

УДК 630*432

UDC 630*432

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства (технические науки)

05.20.01 Technologies and means of agricultural mechanization (technical sciences)

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ГРУНТОМ ФРЕЗЫ-
МЕТАТЕЛЯ ЛЕСОПОЖАРНОГО
ГРУНТОМЕТА-ПОЛОСОПРОКЛАДЫВАТЕЛЯ**

**MATHEMATICAL MODEL FOR
INTERACTION OF ROTATING WORKING
BODY OF FOREST A FIRE EXTINGUISHING
MACHINE WITH THE SOIL**

Гнусов Максим Александрович
к.т.н.
mgnusov@yandex.ru

Gnusov Maxim Alexandrovich
Cand.Tech.Sci.
mgnusov@yandex.ru

Драпалюк Михаил Валентинович
д.т.н., профессор
michael1@yandex.ru

Drapalyuk Mikhail Valentinovich
Dr.Sci.Tech., Professor
michael1@yandex.ru

Попиков Петр Иванович
д.т.н., профессор
popikovpetr@yandex.ru

Popikov Peter Ivanovich
Dr.Tech.Sci., Professor
popikovpetr@yandex.ru

Петков Александр Федорович
Аспирант
alexanderpetkoff@mail.ru
*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет имени Г.Ф.
Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация:*

Petkov Alexander Fedorovich
graduate student
alexanderpetkoff@mail.ru
*Voronezh State University of Forestry and
Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh,
Russian Federation*

Статья знакомит с исследованием по созданию имитационной физико-математической модели рабочего процесса грунтомета-полосопрокладывателя, производящего метание почвогрунта направленным потоком. Задача, решаемая с помощью данной работы, направлена на оптимизацию процесса резания и выброса в заданном направлении почвогрунта с минимальными энергозатратами при максимальной дальности выброса. Описана методика расчета фрезы-метателя, ориентированная на формирование требуемого количества почвогрунта для создания минерализованной полосы на кромке лесного низового пожара. Улучшая и реализовывая полноценное воспроизведение физико-математических моделей с помощью имитации процесса, можно экономить ресурсы на разработку агрегатов лесного хозяйства. В работе представлен продуктивный метод обработки почвогрунта фрезами-метателями, способствующий снижению энергопотребления за счет формирования ориентированных минерализованных потоков почвогрунта. Для физико-математического описания процесса составлена имитационная программа, которая позволяет опробовать конкретную задачу минимизации энергозатрат при максимальной дистанции выброса почвогрунта с постоянной плотностью потока к частоте вращения фрез-метателей

The article introduces a study on the creation of a simulated physical and mathematical model of the working process of a strip thrower, throwing soil in a directed flow. The problem solved with the help of this work is aimed at optimizing the cutting and ejection process in a given direction of the soil with minimal energy consumption with a maximum emission range. The article describes a methodology for calculating the milling thrower, which is oriented to the formation of the required amount of soil to create a mineralized strip at the edge of a forest bottom fire. Improving and realizing the full reproduction of physical and mathematical models using process simulations, you can save resources on the development of forestry aggregates. The study presents a productive method of processing soil with milling cutters, which helps to reduce energy consumption due to the formation of oriented mineralized flows of soil. For a physical and mathematical description of the process, a simulation program has been compiled that allows you to test the specific task of minimizing energy consumption at a maximum distance of soil discharge with a constant flow density to the rotational speed of the milling throwers

Ключевые слова: ФРЕЗА-МЕТАТЕЛЬ,
ПОЧВОГРУНТ, МОДЕЛИРОВАНИЕ,
ЭНЕРГОЗАТРАТЫ, НАПРАВЛЕННЫЙ ПОТОК

Keywords: CUTTER-THROWER, SOIL,
MODELING, ENERGY CONSUMPTION,
DIRECTED FLOW

DOI: <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-159-007>

Повышение эффективности работы грунтометательных агрегатов с почвогрунтом непрерывного действия с высокой частотой вращения фрез-метателей с возможностью направления потока почвогрунта является важной научной задачей. На текущей ступени развития науки и техники одним из основных этапов разработки наукоемкой продукции является моделирование сложных систем и процессов, поскольку современные технологии являются чрезвычайно сложными техническими объектами. При создании лесопожарной грунтометательной машины с высокими производительностью и качеством работы целесообразно использовать математическое моделирование. Основными технологическими требованиями работы лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя являются сдвиг лесной подстилки в сторону, противоположную от кромки лесного пожара, качественная подготовка почвогрунта и формирование на его основе вала и направленный выброс почвогрунта на кромку лесного пожара. Кроме того, необходимо обеспечить эффективность, высокую производительность и надежность создаваемой машины. Все это достигается благодаря оригинальной конструкции лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя (рисунок 1), содержащего раму 1, механизм навески 2, рыхлитель, сферические диски, фрезы-метатели 8 и 9, шнек 3, сферические диски 5, которые имеют съемную режущую кромку с полукруглыми вырезами 6, выполненную из отдельных сегментов, гидромоторы 4, 7, 11. Привод сферических дисков, шнека и фрез-метателей осуществлен от отдельных гидромоторов. Фрезы -метатели 8 и 9 установлены на уровне дна борозды, поэтому они не фрезеруют поверхность задернелой почвы, а только дополнительно измельчают почву

из почвенного вала и отбрасывают мелкие фракции почвы из почвенного вала в требуемом направлении, что значительно снижает энергозатраты и позволяет увеличить в 1,5-2 раза поступательную скорость агрегата [1].

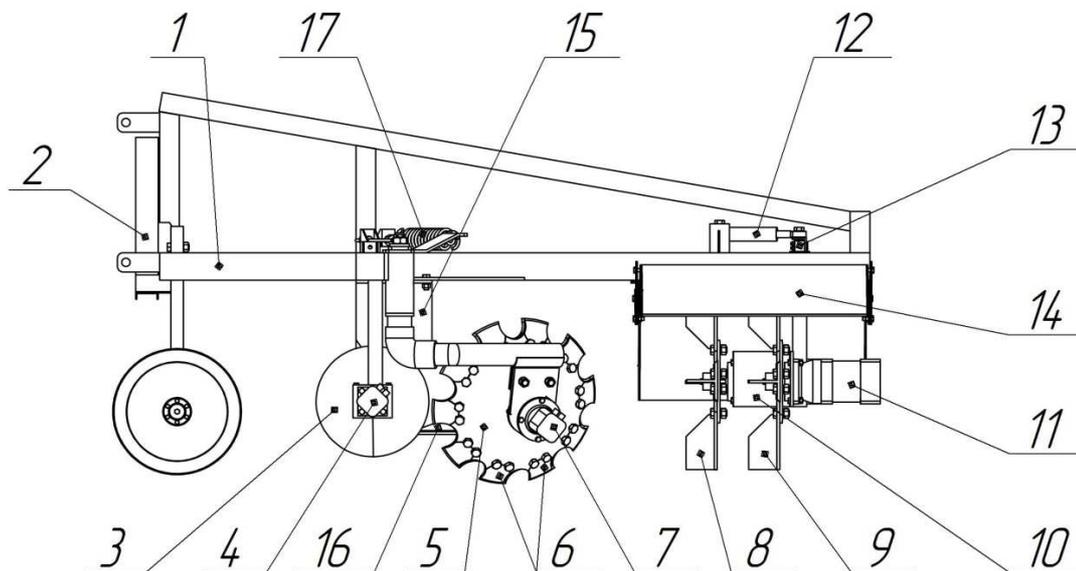


Рисунок 1 - Общий вид лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя

Математическая модель рабочего процесса лесопожарного полосопрокладывателя с гидроприводом рабочих органов описывает механические процессы (вращение и движение сферических дисков и фрез-метателей, взаимодействие сферических дисков и фрез-метателей с грунтом и препятствиями, движение грунта в пространстве) и связывает гидравлическую и механическую подсистемы:

$$(J_M + J_P + J_{II}) \frac{d^2 \phi_P}{dt^2} = \frac{Q_M(t)(P_M - P_0)}{\frac{d\phi_P}{dt}} - \sum_{i=1}^{N_{III}} r_i F^{B_{VII}} - \sum_{i=1}^{N_{ЭП}} r_i F^{B_{VII}} - \left(M_{CT} + k_{BT} \frac{d\phi_P}{dt} \right). \quad (1)$$

где J_M , J_P , J_{II} – моменты инерции гидромотора, фрез-метателей, передачи, приведенные к оси вращения диска или фрез-метателей; Q_M – расход рабочей жидкости гидромотором; P_M и P_0 – давление на входе и выходе гидромотора; N_{III} и $N_{ЭП}$ – количество элементов грунта и препятствия (корни, пни, камни), взаимодействующие с режущей кромкой диска и

лопатками фрез-метателей; r_i – расстояние от оси фрез-металелей до взаимодействующего с фрезой-метателем i -го элемента грунта или препятствия; F^{BYII} – касательная составляющая силы воздействия i -го элемента грунта и препятствия на фрезу-метатель; M_{CT} – момент силы сухого трения при вращении фрезы-метателя; k_{BT} – коэффициент вязкого трения.

Для имитации 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 [6–9]. Элементы грунта механически участвуют в процессе, как между собой, так и с рабочими поверхностями ротора-метателя машины.

Степень взаимосвязи фрезы-метателя (рабочих плоскостей) и почвогрунта (имитируемой среды) c_{II} содержит основу, заложенную в имитационной модели, при этом не принимается во внимание коэффициент демпфирования k_{II} из-за скольжения частиц грунта о гладкую сталь.

Состояние процесса моделирования движения частиц почвогрунта в математическом описании взаимодействия элементов почвогрунта с рабочим органом описано следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 m_{III} \frac{d^2 x_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{III}} (F_{xij}^V + F_{xij}^B) + \sum_{j=1}^{N_{III}} F_{xij}^{BYII} ; \\
 m_{III} \frac{d^2 y_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{III}} (F_{yij}^V + F_{yij}^B) + \sum_{j=1}^{N_{III}} F_{yij}^{BYII} ;
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$m_{III} \frac{d^2 z_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^{N_{III}} (F_{z_{ij}}^V + F_{z_{ij}}^B) + \sum_{j=1}^{N_{III}} F_{z_{ij}}^{BYII} - m_{III} g .$$

где N_{III} – количество шаров в модели.

Силы F^{BYII} вязкоупругого взаимодействия почвенных шаров с элементами фрезы-метателя задаются в следующем виде:

$$\begin{aligned} F_{x_{ij}}^{BYII} &= c_{II} \left(\frac{d_{III} + d_{II}}{2} - r_{ij} \right) (x_i - x_j) / r_{ij} + k_{II} \left(r_{ij} - \frac{d_{III} + d_{II}}{2} \right) (v_{xi} - v_{xj}); \\ F_{y_{ij}}^{BYII} &= c_{II} \left(\frac{d_{III} + d_{II}}{2} - r_{ij} \right) (y_i - y_j) / r_{ij} + k_{II} \left(r_{ij} - \frac{d_{III} + d_{II}}{2} \right) (v_{yi} - v_{yj}); \\ F_{z_{ij}}^{BYII} &= c_{II} \left(\frac{d_{III} + d_{II}}{2} - r_{ij} \right) (z_i - z_j) / r_{ij} + k_{II} \left(r_{ij} - \frac{d_{III} + d_{II}}{2} \right) (v_{zi} - v_{zj}). \end{aligned} \quad (3)$$

где N_{III} – количество шаров в модели ротора-метателя.

Фреза-метатель в модели состоит из четырех прямоугольных метательных частей лопаток (каждая из лопаток состоит из двух треугольников) [10-12], четырех режущих кромок лопаток, расположенных в плоскости вращения и состоящих из двух треугольников каждая, а также задней круговой стенки, собирающей почвогрунт на лопатки, состоящие из восьми треугольников (рисунки 2 и 3).

В программе моделирования фреза-метатель производит перемещение 22 базовых точек вокруг центрального вала. При этом координаты базовых точек задавались следующими выражениями:

- базовые точки оси:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{Г} + x_{P}; \\ y_1 &= y_{Г} + y_{P}; \\ z_1 &= z_{Г} + z_{P}; \\ x_2 &= x_{Г} + x_{P}; \\ y_2 &= y_{Г} + y_{P} - B_{Л}; \\ z_2 &= z_{Г} + z_{P}. \end{aligned} \quad (4)$$

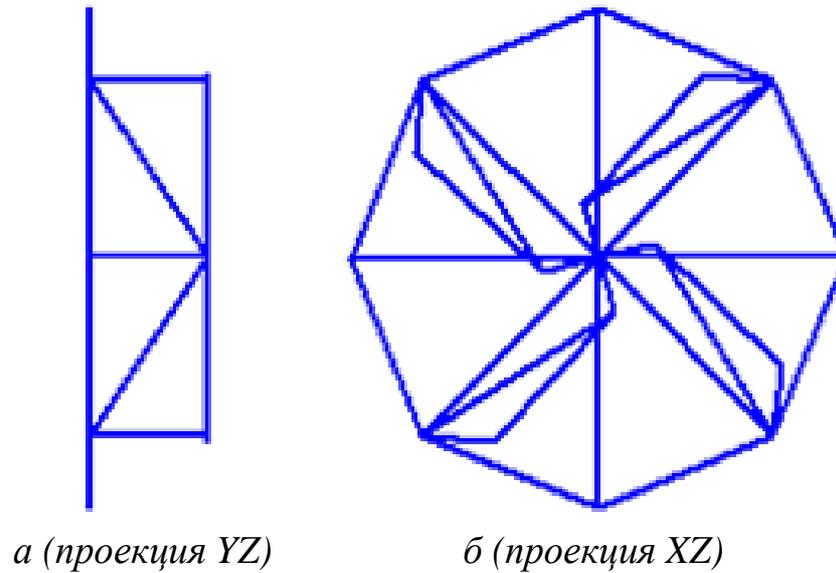


Рисунок 2 – Представление в модели ротора (две проекции)

- базовые точки метательных частей лопаток:

$$\begin{aligned}
 x_{1+2i} &= x_{\Gamma} + x_P + R_P \cos\left(\omega_P t + (i-1)\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right); \\
 y_{1+2i} &= y_{\Gamma} + y_P; \\
 z_{1+2i} &= z_{\Gamma} + z_P + R_P \sin\left(\omega_P t + (i-1)\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right); \\
 x_{2+2i} &= x_{\Gamma} + x_P + R_P \cos\left(\omega_P t + (i-1)\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right); \\
 y_{2+2i} &= y_{\Gamma} + y_P - B_{\text{л}}; \\
 z_{2+2i} &= z_{\Gamma} + z_P + R_P \sin\left(\omega_P t + (i-1)\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right).
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

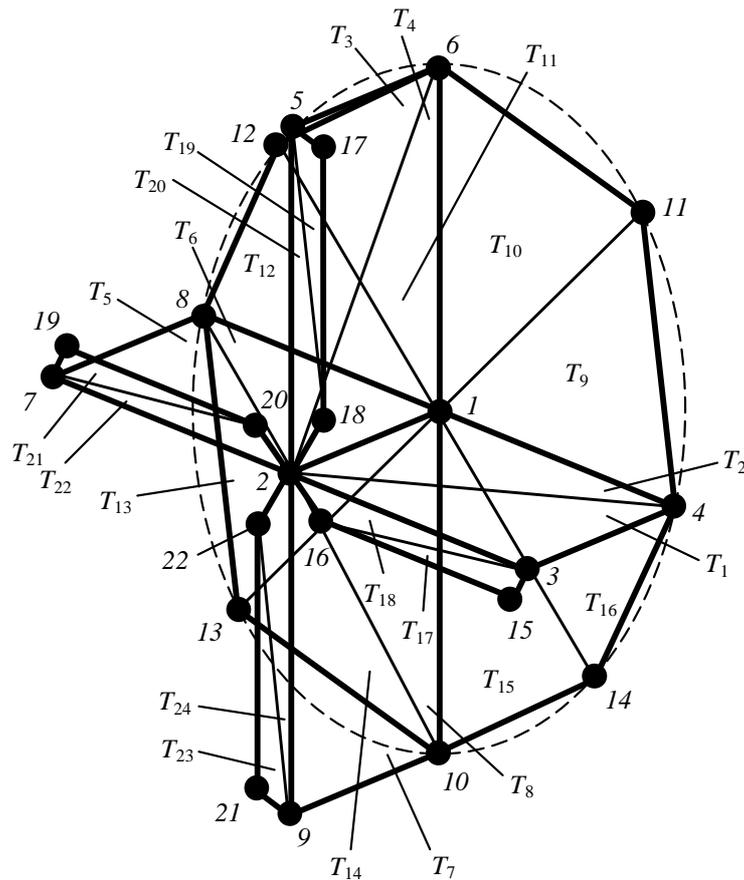


Рисунок 3 – Схема индексации базовых точек и элементарных треугольников ротора

- дополнительные базовые точки задней круговой стенки:

$$x_{9+i} = x_{\Gamma} + x_P + R_P \cos\left(\omega_P t + i \frac{\pi}{2}\right);$$

$$y_{9+i} = y_{\Gamma} + y_P - B_{\text{Л}};$$

$$(6) z_{9+i} = z_{\Gamma} + z_P + R_P \sin\left(\omega_P t + i \frac{\pi}{2}\right).$$

- базовые точки режущих кромок лопаток:

$$x_{13+2i} = x_{\Gamma} + x_P + R_{P1} \cos\left(\omega_P t + (i-1) \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} + \varphi_1\right);$$

$$y_{13+2i} = y_{\Gamma} + y_P;$$

$$z_{13+2i} = z_{\Gamma} + z_P + R_{P1} \sin\left(\omega_P t + (i-1)\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} + \varphi_1\right); \quad (7)$$

$$x_{14+2i} = x_{\Gamma} + x_P + R_{P2} \cos\left(\omega_P t + (i-1)\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} + \varphi_2\right);$$

$$y_{14+2i} = y_{\Gamma} + y_P;$$

$$z_{14+2i} = z_{\Gamma} + z_P + R_{P2} \sin\left(\omega_P t + (i-1)\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} + \varphi_2\right).$$

где $i = 1 \dots 4$ – номер лопатки; $(x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, z_{\Gamma})$ – координаты условного компоновочного центра грунтомета; x_P, y_P, z_P – смещение фрез-метателей относительно центра грунтомета; $B_{\text{л}}$ – ширина лопатки фрез-метателей; R_P – радиус фрез-метателей; ω_P – угловая скорость вращения фрез-метателей; t – время; $(R_{P1}, \varphi_1), (R_{P2}, \varphi_2)$ – полярные координаты дальней и ближней точек режущих кромок, принятые в модели равными $R_{P1} = 0,85 R_P, R_{P2} = 0,23 R_P, \varphi_1 = 15^\circ, \varphi_2 = 60^\circ$.

Рабочие поверхности фрез-метателей состоят из совокупности элементарных треугольников:

$$\begin{aligned} &T_1(P_1, P_2, P_4), T_2(P_1, P_3, P_4), T_3(P_1, P_2, P_6), T_4(P_1, P_5, P_6), \\ &T_5(P_1, P_2, P_8), T_6(P_1, P_7, P_8), T_7(P_1, P_2, P_{10}), T_8(P_1, P_9, P_{10}), \\ &T_9(P_2, P_4, P_{11}), T_{10}(P_2, P_8, P_{11}), T_{11}(P_2, P_8, P_{12}), T_{12}(P_2, P_6, P_{12}), \\ &T_{13}(P_2, P_6, P_{13}), T_{14}(P_2, P_{10}, P_{13}), T_{15}(P_2, P_4, P_{14}), T_{16}(P_2, P_{10}, P_{14}), \\ &T_{17}(P_1, P_3, P_{16}), T_{18}(P_3, P_{15}, P_{16}), T_{19}(P_1, P_5, P_{18}), T_{20}(P_5, P_{17}, P_{18}), \\ &T_{21}(P_1, P_7, P_{20}), T_{22}(P_7, P_{19}, P_{20}), T_{23}(P_1, P_9, P_{22}), T_{24}(P_9, P_{21}, P_{22}). \end{aligned} \quad (8)$$

где P_i – обозначение i -й базовой точки. Таким образом, фреза-метатель в модели состоит из 24 элементарных треугольных поверхностей, вращающихся с постоянной скоростью относительно оси.

Технологические параметры грунтомета-полосопрокладывателя задаются перед началом проведения компьютерного эксперимента, также есть возможность внесения данных физико-механических свойств почвогрунта с выводом на экран трех основных проекций агрегата с

результатом имитации процесса, отображаемого во времени и пространстве с учетом сопротивления вращению фрез-метателей (рисунок 4).

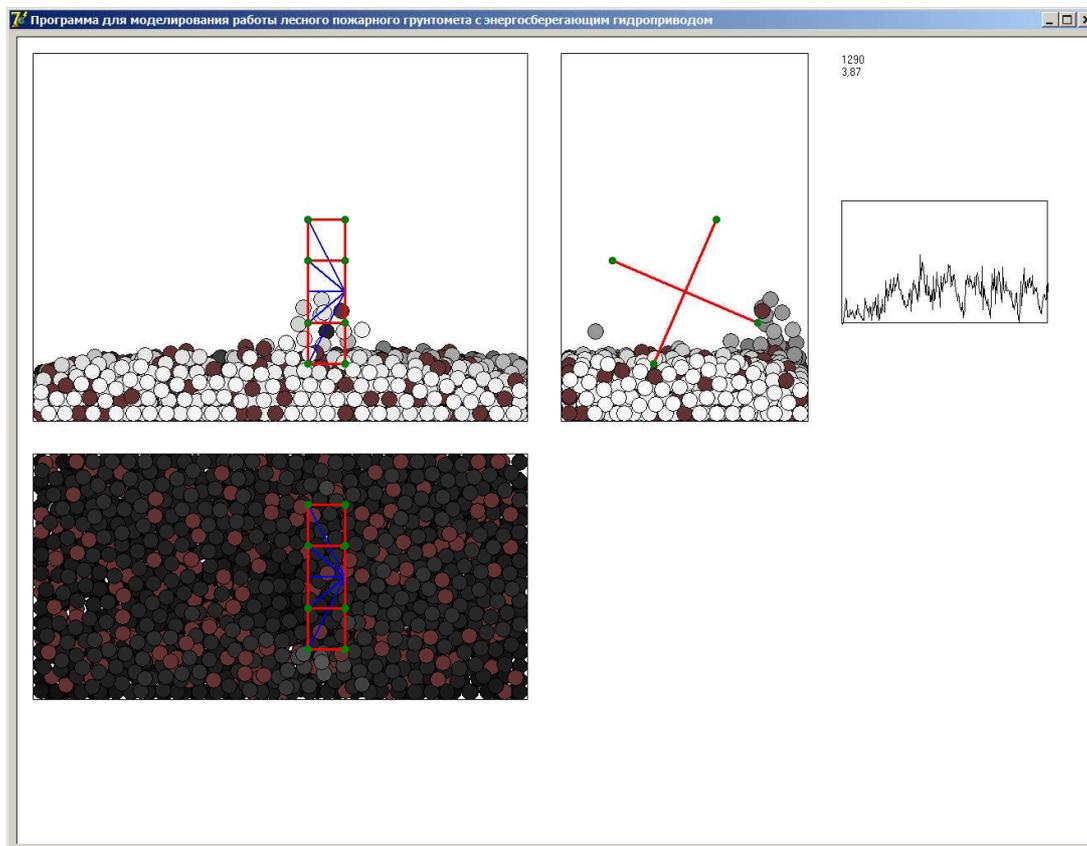


Рисунок 4 – Вывод на экран результатов моделирования в разработанной программе

Базовую часть модели составляет решение системы дифференциальных и алгебраических уравнений, которое лежит в основе компьютерной программы для моделирования процесса работы лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя. При разработке программы использовался язык программирования ObjectPascal, средой разработки выступила BorlandDelphi.

Основные технические характеристики программы:

- количество элементов грунта от 2000 до 10000;
- ориентировочное время проведения одного компьютерного

эксперимента- около 5 мин (при тактовой частоте процессора 3 ГГц).

Первые компьютерные эксперименты показали, что машина работоспособна и пригодна для тушения лесных пожаров: почвогрунт выбрасывается на среднее расстояние около 15 м; основная доля летящего почвогрунта (около 40 %) попадает в полосу шириной 0,6 м от границы машины; производительность составляет около 45 кг/с, потребляемая мощность одного рабочего органа фрезы-метателя составляет порядка 9 кВт. Фрезы-метатели установлены на уровне дна борозды и в процессе работы совмещают отрезание почвенного вала (формируют пласт стружки) почвогрунта, а также дополнительно измельчают почву из почвенного вала и отбрасывают мелкие фракции почвы из него в требуемом направлении, что значительно снижает энергозатраты и позволяет увеличить в 1,5-2 раза поступательную скорость агрегата.

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

Библиографический список

1. Пат. 2684940 РФ, МПКЕ02F 3/18 (2006.01) E02F 5/00 (2006.01) A62C 3/02 92006.01). Пожарный грунтomet-полосопрокладыватель [Текст] / И.М. Бартенев, П.И. Попиков, С.В. Малюков, С.В. Зимарин, Н.А. Шерстюков ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова». – 2018125062, 09.07.2018. – Заявл. 09.07.2018; опубл. 16.04.2019.
2. Драпалюк М.В. Математическая модель процесса подачи и выброса грунта рабочими органами комбинированной машины для тушения лесных пожаров [Текст] / Драпалюк М.В., Бартенев И.М., Гнусов М.А., Дручинин Д.Ю. и др. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 84. С. 232-246.
3. Hoover W.G. Atomistic Nonequilibrium Computer Simulations // Physica A. – 1983. – Vol. 118. – P. 111-122.
4. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. – М.: Наука, 1982. – 392 с.

5. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. – М.: Мир, 1987. – 638 с.
6. Григорьев Ю.Н., Вшивков В.А., Федорук М.П. Численное моделирование методами частиц-в-ячейках. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – 360 с.
7. Кривцов А.М., Кривцова Н.В. Метод частиц и его использование в механике деформируемого твердого тела // Дальневосточный математический журнал ДВО РАН. – 2002. – Т. 3. – № 2. – С. 254-276.
8. Español P. Hydrodynamics from Dissipative Particle Dynamics. // Phys. Rev. E. – 1995. – Vol. 52. – P. 1734–1742.
9. Jakob C., Konietzky H. Particle Methods. AnOverview. – Freiberg, 2012. – 24 p.
10. Bolintineanu D.S., Grest G.S., Lechman J.B., Pierce F., Plimpton S.J., Schunk P.R. Particle Dynamics Modeling for Colloid Suspensions // Comp. Part. Mech. – 2014. – Vol. 1. – P. 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. – P. 285-291.

References

1. Pat. 2684940 RF,MPKE02F 3/18 (2006.01) E02F 5/00 (2006.01) A62C 3/02 92006.01).Pozharnyj gruntomet-polosoprokladyvatel'[Tekst] / I.M. Bartenev, P.I. Popikov, S.V. Maljukov, S.V. Zimarin, N.A. Sherstjukov ;zajavitel' i patentoobladatel' FGBOU VO «VGLTU im. G.F. Morozova». – 2018125062, 09.07.2018. – Zajavl.09.07.2018; opubl. 16.04.2019.
2. Drapaljuk M.V. Matematicheskaja model' processa podachi i vybrosa grunta rabochimi organami kombinirovannoj mashiny dlja tushenija lesnyh pozharov [Tekst] / Drapaljuk M.V., Bartenev I.M., Gnusov M.A., Druchinin D.Ju. i dr.// Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2012. № 84. S. 232-246.
3. Hoover W.G. Atomistic Nonequilibrium Computer Simulations // Physica A. – 1983. – Vol. 118. – P. 111-122.
4. Belocerkovskij O.M., Davydov Ju.M. Metod krupnyh chastic v gazovoj dinamike. – M.: Nauka, 1982. – 392 s.
5. Hokni R., Istvud Dzh. Chislennoe modelirovanie metodom chastic. – M.: Mir, 1987. – 638 s.
6. Grigor'ev Ju.N., Vshivkov V.A., Fedoruk M.P. Chislennoe modelirovanie metodami chastic-v-jachejkah. – Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2004. – 360 s.
7. Krivcov A.M., Krivcova N.V. Metod chastic i ego ispol'zovanie v mehanike deformiruемого твердого тела // Dal'nevostochnyj matematicheskij zhurnal DVO RAN. – 2002. – Т. 3. – № 2. – С. 254-276.
8. Español P. Hydrodynamics from Dissipative Particle Dynamics. // Phys. Rev. E. – 1995. – Vol. 52. – P. 1734–1742.
9. Jakob C., Konietzky H. Particle Methods. AnOverview. – Freiberg, 2012. – 24 p.
10. Bolintineanu D.S., Grest G.S., Lechman J.B., Pierce F., Plimpton S.J., Schunk P.R. Particle Dynamics Modeling for Colloid Suspensions // Comp. Part. Mech. – 2014. – Vol. 1. – P. 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. – P. 285-291.