

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВЫРЕЗНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ДИСКОВ С ГИДРОПРИВОДОМ ЛЕСОПОЖАРНОЙ ГРУНТОМЕТАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

кандидат технических наук **М.А. Гнусов**

доктор технических наук, профессор **М.В. Драпалюк**

доктор технических наук, профессор **П.И. Попиков**

аспирант **Н.А. Шерстюков**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,

г. Воронеж, Российская Федерация

В данной статье значительное внимание уделяется методике математического создания структурно сложной почвенной среды с растительностью. Определены конструктивные и технологические параметры взаимодействия рабочих органов лесопожарного грунтомета с почвогрунтом с помощью имитационно физико-математической модели взаимосвязи сферического диска, оснащенного режущей кромкой с полукруглыми вырезами, с почвенной средой. В матмодели представлены сложная геометрия всех форм активных рабочих плоскостей, а также взаимосвязь рабочих органов с элементами почвогрунта. Поверхности сложной конструкции в процессе применения метода конечных элементов преобразованы в большое количество упрощённых плоских фигур. Грунт в имитационно физико-математической модели описан как комплексная система большого количества элементов шарообразной формы, детерминированным образом связывающихся между собой, а также с рабочими плоскостями машины. Было определено, что взаимосвязь частиц почвогрунта при деформации имеет вязкоупругий характер взаимодействия. Представлен расчет сил в виде алгоритма взаимодействия элементов друг на друга в зависимости от расстояния их расположения. Используются уравнения движения, описывающие изменение динамического состояния грунта с течением времени. Движение рабочих органов агрегата, в том числе и сферических дисковых рабочих органов с вырезами в рамках математической модели, рассматривается в моделируемом пространстве, описанном как параллелепипед. Возможно моделирование взаимодействия рабочих органов лесопожарной грунтометательной машины с рабочей средой, в том числе с корнями растений, которые расположены рядом друг с другом в виде сферических элементов в геометрической области. Задача повышения эффективности рабочих процессов лесопожарной грунтометательной машины при прокладке противопожарных полос решена благодаря повышению качества подготовки сферическими дисками с гидроприводом, оснащёнными режущей кромкой с полукруглыми вырезами, почвенного вала, который впоследствии забирают фрезы-метатели и подают поток грунта в заданном направлении.

Ключевые слова: резание почвы, почвенная среда, рабочий орган, сферический диск, моделирование, метод конечных элементов, сферическая частица

MODELING THE WORK FLOW OF CUT-OUT SPHERICAL DISKS WITH HYDRAULIC DRIVE FOR FIRE-FIGHTING SOIL-THROWER

PhD (Engineering) **M.A. Gnusov**

DSc (Engineering), Professor **M.V. Drapalyuk**

DSc (Engineering), Professor **P.I. Popikov**

post-graduate student **N.A. Sherstyukov**

FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

Abstract

In this article, considerable attention is paid to the method of mathematical creation of a structurally complex soil environment with vegetation. Structural and technological parameters of the interaction of the working bodies of the fire-fighting soil thrower with soil have been determined using a simulation-physical-mathematical model of the spherical disk relationship with the soil environment. The disk is equipped with a cutting edge with semicircular cuts. The mathematical model presents complex geometry of all forms of active work planes, as well as the relationship of the working bodies with soil elements. Surfaces of complex construction in the process of applying the finite element method have been transformed into a large number of simplified planar figures. The soil in the simulation physical-mathematical model is described as a complex system of a large number of spherical elements, determinately connecting with each other, as well as with the working planes of the machine. It has been determined that the relationship between the soil particles during deformation is viscoelastic in its nature. The calculation of forces is presented in the form of an algorithm for the interaction of elements on each other in relation to the distance of their location. The equations of motion are used that describe the change in the dynamic state of the soil over time. The movement of the working bodies of the unit, including spherical disk working bodies with cutouts in the framework of the mathematical model, has been considered in the simulated space, described as a parallelepiped. The ability to simulate the interaction of the working bodies of a forest fire soil-throwing machine with a working medium, including plant roots, which are located next to each other in the form of spherical elements in the geometric region. The task of increasing the efficiency of the forest fire-fighting soil-throwing machine when laying fire strips has been solved by improving the quality of preparing the soil shaft with spherical hydraulic disks equipped with a cutting edge with semicircular cuts, which are subsequently taken by thrower-cutters and feed the soil flow in a given direction.

Keywords: soil cutting, soil environment; working body; spherical disk, modeling, finite element method, spherical particle

Введение

Анализ литературных и патентных источников показал, что в наибольшей степени эффективными и производительными являются лесопожарные грунтометательные машины, совмещающие в своей конструкции дисковые рабочие органы и фрезы-метатели. Однако существующие конструкции этого типа имеют ряд недостатков: недостаточно разрыхленный почвенный вал перед фрезами-метателями, высокую массу и габариты, что значительно снижает мобильность машины и области её применения, а также высокую энергоёмкость технологического процесса. Параметры технологического процесса создания минерализован-

ных полос и метания грунта в зону огня и конструкции агрегатов с комбинированными рабочими органами недостаточно обоснованы, поэтому необходимо проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

На современном этапе развития науки и техники одним из основных этапов разработки наукоемкой продукции является моделирование сложных систем или процессов, поскольку современная технология является чрезвычайно сложным техническим объектом. При создании лесопожарной грунтометательной машины с высокими характеристиками производительности и качества работы целесообразно использовать математическое моделирование.

Цель исследования – повышение эффективности рабочих процессов лесопожарной грунтометательной машины за счет повышения качества подготовки почвенного вала вырезными сферическими дисками с гидроприводом.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели предложены новые технические решения и разработана конструктивно-технологическая схема лесопожарной грунтометательной машины, у которой привод сферических дисков, оснащенных режущей кромкой с полукруглыми вырезами, осуществлен от отдельных гидромоторов [1].

Для моделирования механического поведения элементов грунта используется метод динамики частиц [2–5]. Описание почвогрунта в модели имитации процесса определено исходя из возможности применения мощных современных компьютеров. В процессе применения, конечно-элементного приближения почвогрунт определен как соотношение большого количества (порядка 10^3-10^5) отдельных шарообразных элементов. Размеры элементов могут быть как одинаковыми для упрощения исследования, так и разными для исключения неблагоприятных эффектов периодичности плотной упаковки элементов. Элементы грунта механически участвуют в процессе, как между собой, так и с рабочими поверхностями машины.

При решении поставленной задачи наиболее подходит метод динамики частиц. На основании выбранного метода решения принимается во внимание, что рабочая среда, с которой будет происходить взаимодействие рабочих поверхностей, состоит из шаров с ограниченным диаметром от 0,04 до 0,08 м. В имитационной модели происходит максимально точное взаимодействие частиц грунта с грунтом, также учитывается и контакт рабочих поверхностей с грунтом с учетом сил сухого и вязкого трения, а также учтены упругие силы при взаимодействии элементов (рис. 1). Движение всех описанных элементов в процессе работы имитационной модели учитывает законы классической динамики. В модели необходимо воспроизвести изменение состояния грунта (процесс выгрузки или транспортировки) и определить показатели потока грунта: дальность выброса, кучность, высоту покрытия полосы пожара, подвергаемой тушению.

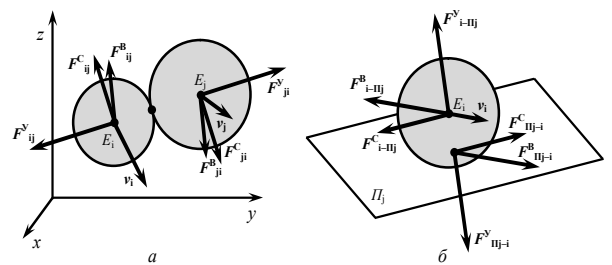


Рис. 1. Силы, возникающие при контакте двух элементов грунта между собой (а), а также между элементом грунта и поверхностью рабочих органов машины (б): F^N – упругие силы; F^C и F^B – силы сухого и вязкого трения (собственные разработки)

Визуализация и описание процесса происходит в трехмерном декартовом пространстве (x, y, z) . Расположение каждого компонента E_i обозначается шестью переменными: компонентами скорости (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) и координатами его центра (x_i, y_i, z_i) .

В ходе выполнения перманентно происходит корректировка координат всех вершин (точек) определенных треугольников T_{ij} (где i – номер треугольника, j – номер вершины). Изменение всех игрековых координат обозначенных треугольных поверхностей выполняется на основе прямолинейного равномерного поступательного движения грунтомета вдоль оси OY :

$$y_{ij}^{\tau} = y_{ij}^{\tau-1} + v \times \Delta t, \quad (1)$$

где y_{ij}^{τ} – координата j -й вершины i -го треугольника на шаге интегрирования τ ; v – скорость поступательного движения машины; Δt – величина шага интегрирования.

Возможности имитационной модели позволяют поэтапно подключать рабочие органы агрегата, и в процессе происходит постепенное углубление рабочих органов, что способствует определению сбалансированности агрегата при прямолинейном движении комбинированной конструкции в первые секунды работы. В момент времени $t = 0$ машина помещается над поверхностью почвогрунта (нижние точки рабочих поверхностей агрегата касаются плоскости почвогрунта), и за промежуток времени $t_{заг}$ машина выходит на установленную величину заглубления рабочих органов. Поэтому компьютерный эксперимент начинается после прихода грунтомета в равновесное положение.

Для задания в модели сферического диска с десятью вырезами задавали сначала отдельный структурный мотив диска (рис. 2). В теории симметрии структурным мотивом называется часть объекта, которая повторяется для получения всего объекта, в частности, рассматриваемый диск можно получить поворотным транслированием структурного мотива относительно оси диска.

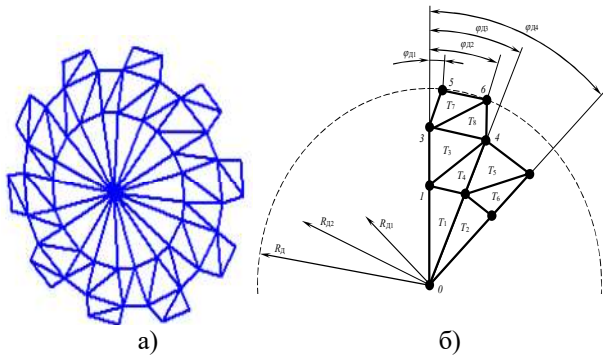


Рис. 2. Представление в модели сферического диска с вырезами как совокупности элементарных треугольников: а – внешний вид диска, установленного под двумя пространственными углами; б – индексация базовых точек и элементарных треугольников структурного мотива диска (собственные разработки)

Координаты шести точек структурного мотива задаются следующими выражениями (с учетом поворотной трансляционной симметрии, задаваемой параметром $i = 1...10$ и началом нумерации с индекса 401):

$$\begin{aligned}
 x_{400+6(i-1)+1} &= x_r + x_d - x_{d1}; \\
 y_{400+6(i-1)+1} &= y_r + y_d + R_{d1} \cos\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10}\right); \\
 z_{400+6(i-1)+1} &= z_r + z_d + R_{d1} \sin\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10}\right); \\
 x_{400+6(i-1)+2} &= x_r + x_d - x_{d1}; \\
 y_{400+6(i-1)+2} &= y_r + y_d + R_{d1} \cos\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10} + \phi_{d3}\right); \\
 z_{400+6(i-1)+2} &= z_r + z_d + R_{d1} \sin\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10} + \phi_{d3}\right); \\
 x_{400+6(i-1)+3} &= x_r + x_d - x_{d2}; \\
 y_{400+6(i-1)+3} &= y_r + y_d + R_{d2} \cos\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10}\right); \\
 z_{400+6(i-1)+3} &= z_r + z_d + R_{d2} \sin\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10}\right); \\
 x_{400+6(i-1)+4} &= x_r + x_d - x_{d2};
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 y_{400+6(i-1)+4} &= y_r + y_d + R_{d2} \cos\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10} + \phi_{d3}\right); \\
 z_{400+6(i-1)+4} &= z_r + z_d + R_{d2} \sin\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10} + \phi_{d3}\right); \\
 x_{400+6(i-1)+5} &= x_r + x_d - x_{d3}; \\
 y_{400+6(i-1)+5} &= y_r + y_d + R_{d1} \cos\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10} + \phi_{d1}\right); \\
 z_{400+6(i-1)+5} &= z_r + z_d + R_{d1} \sin\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10} + \phi_{d1}\right); \\
 x_{400+6(i-1)+6} &= x_r + x_d - x_{d3}; \\
 y_{400+6(i-1)+6} &= y_r + y_d + R_{d1} \cos\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10} + \phi_{d2}\right); \\
 z_{400+6(i-1)+6} &= z_r + z_d + R_{d1} \sin\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10} + \phi_{d2}\right),
 \end{aligned}$$

где x_d, y_d, z_d – смещения диска по декартовым осям относительно компоновочного центра грунтомета; R_d – радиус сферического диска относительно оси вращения (в базовом компьютерном эксперименте принят равным 0,32 м); R_{d1} и R_{d2} – радиусы окружностей дискретизации диска (соответственно 0,18 и 0,27 м); x_{d1}, x_{d2}, x_{d3} – смещения окружностей дискретизации в осевом направлении относительно кромки диска (соответственно 0,028, 0,060, 0,085 м); ω_d – угловая скорость вращения диска с гидроприводом; $\phi_{d1}, \phi_{d2}, \phi_{d3}$ – угловые ширины: передней кромки выступа диска, выступа вместе с передней кромкой без задней кромки, полная ширина выступа (соответственно равны 1,8; 9,0; 10,8°).

После задания предварительных координат базовых точек диска на каждом шаге интегрирования осуществляется пошаговый поворот сферического диска, оснащенного режущей кромкой с полукруглыми вырезами. Установка сферического диска на угол β по отношению к вертикальной плоскости производится с одновременным изменением координат базовых точек:

$$\begin{cases}
 r = \sqrt{(x_i - (x_r + x_d))^2 + (z_i - (z_r + z_d))^2}; \\
 \phi = \begin{cases} \arctan \frac{z_i - (z_r + z_d)}{x_i - (x_r + x_d)}, & x_i - (x_r + x_d) \geq 0; \\ \arctan \frac{z_i - (z_r + z_d)}{x_i - (x_r + x_d)} + 180^\circ, & x_i - (x_r + x_d) < 0; \end{cases} \\
 x_{iII} = x_r + x_d + r \cos(\phi + \beta); \\
 y_{iII} = y_i; \\
 z_{iII} = z_r + z_d + r \sin(\phi + \beta),
 \end{cases}
 \tag{4}$$

где r и ϕ – полярные координаты базовых точек

в системе координат, связанной с точкой размещения сферического диска; (x_i, y_i, z_i) и $(x_{iП}, y_{iП}, z_{iП})$ – координаты базовой точки i до и после преобразования вращения относительно оси ОУ.

Относительно направления движения агрегата сферический диск устанавливается на угол атаки α , при этом производится следующее преобразование поворота:

$$\left\{ \begin{array}{l} r = \sqrt{(x_{иП} - (x_r + x_d))^2 + (y_{иП} - (y_r + y_d))^2}; \\ \phi = \begin{cases} \arctan \frac{y_{иП} - (y_r + y_d)}{x_{иП} - (x_r + x_d)}, & x_{иП} - (x_r + x_d) \geq 0; \\ \arctan \frac{y_{иП} - (y_r + y_d)}{x_{иП} - (x_r + x_d)} + 180^\circ, & x_{иП} - (x_r + x_d) < 0; \end{cases} \\ x_{иП2} = x_r + x_d + r \cos(\phi + \alpha); \\ y_{иП2} = y_r + y_d + r \sin(\phi + \alpha); \\ z_{иП2} = z_{иП}, \end{array} \right. \quad (5)$$

где $(x_{iП}, y_{iП}, z_{iП})$ и $(x_{iП2}, y_{iП2}, z_{iП2})$ – координаты базовой точки i до и после преобразования вращения относительно оси ОZ.

На основе базовых точек задаются элементарные треугольники рабочей поверхности сферического диска с вырезами. Структурный мотив i ($i = 1 \dots 10$) включает восемь треугольников:

$$\begin{aligned} & T_{61+8(i-1)+1}(P_{400}, P_{400+6(i-1)+1}, P_{400+6(i-1)+2}), \\ & T_{61+8(i-1)+2}(P_{400}, P_{400+6(i-1)+2}, P_{400+6(i-1)+6}), \\ & T_{61+8(i-1)+3}(P_{400+6(i-1)+1}, P_{400+6(i-1)+2}, P_{400+6(i-1)+3}), \\ & T_{61+8(i-1)+4}(P_{400+6(i-1)+2}, P_{400+6(i-1)+3}, P_{400+6(i-1)+4}), \\ & T_{61+8(i-1)+5}(P_{400+6(i-1)+3}, P_{400+6(i-1)+4}, P_{400+6(i-1)+5}), \\ & T_{61+8(i-1)+6}(P_{400+6(i-1)+4}, P_{400+6(i-1)+5}, P_{400+6(i-1)+6}), \\ & T_{61+8(i-1)+7}(P_{400+6(i-1)+2}, P_{400+6(i-1)+4}, P_{400+6(i-1)+6}), \\ & T_{61+8(i-1)+8}(P_{400+6(i-1)+4}, P_{400+6(i-1)+6}, P_{400+6(i-1)+3+6}), \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, сферический диск с вырезами представлен в модели 80 элементарными треугольными поверхностями.

В процессе имитации движения машины в пространстве задействованные поверхности всех рабочих органов описывают сложное вращательное и поступательное движение твердого тела по отношению к рабочей среде.

Размещение в пространстве точек центров сферических дисков с полукруглыми вырезами $(x_{Ц}, y_{Ц}, z_{Ц})$ осуществляется согласно величине заглубления дисков в грунт a_d , а также по заданным геометрическим параметрам машины (рис. 3):

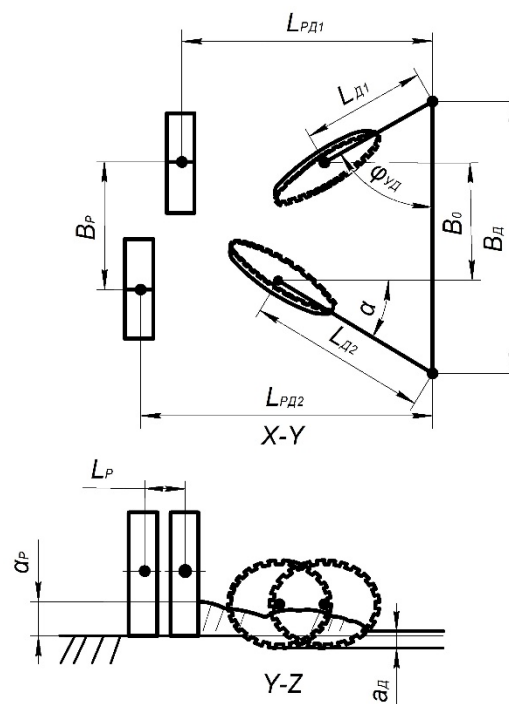


Рис. 3. Основные геометрические параметры компоновки рабочих органов лесопожарной грунтометательной машины (собственные разработки)

$$\begin{aligned} x_{Ц1} &= \frac{B_d}{2} - L_{D1} \cos \phi_{yD}; \\ y_{Ц1} &= y_M + L_{PD1} - L_{D1} \sin \phi_{yD}; \\ z_{ЦP1} &= R_d; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} x_{Ц2} &= -\frac{B_d}{2} + L_{D2} \cos \phi_{yD}; \\ y_{Ц2} &= y_M + L_{PD2} - L_{D2} \sin \phi_{yD}; \\ z_{ЦP2} &= R_d \end{aligned}$$

$$x_{ЦP1} = \frac{B_P}{2};$$

$$y_{ЦP1} = y_M;$$

$$x_{ЦP2} = -\frac{B_P}{2};$$

$$y_{ЦP2} = y_M + L_P;$$

$$z_{Ц1} = R_{D1} - a_d;$$

$$z_{Ц2} = R_{D2} - a_d.$$

где B_P – расстояние между осями роторов;

$L_{рд1}$ – расстояние от рамы до центра левого ротора;
 $L_{рд2}$ – расстояние от рамы до центра правого ротора;
 $L_{д1}$ – длина рычага крепления диска левого;
 α – угол атаки диска (угол установки к направлению движения); $\varphi_{уд}$ – угол между рычагом крепления диска и рамой; $L_{д2}$ – длина рычага крепления диска правого; B_0 – расстояние между центрами дисков; $B_д$ – расстояние между шарнирами крепления рычагов дисков на раме; a_p – глубина заглабления фрез-метателей; L_p – расстояние между фрезами-метателями; $a_д$ – величина заглабления диска; $У_M$ – координата машины вдоль линии ее движения.

Результаты и обсуждение

Для удобства моделирования разработана компьютерная программа «Программа для моделирования двухроторной грунтометательной машины» на языке ObjectPascal в интегрированной среде программирования BorlandDelphi 7. На рис. 4 представлена форма ввода исходных данных для моделирования двухроторной грунтометательной машины.

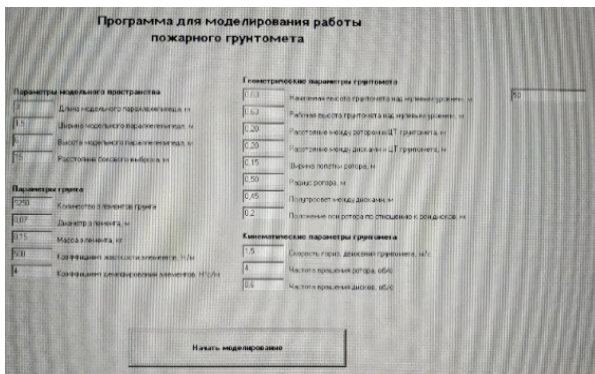


Рис. 4. Форма ввода исходных данных для моделирования двухроторной грунтометательной машины (собственные разработки)

Программа предназначена для имитации работы лесопожарной грунтометательной машины. Перед началом моделирования программа позволяет ввести геометрические и кинематические параметры машины, а также параметры грунта. В процессе работы программа непрерывно выводит на экран: три проекции работающей машины, профиль оставляемой борозды, числовые значения показателей качества работы машины и потребляемую мощность (рис. 5).

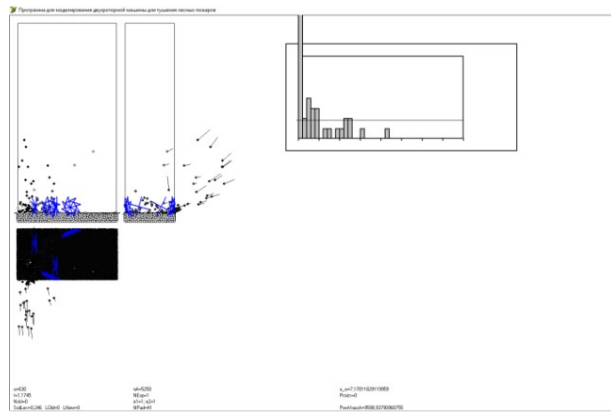


Рис. 5. Вывод результатов моделирования в разработанной программе для моделирования двухроторной грунтометательной машины (собственные разработки)

Выводы

Разработана имитационная модель комбинированного грунтомета, содержащего сферические диски с полукруглыми вырезами и фрезерные рабочие органы, позволяющая проводить предварительные испытания опытного образца грунтомета. Представленные в имитационной программе сферические диски позволяют решить задачу повышения эффективности рабочих процессов лесопожарной грунтометательной машины благодаря повышению качества подготовки сферическими дисками с гидроприводом, оснащенными режущей кромкой с полукруглыми вырезами, почвенного вала, который впоследствии забирают фрезы-метатели и подают поток грунта в требуемом направлении.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-38-60041 – Совершенствование методологической базы моделирования системы и процессов ликвидации лесных пожаров направленно-регулируемым потоком грунта.

Библиографический список

1. Патент 2684940 РФ, МПКЕ02F 3/18 (2006.01) E02F 5/00 (2006.01) A62C 3/02 92006.01). Пожарный грунтomet-полосопрокладыватель : 2018125062, 09.07.2018 ; заявл. 09.07.2018 ; опубл. 16.04.2019 / И. М. Бартнев, П. И. Попиков, С. В. Малюков, С. В. Зимарин, Н. А. Шерстюков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ».
2. Математическая модель процесса подачи и выброса грунта рабочими органами комбинированной машины для тушения лесных пожаров / М. В. Драпалюк, И. М. Бартнев, М. А. Гнусов [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 84. – С. 232–246.
3. Hoover, W. G. Atomistic Nonequilibrium Computer Simulations / W. G. Hoover // *Physica A*. – 1983. – Vol. 118. – P. 111–122.
4. Белоцерковский, О. М. Метод крупных частиц в газовой динамике / О. М. Белоцерковский, Ю. М. Давыдов. – Москва : Наука, 1982. – 392 с.
5. Хокни, Р. Численное моделирование методом частиц / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – Москва : Мир, 1987. – 638 с.
6. Григорьев, Ю. Н. Численное моделирование методами частиц-в-ячейках / Ю. Н. Григорьев, В. А. Вшивков, М. П. Федорук. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004. – 360 с.
7. Кривцов, А. М. Метод частиц и его использование в механике деформируемого твердого тела / А. М. Кривцов, Н. В. Кривцова // Дальневосточный математический журнал ДВО РАН. – 2002. – Т. 3. – № 2. – С. 254–276.
8. Español, P. Hydrodynamics from Dissipative Particle Dynamics / P. Español // *Phys. Rev. E*. – 1995. – Vol. 52. – P. 1734–1742.
9. Jakob, C. Particle Methods. An Overview / C. Jakob, H. Konietzky. – Freiberg, 2012. – 24 p.
10. Particle Dynamics Modeling for Colloid Suspensions / D. S. Bolinteanu, G. S. Grest, J. B. Lechman [et al.] // *Comp. Part. Mech.* – 2014. – Vol. 1. – P. 321–356.
11. A Dissipative Particle Dynamics Method for Arbitrary Complex Geometries / Li Zhen, Bian Xin, Tang Yu-Hang, G. E. Karniadakis // arXiv:1612.08761v1.
12. Kovalev, O. O. On Simulation of Hydraulic Fracturing Using Particle Dynamics Method / O. O. Kovalev // *Proc. of Summer School – Conference "Advanced Problems in Mechanics"*. – Saint-Petersburg, 2013. – P. 285–291.

References

1. Bartenev I.M., Popikov P.I., Malyukov S.V., Zimarin S.V., Sherstyukov N.A. *Pozharnyj gruntomet-polosoprokladyvatel'* [Firefighting soil-thrower and fire-break maker]. Patent RF, no. 2018125062, 2019.
2. Drapalyuk M.V., Bartenev I.M., Gnosov M.A. (et al.) (2012) *Matematicheskaya model' processa podachi i vybrosa grunta rabochimi organami kombinirovannoj mashiny dlja tusheniya lesnyh pozharov* [A mathematical model of the process of feeding and discharging soil by the working bodies of a combined machine for extinguishing forest fires]. *Politematicheskij setevoy jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polytematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], no. 84, pp. 232-246 (in Russian).
3. Hoover W.G. (1983) Atomistic Nonequilibrium Computer Simulations. *Physica A*, Vol. 118, pp. 111-122.
4. Belotserkovskij O.M., Davydov Ju.M. *Metod krupnyh chastic v gazovoj dinamike* [Method of large particles in gas dynamics]. Moscow, Nauka, 1982, 392 p. (in Russian).
5. Hokni R., Istvud Dzh. *Chislennoe modelirovanie metodom chastits* [Numerical simulation using the particle method]. Moscow, World, 1987, 638 p. (in Russian).

6. Grigoryev Ju.N., Vshivkov V.A., Fedoruk M.P. *Chislennoe modelirovanie metodami chastits-v-jacheykakh* [Numerical simulation using particle-in-cell methods]. Novosibirsk, Publishing house of SB RAS, 2004, 360 p. (in Russian).
7. Krivtsov A.M., Krivtsova N.V. (2002) *Metod chastits i yego ispol'zovanie v mekhanike deformiruемого tverdogo tela* [The particle method and its use in the mechanics of a deformable solid]. *Dal'nevostochnyj matematicheskij zhurnal DVO RAN* [Far Eastern mathematical journal of the Feb RAS], Vol. 3, no. 2, pp. 254-276 (in Russian).
8. Español P. (1995) Hydrodynamics from Dissipative Particle Dynamics. *Phys. Rev. E.*, Vol. 52, pp. 1734-1742.
9. Jakob C., Konietzky H. Particle Methods. AnOverview. Freiberg, 2012, 24 p.
10. Bolintineanu D.S., Grest G.S., Lechman J.B. (et al.) (2014) Particle Dynamics Modeling for Colloid Suspensions. *Comp. Part. Mech*, Vol. 1, pp. 321-356.
11. Zhen Li, Xin Bian, Yu-Hang Tang, Karniadakis G.E. A Dissipative Particle Dynamics Method for Arbitrary Complex Geometries. arXiv:1612.08761v1.
12. Kovalev O.O. On Simulation of Hydraulic Fracturing Using Particle Dynamics Method. Proc. of Summer School – Conference "Advanced Problems in Mechanics". St. Petersburg, 2013, pp. 285-291.

Сведения об авторах

Гнусов Максим Александрович – кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательского отдела (НИО) ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: mgnusov@yandex.ru.

Драпалюк Михаил Валентинович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: md@vglta.vrn.ru.

Попиков Петр Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: popikovpetr@yandex.ru.

Шерстюков Никита Александрович – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: nikita.sherstyukov@mail.ru.

Information about authors

Gnusov Maksim Aleksandrovich – PhD (Engineering), researcher, Research Department (NIO), FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: mgnusov@yandex.ru.

Drapalyuk Mikhail Valentinovich – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: md@vglta.vrn.ru.

Popikov Petr Ivanovich – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: popikovpetr@yandex.ru.

Sherstyukov Nikita Aleksandrovich – post-graduate student of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: nikita.sherstyukov@mail.ru.