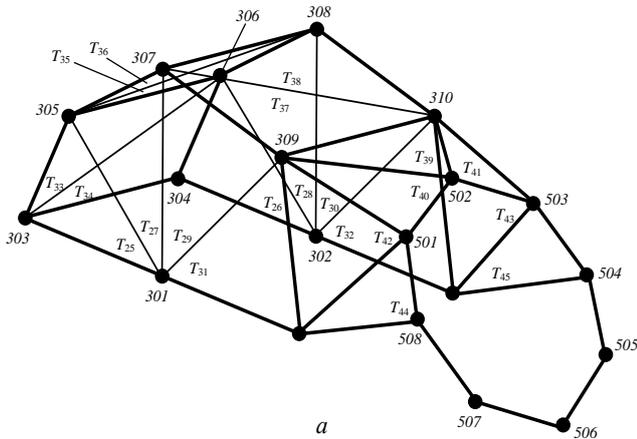


Рис. 1. Схема индексации базовых точек и элементарных треугольников защитного кожуха (а) и почвопровода (б)

Координаты базовых точек почвопровода предварительно задавались для горизонтального расположения:

$$\begin{aligned}
 x_{500+i} &= x_{\Gamma} + x_{\Pi}; \\
 y_{500+i} &= y_{\Gamma} + y_{\Pi} + R_{\Pi} \cos\left(2\pi\frac{i}{8}\right); \\
 z_{500+i} &= z_{\Gamma} + z_{\Pi} + R_{\Pi} \sin\left(2\pi\frac{i}{8}\right); \\
 x_{508+i} &= x_{\Gamma} + x_{\Pi} + L_{\Pi};
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 y_{508+i} &= y_{\Gamma} + y_{\Pi} + R_{\Pi} \cos\left(2\pi\frac{i}{8}\right); \\
 z_{508+i} &= z_{\Gamma} + z_{\Pi} + R_{\Pi} \sin\left(2\pi\frac{i}{8}\right),
 \end{aligned}$$

где $i = 1...8$ — номер грани почвопровода (цилиндрическая поверхность упрощается до призмы с правильным восьмиугольником в основании); $x_{\Pi}, y_{\Pi}, z_{\Pi}$ — смещение почвопровода относительно центра грунтомета; R_{Π} и L_{Π} — радиус и длина почвопровода. В части компьютерных экспериментов проверялся почвопровод не круглого, а эллиптического сечения. В этом случае форма почвопровода задается не радиусом R_{Π} , а двумя параметрами — полуосями эллипса a_{Π} и b_{Π} , которые в последних формулах используются как коэффициенты соответственно перед косинусами и синусами.

После этого почвопровод поворачивали на заданный угол ϕ_{Π} в плоскости XZ :

$$\begin{cases}
 r = \sqrt{(x_i - (x_{\Gamma} + x_{\Pi}))^2 + (z_i - (z_{\Gamma} + z_{\Pi}))^2}; \\
 \phi = \begin{cases} \arctan \frac{z_i - (z_{\Gamma} + z_{\Pi})}{x_i - (x_{\Gamma} + x_{\Pi})}, & x_i - (x_{\Gamma} + x_{\Pi}) \geq 0; \\ \arctan \frac{z_i - (z_{\Gamma} + z_{\Pi})}{x_i - (x_{\Gamma} + x_{\Pi})} + 180^{\circ}, & x_i - (x_{\Gamma} + x_{\Pi}) < 0 \end{cases} \quad (3) \\
 x_{i\Pi} = x_{\Gamma} + x_{\Pi} + r \cos(\phi + \phi_{\Pi}); \\
 y_{i\Pi} = y_i; \\
 z_{i\Pi} = z_{\Gamma} + z_{\Pi} + r \sin(\phi + \phi_{\Pi}),
 \end{cases}$$

где r и ϕ — полярные координаты базовых точек в системе координат, связанной с точкой размещения почвопровода; (x_i, y_i, z_i) и $(x_{\Pi}, y_{\Pi}, z_{\Pi})$ — координаты базовой точки i до и после преобразования вращения относительно оси OY .

Защитный кожух и переход в почвопровод состояли из следующих элементарных треугольных поверхностей:

- $T_{25}(P_{301}, P_{303}, P_{305}), T_{26}(P_{302}, P_{304}, P_{306}), T_{27}(P_{301}, P_{305}, P_{307}), T_{28}(P_{302}, P_{306}, P_{308}), T_{29}(P_{301}, P_{307}, P_{309}), T_{30}(P_{302}, P_{308}, P_{310}), T_{31}(P_{301}, P_{309}, P_{311}), T_{32}(P_{302}, P_{310}, P_{312}), T_{33}(P_{303}, P_{305}, P_{306}), T_{34}(P_{303}, P_{304}, P_{306}), T_{35}(P_{305}, P_{307}, P_{308}), T_{36}(P_{305}, P_{306}, P_{308}), T_{37}(P_{307}, P_{309}, P_{310}), T_{38}(P_{307}, P_{308}, P_{310}), T_{39}(P_{309}, P_{310}, P_{502}), T_{40}(P_{309}, P_{501}, P_{502}), T_{41}(P_{310}, P_{502}, P_{503}), T_{42}(P_{309}, P_{311}, P_{501}), T_{43}(P_{310}, P_{312}, P_{503}), T_{44}(P_{311}, P_{501}, P_{508}), T_{45}(P_{312}, P_{503}, P_{504}).$

Почвопровод в модели состоял из следующих восьми треугольников:

- $T_{45+2i-1}(P_{500+i}, P_{500+i+1}, P_{500+i+8}), T_{45+2i}(P_{500+i+1}, P_{500+i+8}, P_{500+i+8+1}), T_{60}(P_{508}, P_{501}, P_{516}), T_{61}(P_{501}, P_{509}, P_{516}),$
- где $i = 1...7$.

Таким образом, в имитационной модели защитный кожух и почвопровод состоят из 37 треугольников.

Исследуемая имитационная модель агрегата для борьбы с лесными пожарами, содержащая направляющий кожух и почвопровод, позволяет провести научную работу с учетом влияния более 30 конструктивных и технологических параметров машины и условий ее эксплуатации на показатели ее эффективности.

Расчет выходных показателей производится по следующим формулам. Средняя дальность метания почвогрунта рассчитывается по формуле:

$$L_{cp} = x_{cp} - \frac{L_X}{2} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{Э}}} \begin{cases} x_i, & x_i > L_X; \\ 0, & x_i \leq L_X. \end{cases} - \frac{L_X}{2}}{\sum_{i=1}^{N_{\text{Э}}} \begin{cases} 1, & x_i > L_X; \\ 0, & x_i \leq L_X. \end{cases}}, \quad (4)$$

где x_{cp} — средняя координата x выброшенных грунтометом элементов почвогрунта; $N_{\text{Э}}$ — общее количество элементов почвогрунта.

Доля почвогрунта, оседающего в целевой полосе шириной 0,6 м, рассчитывается по формуле:

$$p_{60} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{Э}}} \begin{cases} 1, & |x_i - L_{cp}| \leq 0,6/2; \\ 0, & |x_i - L_{cp}| > 0,6/2; \end{cases}}{\sum_{i=1}^{N_{\text{Э}}} \begin{cases} 1, & x_i > L_X; \\ 0, & x_i \leq L_X. \end{cases}}. \quad (5)$$

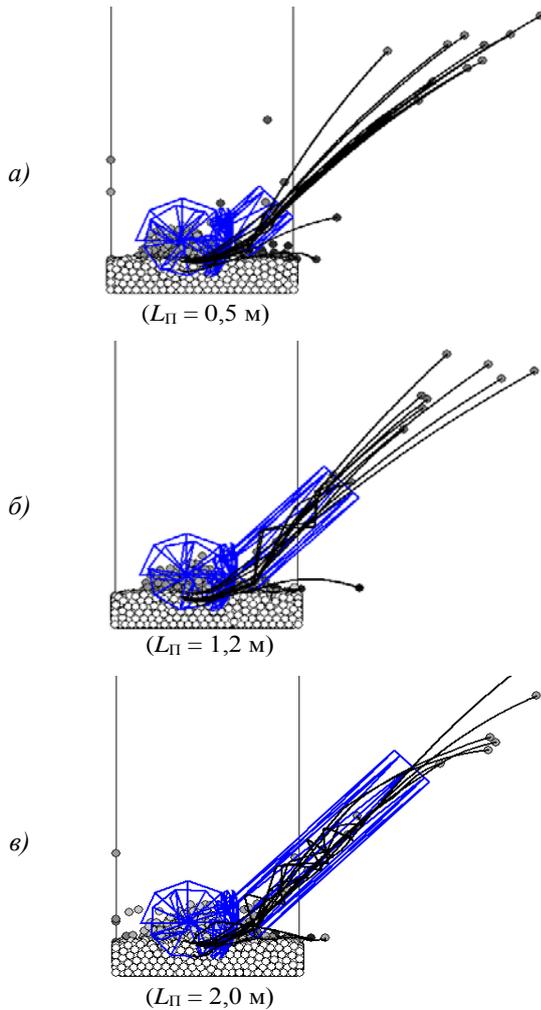


Рис. 2. Характер выброса почвогрунта при различной длине почвопровода

Производительность грунтомета рассчитывается по формуле:

$$P = \frac{m_{\Gamma}}{t_{KЭ}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{Э}}} \begin{cases} m_{\text{Э}}, & x_i > L_X; \\ 0, & x_i \leq L_X. \end{cases}}{t_{KЭ}}, \quad (6)$$

где m_{Γ} — масса почвогрунта, выброшенного в течение компьютерного эксперимента; $t_{KЭ}$ — длительность компьютерного эксперимента.

Средняя потребляемая мощность рассчитывается по формуле:

$$N = \frac{A}{t_{KЭ}} = \frac{\omega}{t_{KЭ}} \int_0^{t_{KЭ}} M_{\text{сум}}(t) dt, \quad (7)$$

где A — работа сил сопротивления вращению ротора в течение компьютерного эксперимента; $M_{\text{сум}}(t)$ — суммарный момент сил взаимодействия между элементами почвогрунта и элементарными поверхностями ротора в данный момент времени t .

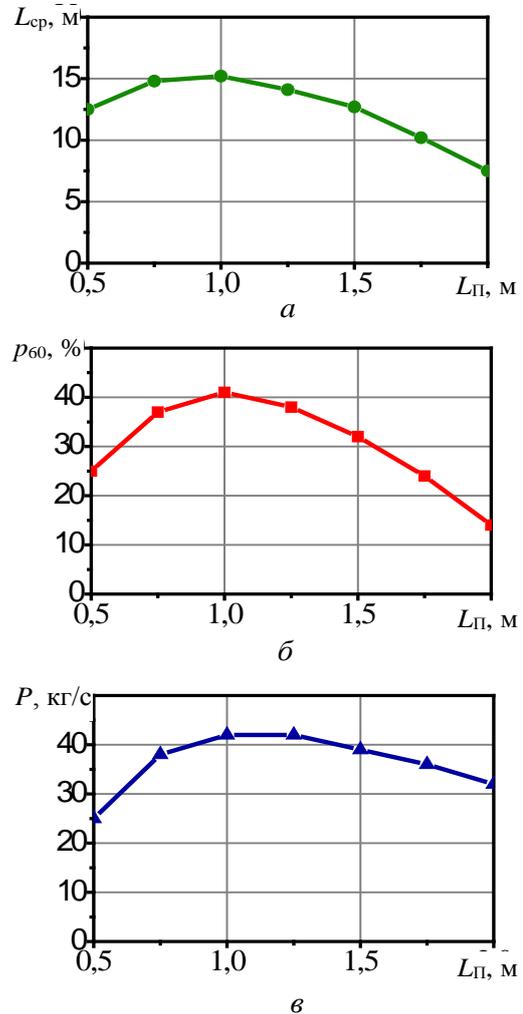


Рис. 3. Влияние длины почвопровода $L_{\text{П}}$ на среднюю дальность метания почвогрунта L_{cp} , долю почвогрунта в полосе шириной 60 см p_{60} и производительность грунтомета P

В рамках дальнейшего теоретического исследования необходимо определить диапазоны параметров машины, в которых показатели эффективности будут наилучшими, т. е. L_{cp} , p_{60} и P как можно выше, а N — как можно ниже:

$$\begin{cases} L_{cp} \rightarrow \max \\ p_{60} \rightarrow \max \\ P \rightarrow \max \\ N \rightarrow \min \end{cases} \quad (8)$$

Кроме того, необходимо добиться, чтобы эффективность машины как можно меньше зависела от условий эксплуатации.

Первые компьютерные эксперименты с разработанной моделью машины для тушения лесных пожаров показали, что характер движения почвогрунта оказался в высокой степени реалистичным и правдоподобным (см. рис. 2). Почвогрунт выбрасывается на среднее расстояние около 15 м. Основная доля летящего почвогрунта (около 40 %) оседает в полосе шириной 0,6 м от границы машины. Производительность машины при этом составляет около 45 кг/с, потребляемая мощность — порядка 9 кВт. Таким образом, машина является работоспособной и надежно выполняет функцию тушения лесного пожара.

От длины почвопровода зависят его фокусирующая способность и сопротивление движению потока почвогрунта. С целью изучения влияния длины почвопровода $L_{П}$ на эффективность грунтомета проведена серия компьютерных экспериментов, в которых изменяли $L_{П}$ от 0,50 до 2,00 м с шагом 0,25 м. При этом угол установки почвопровода был фиксирован и составлял 45°. Диаметр почвопровода был также постоянным и составлял 0,4 м.

При слишком малой длине почвопровода (около 0,5 м) он практически не оказывает фокусирующего действия (см. рис. 2, а). Вследствие этого оказываются малыми средняя дальность выброса почвогрунта (около 12 м, см. рис. 3, а) и кучность осадения почвогрунта в целевой полосе шириной 0,6 м, где оседает около 25 % почвогрунта (см. рис. 3, б). Полезная производительность грунтомета при этом также мала и составляет около 25 кг/с.

При слишком большой длине почвопровода (около 2,0 м) можно было бы ожидать высоких фокусирующих свойств, однако из-за хаотического процесса перемешивания почвогрунта на большой длине частицы почвогрунта вылетают с широким разбросом углов (см. рис. 2, в). Из-за этого низкой оказывается кучность покрытия (около 15 %, см. рис. 3, б). Кроме того, трение о стенки почвопровода существенно снижает скорость частиц, поэтому средняя дальность выброса оказывается малой — около 8 м (см. рис. 3, а).

Оптимальной является длина почвопровода 0,9...1,2 м, при которой частицы почвогрунта вылетают с малым разбросом углов вылета и большой начальной скоростью (см. рис. 3, б). При этом средняя дальность выброса достигает 14...15 м, доля почвогрунта, осаждаемого в целевой полосе шириной 0,6 м, достигает 38...40 %, производительность грунтомета достигает 38...42 кг/с.

От диаметра почвопровода $D_{П}$ зависят фокусирующие свойства грунтомета, сопротивление движению потока почвогрунта и полнота захвата вылетающего почвогрунта от ротора. С целью исследования влия-

ния диаметра $D_{П}$ на показатели эффективности грунтомета проведена серия из пяти компьютерных экспериментов, в которых изменяли $D_{П}$ от 0,2 до 0,6 м с шагом 0,1 м.

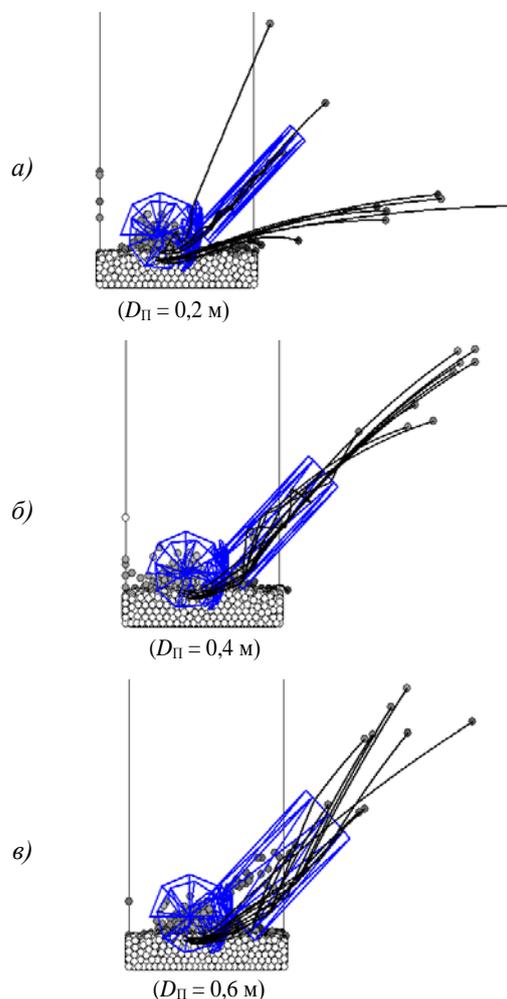


Рис. 4. Характер выброса почвогрунта при различном диаметре почвопровода

Обнаружено, что при слишком малом диаметре почвопровода (около 0,2 м) большая часть потока почвогрунта не попадает в почвопровод, а рассеивается защитным кожухом или вылетает в целевом направлении под слишком малыми углами к горизонту. Из-за этого среднее расстояние метания почвогрунта не превышает 6 м, доля почвогрунта в целевой полосе не превышает 13 % от общего объема почвогрунта, поэтому, несмотря на формально высокую производительность (около 43 кг/с), поток почвогрунта не обеспечивает эффективное покрытие целевой полосы (см. рис. 5).

При слишком большом диаметре почвопровода (около 0,6 м) практически весь поток почвогрунта от ротора попадает в почвопровод, включая и низкоэнергетические составляющие потока, которые хаотизируют в почвопроводе высокоэнергетические составляющие потока, тем самым снижая скорость и кучность выброса почвогрунта. Кроме того, из-за большого диаметра почвопровода оказываются малыми его геометрическая и реологическая фокусирующие способности. Вследствие этого показатели эффективности грунтомета ока-

зались низкими: среднее расстояние метания — около 9 м, доля почвогрунта в целевой полосе — около 37 %, производительность грунтмета — около 37 кг/с.

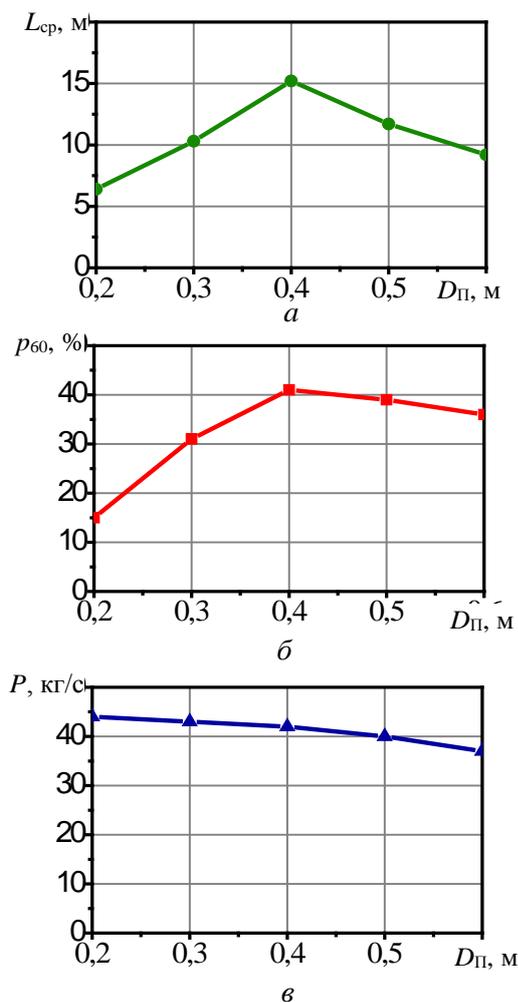


Рис. 5. Влияние диаметра почвопровода $D_{\text{П}}$ на среднюю дальность метания грунта $L_{\text{ср}}$, долю грунта в полосе шириной 60 см p_{60} и производительность грунтмета P

Компьютерные эксперименты позволили установить, что оптимальным является диаметр почвопровода около 0,4 м. При этом обеспечивается наибольшее среднее расстояние метания почвогрунта — 15 м, наибольшая доля почвогрунта в целевой полосе шириной 0,6 м — около 41 % и достаточно высокая производительность грунтмета — около 42 кг/с.

От угла наклона почвопровода зависят начальный угол вылета частиц почвогрунта и дальнейший характер движения по траекториям, близким к параболическим. Чем тяжелее и компактнее частицы почвогрунта, покидающие почвопровод, тем меньше сопротивление воздуха и тем больше их траектории приближаются к параболическим. В условиях вакуума оптимальным углом метания частиц, обеспечивающим наибольшую дальность, был бы угол 45° к горизонту. Однако из-за сопротивления воздуха и стремления обеспечить не только наибольшую дальность, но и высокие кучность и полезную производительность грунтмета, оптимальный угол установки почвопровода может быть отличным от 45° . С целью исследования влияния угла

наклона почвопровода $\varphi_{\text{П}}$ на показатели эффективности грунтмета проведена серия компьютерных экспериментов, в которой изменяли $\varphi_{\text{П}}$ на уровнях 30° , 45° , 60° . Другим изменяемым параметром в данной серии компьютерных экспериментов была высота установки почвопровода, что позволило решить двухфакторную оптимизационную задачу.

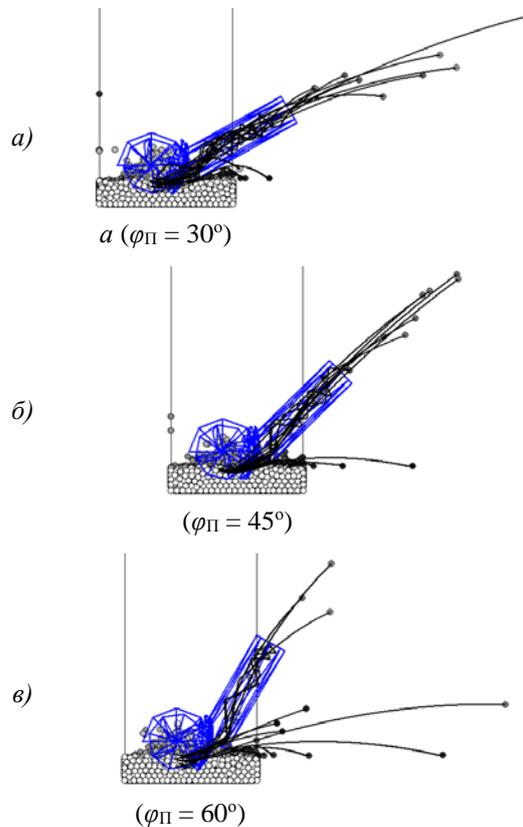


Рис. 6. Характер выброса почвогрунта при различном угле наклона почвопровода

При слишком низком угле наклона почвопровода (30°) к горизонту частицы почвогрунта посылаются с малым начальным углом вылета, что не обеспечивает необходимую дальность выброса почвогрунта (рис. 6, а). Кроме того, в почвопровод попадает практически весь поток почвогрунта от ротора, содержащий как высокоскоростную составляющую с малым угловым разбросом, так и низкоскоростную составляющую с большим угловым разбросом. Перемешивание этих составляющих потока почвогрунта в почвопроводе приводит к высокой хаотизации потока почвогрунта, вследствие чего существенно снижается кучность потока.

При слишком большом угле наклона почвопровода (60°) входное отверстие почвопровода оказывается слишком узким и захватывает только часть (около 40 %) потока почвогрунта от ротора (рис. 6, в). Большая часть потока движется под почвопроводом и оседает недалеко от грунтмета. Кроме того, большой начальный угол вылета частиц почвогрунта не обеспечивает высокую дальность метания и приводит к высокому разбросу точек оседания частиц.

Оптимальным является угол наклона почвопровода около 45° (рис. 6, б). Это обеспечивает и наилучшие с точки зрения баллистики начальные условия полета

частиц почвогрунта, и захват большей части потока почвогрунта от ротора, причем включающей высоко-скоростную часть с малым угловым разбросом.

Влияние высоты расположения z_{Π} почвопровода исследовали в той же двухфакторной оптимизационной серии компьютерных экспериментов, что и угла наклона почвопровода. При этом z_{Π} изменяли на уровнях 0,2; 0,4; 0,6 м.

При изменении высоты размещения почвопровода он захватывает разные составляющие потока почвогрунта, движущегося от ротора. Также изменяется положение места отражения потока почвогрунта от почвопровода и характер его дальнейшего движения в почвопроводе.

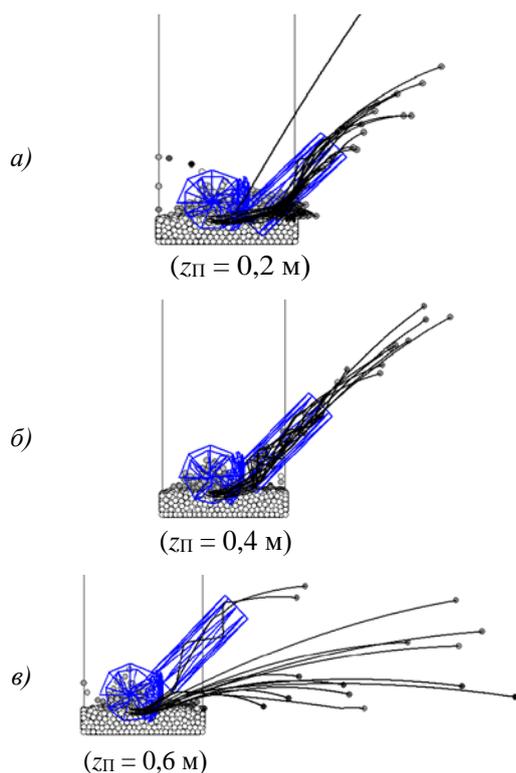


Рис. 7. Характер выброса почвогрунта при различной высоте размещения почвопровода

При низкой высоте установки почвопровода он захватывает часть потока почвогрунта, движущуюся от ротора под низкими углами к горизонту (рис. 7, а). Другая часть потока рассеивается кромкой и верхней частью почвопровода. Направленный низко поток почвогрунта отражается от внутренней поверхности почвопровода под неблагоприятным углом и пытается сформировать второе отражение в верхней части почвопровода. Из-за процессов отражения под слишком большими касательными углами оказывается высоким трение, и поток почвогрунта существенно теряет скорость. Кроме того, из-за двукратного отражения и перемещения почвогрунта существенно увеличивается угловой разброс частиц, что снижает кучность грунтомета.

При слишком высоком расположении почвопровода большая часть почвогрунта не попадает в почвопровод (рис. 7, в) и, как и для грунтомета без почвопровода, оседает недалеко от грунтомета, создавая минерализованную полосу, однако практически не обеспечивая

функцию тушения пожара: покрытия целевой полосы шириной 0,6 м на расстоянии 15 м.

Оптимальной является высота установки почвопровода около 0,4 м (рис. 7, б). При этом в почвопровод попадает основная часть потока почвогрунта, движущегося от ротора, имеющая высокие скорость и кучность. Благодаря отражению потока под малыми углами к внутренней поверхности почвопровода энергия частиц практически не теряется и не происходит существенного перемешивания, снижающего кучность выброса. При такой высоте установки почвопровода грунтомет обеспечивает функцию тушения пожара: существенная часть почвогрунта (около 40 %) осаждается в узкой целевой полосе шириной 0,6 м на значительном расстоянии (15 м).

Из большого количества конструктивных параметров грунтомета выбраны два параметра, влияние которых на показатели эффективности наиболее непредсказуемо, — угол ϕ_{Π} и высота z_{Π} установки направляющего кожуха. Аналитически задачу оптимизации параметров установки направляющего кожуха можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} L_{cp}(\phi_{\Pi}, z_{\Pi}) \rightarrow \max \\ p_{60}(\phi_{\Pi}, z_{\Pi}) \rightarrow \max \Rightarrow \phi_{\Pi}^{opt}, z_{\Pi}^{opt} \\ P(\phi_{\Pi}, z_{\Pi}) \rightarrow \max \end{cases} \quad (9)$$

Решение задачи оптимизации заключается в поиске такой области изменения факторов ϕ_{Π} и z_{Π} , в которой одновременно максимальными будут средняя дальность L_{cp} метания почвогрунта, доля p_{60} почвогрунта в целевой полосе шириной 60 см и производительность P .

Для решения двухфакторной задачи оптимизации провели девять компьютерных экспериментов, в которых изменяли ϕ_{Π} на уровнях 35°, 45°, 50° при одновременном изменении z_{Π} на уровнях 0,3; 0,4; 0,5 м.

На основе набора данных, полученного в результате проведения девяти оптимизационных компьютерных экспериментов, получены аналитические формулы для функций $L_{cp}(\phi_{\Pi}, z_{\Pi})$, $p_{60}(\phi_{\Pi}, z_{\Pi})$ и $P(\phi_{\Pi}, z_{\Pi})$. Функции аппроксимировали полиномами второго порядка в виде:

$$K(\phi_{\Pi}, z_{\Pi}) = k_1\phi_{\Pi}^2 + k_2z_{\Pi}^2 + k_3\phi_{\Pi}z_{\Pi} + k_4\phi_{\Pi} + k_5z_{\Pi} + k_6, \quad (10)$$

где K — критерий оптимизации (L_{cp} , p_{60} или P); $k_1 \dots k_6$ — параметры полинома. Параметры полиномов определены методом наименьших квадратов (МНК), в рамках которого минимизировалась сумма квадратов отклонений аналитической зависимости от результатов компьютерного эксперимента:

$$\sum_{i=1}^{N_{KЭ}} \left(K_{аналит.}(\phi_{\Pi}^i, z_{\Pi}^i) - K_{KЭ}^i(\phi_{\Pi}^i, z_{\Pi}^i) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (11)$$

где i и $N_{KЭ}$ — порядковый номер и общее количество компьютерных экспериментов; $K_{аналит.}$ — искомая аналитическая (полиномиальная) зависимость критерия K от факторов ϕ_{Π} и z_{Π} ; $K_{KЭ}^i$ — значения критерия K , определенные в i -м компьютерном эксперименте с параметрами ϕ_{Π}^i и z_{Π}^i .

Для аппроксимации методом МНК с использовани-

ем специального математического пакета получены следующие аналитические зависимости для показателей эффективности грунтомета:

$$u(D_{BЭ}, \alpha_{BХ}) = -3,833 \cdot 10^{-4} D_{BЭ}^2 - 1,422 \cdot 10^{-3} \alpha_{BХ}^2 + 1,00 \cdot 10^{-4} D_{BЭ} \cdot \alpha_{BХ} + 0,034 D_{BТ} + 0,032 \alpha_{BХ} - 0,192; \quad (12)$$

$$\Delta P_0(D_{BЭ}, \alpha_{BХ}) = 1,667 \cdot 10^{-5} D_{BЭ}^2 + 1,274 \cdot 10^{-4} \alpha_{BХ}^2 + 1,133 \cdot 10^{-4} D_{BЭ} \cdot \alpha_{BХ} - 5,483 \cdot 10^{-3} D_{BТ} - 0,011 \alpha_{BХ} + 0,401, \quad (13)$$

где $\varphi_{П}$ измеряется в градусах, $z_{П}$ — в метрах, $L_{ср}$ — в метрах, p_{60} — в процентах, P — в килограммах в секунду.

Полученные формулы могут использоваться для быстрой оценки (без выполнения реальных или компьютерных экспериментов) показателей эффективности грунтомета в зависимости от параметров установки направляющего кожуха.

Для дальнейшего анализа функции $L_{ср}(\varphi_{П}, z_{П})$, $p_{60}(\varphi_{П}, z_{П})$ и $P(\varphi_{П}, z_{П})$ представлены в виде графиков (рис. 7) и картограмм (рис. 8).

Графики позволяют визуально понять характер влияния параметров установки направляющего кожуха на показатели эффективности грунтомета.

Графики (рис. 8) позволяют понять закономерности на качественном уровне. Для количественного же анализа графики перестраиваются в картограммы: виды на графики сверху, где поверхность отклика изображена линиями уровня (рис. 9).

Пример использования картограмм показан на рис. 9, а. Если угол установки направляющего кожуха составляет 40 градусов (точка А), а высота расположения направляющего кожуха составляет 0,4 м (точка В), то соответствующая точка факторного пространства С попадает в область значений выше 14 м, т. е. средняя дальность метания почвогрунта составит более 14 м, примерно 14,3 м.

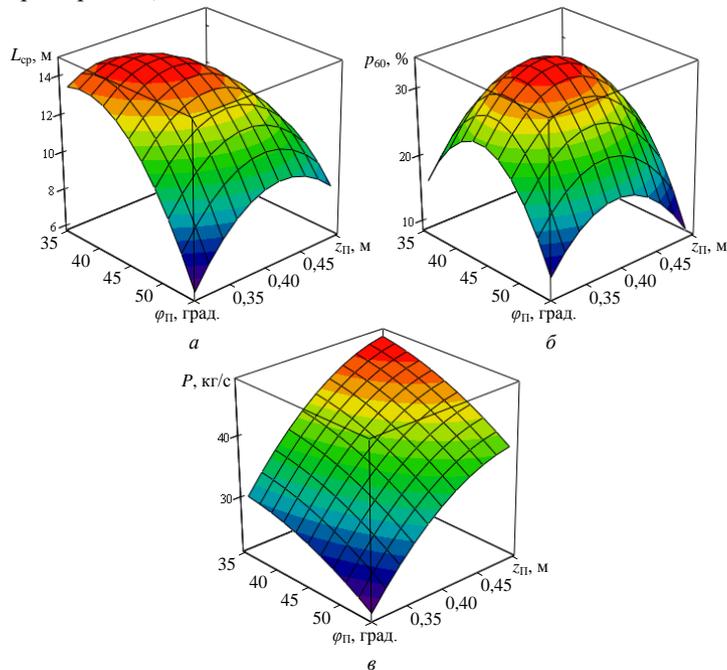


Рис. 8. Графики влияния угла $\varphi_{П}$ и высоты $z_{П}$ установки направляющего кожуха на среднюю дальность метания почвогрунта $L_{ср}$, долю почвогрунта в полосе шириной 60 см p_{60} и производительность грунтомета P

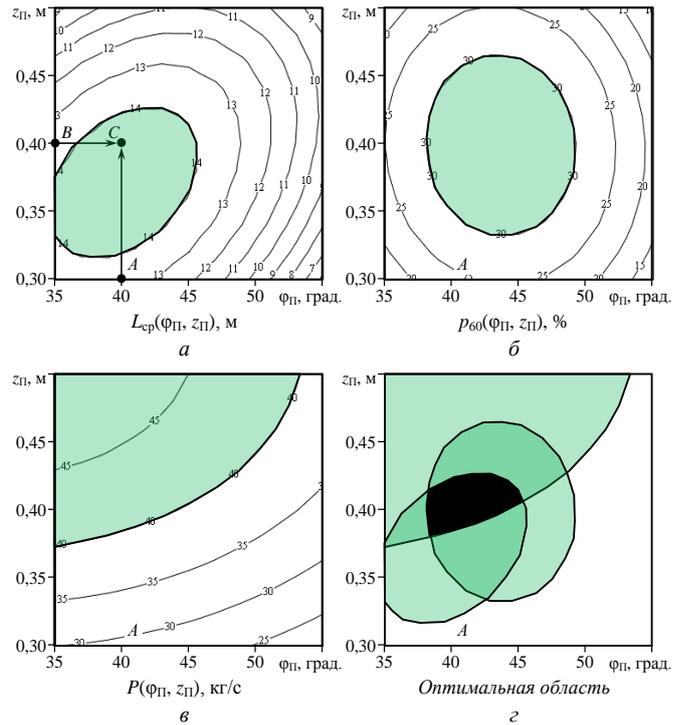


Рис. 9. Картограммы оптимизации параметров установки направляющего кожуха грунтомета (затемнены благоприятные области факторного пространства)

На картограммах затемнены области благоприятного значения показателей (максимальных значений показателей). Выбраны пороговые значения для разделения на благоприятную и неблагоприятную области ($L_{ср} = 14$ м (рис. 9, а), $p_{60} = 30$ % МПа (рис. 9, б) и $P = 40$ кг/с (рис. 9, в)) исходя из условий, что благоприятная область будет занимать значительную долю факторного пространства, включать наибольшие значения критерия, и граница области будет представлять собой линию уровня на картограмме.

Пересечение благоприятных областей (рис. 9, з) представляет собой оптимальную область, в которой одновременно учитываются требования высоких значений дальности метания почвогрунта, кучности и производительности.

По расположению оптимальной области в факторном пространстве (рис. 9, з) можно сделать следующий вывод. Оптимальный угол установки направляющего кожуха составляет 39...44 градуса, оптимальная высота установки направляющего кожуха составляет 0,38...0,42 м. При этом средняя дальность метания грунта составит не менее 14 м, доля почвогрунта, осаждаемого в целевой полосе шириной 0,6 м — не менее 30 %, производительность грунтомета — не менее 40 кг/с.

Для полученных оптимальных параметров проведен компьютерный эксперимент с целью подтверждения оптимального режима работы. Исходя из траекторий движения частиц почвогрунта, практически весь поток подается в направляющий кожух, около 30 % грунта движется сфокусированным потоком по идентичным траекториям, угол выброса составляет около

40...45°, что обеспечивает наибольшую дальность метания грунта.

Заключение. Выявлены зависимости между длиной направляющего кожуха, его диаметром, углом наклона, высотой расположения и дальностью выброса грунта. Разработана компьютерная программа для проведения экспериментов по метанию почвогрунта, позволяющая исследовать влияние конструктивных и технологиче-

ских параметров машины, а также свойств почвогрунта на показатели эффективности метания в заданном объеме на установленную величину.

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

Литература

1. Drapalyuk M., Stupnikov D., Druchinin D., Pozdnyakov E. Forest fires: methods and means for their suppression // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. P. 012061. URL: 10.1088/1755-1315/226/1/012061.
2. Rego F.C., Silva J.S. Wildfires and landscape dynamics in Portugal: a regional assessment and global implications. In: Azevedo J., Perera A., Pinto M. (eds) Forest Landscapes and Global Change. Springer, New York, NY. 2014. URL: doi.org/10.1007/978-1-4939-0953-7_3.
3. Burrows N.D. Linking fire ecology and fire management in south-west Australian forest landscapes. For Ecol Manage 255:2394-2406. 2008. URL: doi.org/10.1016/j.foreco.2008.01.009.
4. Gnusov M.A., Drapalyuk M.V., Druchinin D.Y. Theoretical study of forest fire extinguishing machine use. J. Phys.: Conf. Ser. 2020. 1515, 052066. URL: 10.1088/1742-6596/1515/5/052066.
5. Li J., Li X., Chen C., Zheng H., Liu N. Three-Dimensional Dynamic Simulation System for Forest Surface Fire Spreading Prediction // International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence. 2018. V. 32. Iss. 8. URL: 10.1142/S021800141850026X.
6. Castillo M., Pedernera P., Pena E. Incendios forestales y medio ambiente: Una síntesis global. Rev. Ambient. Desarro. CIPMA, 2003. № 19. P. 44–53.
7. Федорченко И.С., Максимов Е.И. К проектированию рабочего органа грунтомета // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 4 (16). С. 41–44.
8. Орловский С.Н., Карнаухов А.И. Теоретическое и экспериментальное исследование резания лесных почв фрезерными рабочими органами // Проблемы ускоренного воспроизводства и комплексного использования лесных ресурсов: материалы Междунар. науч.-практической конф. (23–25 окт. 2006 г.). Воронеж, 2006. С. 156–163.
9. Peterson A.L., Washington P.O. Firehawk. TM: Dual-use fire-fighting technology for the National Guard (Article) // Proceedings of the 1999 55th Annual Forum of the American Helicopter Society, FORUM 55; Montreal, Que., Can, 1999. V. 2. P. 2292–2297.
10. Wasfy T.M., Mechergui D., Jayakumar P. Understanding the Effects of a Discrete Element Soil Model's Parameters on Ground Vehicle Mobility // Journal of Computational and Nonlinear Dynamics. 2019. № 7 (14).
11. Pue J. De [and etc.] DEM simulation of stress transmission under agricultural traffic Part 3: Evaluation with field experiment Soil & Tillage Research DEM simulation of stress transmission under agricultural traffic Part 3: Evaluation with field experiment // Soil & Tillage Research. 2020. № March (200). P. 104606.
12. Omar M.A. Modular multibody formulation for simulating off-road tracked vehicles // Studies in Engineering and Technology. 2014. № 2 (1). P. 77–100.
13. Prakash K. Tire-soil interaction analysis of forest machines // Master of Science Thesis Industrial Engineering and Management Machine Design, 2014. 143 p.
14. Ramachandran P. Modelling and Dynamic Simulation of Tracked Forwarder in Adams ATV Module, 2015.

15. Gao Q. Design and development of a variable ground clearance, variable wheel track self-leveling hillside vehicle power chassis (V2-HVPC) // Journal of Terramechanics. 2014. № 56. P. 77–90.
16. Kim D.H., Choi C.H., Kim Y.J. Analysis of driving performance evaluation for an unmanned tractor // IFAC-PapersOnLine. 2018. № 17 (51). P. 227–231.
17. Li S., Cao S. Research and simulation on the rollover system of corn harvester; ed X. Chen, 2017. 103223 p.
18. Зализняк В.Е. Основы вычислительной физики. Введение в методы частиц. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Ин-т компьютерных исследований, 2006. Ч. 2. 156 с.
19. Кривцов А.М., Кривцова Н.В. Метод частиц и его использование в механике деформируемого твердого тела // Дальневосточный математический журнал. 2002. Т. 3. № 2. С. 254–276.
20. Bartenev I.M., Malyukov S.V., Gnusov M.A., Stupnikov D.S., Platonov A.D. Modern designs of forest fires machines for soil extinguishment of fire // Advances in Engineering Research International Symposium on Engineering and Earth Sciences: in the collection. 2018. P. 48–53.

References

1. Drapalyuk M., Stupnikov D., Druchinin D., Pozdnyakov E. Forest fires: methods and means for their suppression // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. P. 012061. URL: 10.1088/1755-1315/226/1/012061.
2. Rego F.C., Silva J.S. Wildfires and landscape dynamics in Portugal: a regional assessment and global implications. In: Azevedo J., Perera A., Pinto M. (eds) Forest Landscapes and Global Change. Springer, New York, NY. 2014. URL: doi.org/10.1007/978-1-4939-0953-7_3.
3. Burrows N.D. Linking fire ecology and fire management in south-west Australian forest landscapes. For Ecol Manage 255:2394-2406. 2008. URL: doi.org/10.1016/j.foreco.2008.01.009.
4. Gnusov M.A., Drapalyuk M.V., Druchinin D.Y. Theoretical study of forest fire extinguishing machine use. J. Phys.: Conf. Ser. 2020. 1515, 052066. URL: 10.1088/1742-6596/1515/5/052066.
5. Li J., Li X., Chen C., Zheng H., Liu N. Three-Dimensional Dynamic Simulation System for Forest Surface Fire Spreading Prediction // International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence. 2018. V. 32. Iss. 8. URL: 10.1142/S021800141850026X.
6. Castillo M., Pedernera P., Pena E. Incendios forestales y medio ambiente: Una síntesis global. Rev. Ambient. Desarro. CIPMA, 2003. № 19. P. 44–53.
7. Fedorchenko I.S., Maksimov E.I. To the design of the working body of the soil gun // Systems. Methods. Technologies. 2012. № 4 (16). P. 41–44.
8. Orlovskij S.N., Karnauhov A.I. Theoretical and experimental study of cutting forest soils by milling working bodies // Problemy uskorenogo vosproizvodstva i kompleksnogo ispol'zovaniya lesnyh resursov: materialy Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (23–25 okt. 2006 g.). Voronezh, 2006. P. 156–163.

9. Peterson A.L., Washington P.O. Firehawk. TM: Dual-use fire-fighting technology for the National Guard (Article) // Proceedings of the 1999 55th Annual Forum of the American Helicopter Society, FORUM 55; Montreal, Que., Can, 1999. V. 2. P. 2292–2297.
10. Wasfy T.M., Mechergui D., Jayakumar P. Understanding the Effects of a Discrete Element Soil Model's Parameters on Ground Vehicle Mobility // Journal of Computational and Nonlinear Dynamics. 2019. № 7 (14).
11. Pue J. De [and etc.] DEM simulation of stress transmission under agricultural traffic Part 3 : Evaluation with field experiment Soil & Tillage Research DEM simulation of stress transmission under agricultural traffic Part 3: Evaluation with field experiment // Soil & Tillage Research. 2020. № March (200). P. 104606.
12. Omar M.A. Modular multibody formulation for simulating off-road tracked vehicles // Studies in Engineering and Technology. 2014. № 2 (1). P. 77–100.
13. Prakash K. Tire-soil interaction analysis of forest machines // Master of Science Thesis Industrial Engineering and Management Machine Design, 2014. 143 p.
14. Ramachandran P. Modelling and Dynamic Simulation of Tracked Forwarder in Adams ATV Module, 2015.
15. Gao Q. Design and development of a variable ground clearance, variable wheel track self-leveling hillside vehicle power chassis (V2-HVPC) // Journal of Terramechanics. 2014. № 56. P. 77–90.
16. Kim D.H., Choi C.H., Kim Y.J. Analysis of driving performance evaluation for an unmanned tractor // IFAC-PapersOnLine. 2018. № 17 (51). P. 227–231.
17. Li S., Cao S. Research and simulation on the rollover system of corn harvester; ed X. Chen, 2017. 103223 p.
18. Zaliznyak V.E. Fundamentals of computational physics. Part 2. Introduction to particle methods. M.-Izhevsk: NIC «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika»; In-t komp'yuternyh issledovaniy, 2006. CH. 2. 156 p.
19. Krivcov A.M., Krivcova N.V. Particle method and its use in the mechanics of a deformable solid // Dal'nevostochnyi Matematicheskii Zhurnal (Far Eastern Mathematical Journal). 2002. V. 3. № 2. P. 254–276.
20. Bartenev I.M., Malyukov S.V., Gnusov M.A., Stupnikov D.S., Platonov A.D. Modern designs of forest fires machines for soil extinguishment of fire // Advances in Engineering Research International Symposium on Engineering and Earth Sciences: in the collection. 2018. P. 48–53.