

УДК 630.3

DOI: 10.15393/j2.art.2017.3961

Статья

Моделирование процесса взаимодействия лесного дискового плуга с почвой при создании противопожарных полос

Пётр И. Попиков¹, Денис Ю. Дручинин^{1*}, Владимир Н. Коротких¹, Сергей В. Зимарин¹, Никита А. Шерстюков¹ и Дмитрий С. Ступников¹

¹ Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8; E-Mails: popikovpetr@yandex.ru (П. П.), druchinin.denis@rambler.ru (Д. Д.), kafedramehaniza@mail.ru (В. К.), sezimarin@yandex.ru (С. З.), nikita.sherstyukov@gmail.com (Н. Ш.), neiti1992@mail.ru (Д. С.)

* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: druchinin.denis@rambler.ru (Д. Д.); Tel.: +7(473)2537251.

Получена: 10 ноября 2017 / Принята: 27 ноября 2017 / Опубликовано: 29 декабря 2017

Аннотация: Представлена математическая модель процесса взаимодействия лесного дискового плуга с почвенной средой при создании противопожарных минерализованных полос. Установлено, что при использовании дисковых орудий при обработке почвы наблюдается неудовлетворительное качество оборота почвенного пласта. Устранение отмеченного недостатка достигается при оснащении сферических дисков дополнительными отвалами лемешного типа. Приводится методика составления уравнения плоскости, моделирующей отвал лемешного типа. Разработан алгоритм прореживания для равномерного распределения шарообразных элементов. Проведение численного эксперимента на базе предложенной математической модели осуществлено с использованием разработанной компьютерной программы. В ходе численного эксперимента учитывалось, что дисковый рабочий орган с заданными параметрами движется поступательно на определённое расстояние, при этом оцениваются конфигурация оставляемой борозды и основные параметры, характеризующие качество обработки почвы и энергоёмкость процесса.

Ключевые слова: дисковый плуг; минерализованная полоса; почвенная среда; дисковый рабочий орган; моделирование; метод конечных элементов; сферическая частица.

DOI: 10.15393/j2.art.2017.3961

Article

Simulation of a forest disk plow soil interaction process during fire breaks development

Petr Popikov¹, Denis Druchinin^{1,*}, Vladimir Korotkikh¹, Sergey Zimarin¹,
Nikita Sherstyukov¹ and Dmitriy Stupnikov¹

¹ Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Voronezh, Timiryazeva str., 8; E-Mails: popikovpetr@yandex.ru (P. P.), druchinin.denis@rambler.ru (D. D.), kafedramehaniza@mail.ru (V. K.), sezimarin@yandex.ru (S. Z.), nikita.sherstyukov@gmail.com (N. Sh.), neiti1992@mail (D. S.)

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: druchinin.denis@rambler.ru (D.D.);
Tel.: +7(473)2537251.

Received: 10 November 2017 / Accepted: 27 November 2017 / Published: 29 December 2017

Abstract: A mathematical technique is developed to describe the interaction process between a forest disk plow and soil medium when fire mineralized breaks are developed. Disk plowing provides insufficient quality of a furrow slice rotation therefore it is recommended to equip spherical disks with additional breasts of a plow-bottom type. To determine the optimal parameters of the developed design, the interaction of the working organ with the soil medium is simulated using the finite element method, where the soil and the spherical disk are represented as a set of a large number of separate spherical elements interacting in a certain way. The authors describe the technique of composing the equation of plane to simulate the operation of a plow-bottom breast. A special singling algorithm is used for uniform distribution of spherical elements, when the number of initially created points is larger than required, and the points located in dense areas are eventually removed. A computer program was developed to implement the mathematical model in the form of a system of differential equations and to conduct theoretical experiments. In the course of the computer experiment the disc with the fixed parameters moved linearly for a certain distance and the configuration of the developed furrow and the quality of soil cultivation and the energy capacity of the process were evaluated.

Keywords: disc plow, fire line, soil medium, disc working organ, simulation, finite element method, spherical element.

1. Введение

Плуги с дисковыми рабочими органами широко применяются в лесном хозяйстве для прокладки противопожарных минерализованных полос (рисунок 1). Сферические диски при контакте с почвой совершают сложное движение — поступательное вместе с орудием и вращательное вокруг своей оси. Это позволяет им при работе в лесных условиях преодолевать различные препятствия — перекатываться через них, что повышает надёжность и проходимость плуга. В то же время данные орудия не обеспечивают надлежащий оборот пласта почвы. Для устранения обозначенного недостатка учёными рекомендуется оснащение дисков плуга дополнительными отвалами лемешного типа [1], [2].



Рисунок 1. Дисковые плуги: *а* — ПД-0,7; *б* — ПДП-1,2

2. Материалы и методы

Для определения оптимальных значений конструктивных и технологических параметров рабочих органов дискового плуга с установленной на них дополнительной отвальной поверхностью лемешного типа необходимо разработать математическую модель процесса взаимодействия сферического диска, оснащённого отвалом, с почвенной средой.

Рабочий орган дискового плуга при моделировании представлен в виде сегментного участка сферической поверхности (диск) и участка плоскости (отвал) (рисунок 2*а*). Несмотря на данное упрощение, плоскость отвала, состыкованная со сферической поверхностью диска, даёт некоторое подобие винтовой поверхности. Моделирование целесообразно производить на основе метода конечных элементов, при котором почвенная среда и рабочие поверхности орудия представляются в виде совокупности большого числа отдельных элементов шарообразной формы, определённым образом взаимодействующих между собой [3—11].

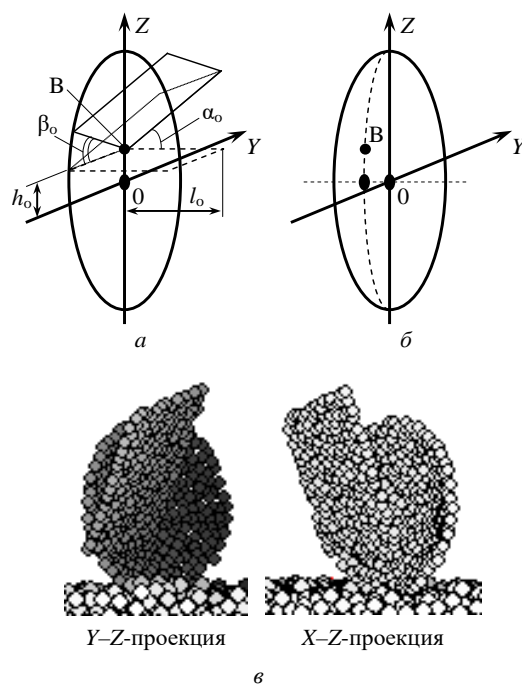


Рисунок 2. Дисковый плуг с отвалом в модели: *a* — параметры, задающие положение отвала (для простоты сферический диск представлен плоским); *б* — реальное положение точки *B* на сферическом диске; *в* — изображение диска с отвалом на экране компьютера

3. Результаты

Размещение шарообразных элементов по поверхностям модельного рабочего органа производится методом Монте-Карло. Для создания точек (центров шаров), лежащих на поверхности $F(x, y, z) = 0$, случайным образом генерируются точки (x_i, y_i, z_i) в объёме куба, полностью включающего диск, размером $1 \times 1 \times 1 \text{ м}^3$ с центром в точке *O* (рисунок 2*в*). В этом случае целесообразно использовать генератор случайных чисел с равномерным распределением вероятности. В дальнейшем для каждой точки производится проверка: находится ли точка вблизи поверхности, то есть выполняется ли условие $|F(x, y, z)| < \varepsilon$. При моделировании использовалось значение $\varepsilon = 0,2 \text{ мм}$.

Для сферического диска проверка попадания точки на поверхность выполняется по следующему двойному условию (рисунок 3):

$$\begin{cases} |r_i - R_D| < \varepsilon; \\ x_i < d_D. \end{cases}, \quad (1)$$

где r_i — расстояние точки от центра *C* сферы; R_D — радиус сферичности диска; d_D — глубина диска.

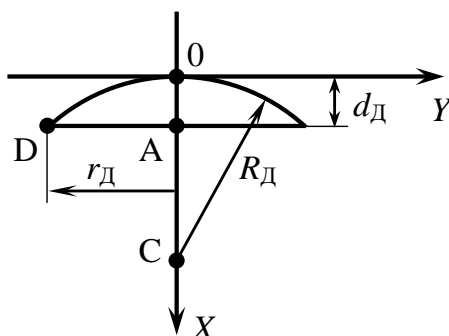


Рисунок 3. Расчётная схема для дискового плуга

Расстояние r_i определяется по формуле

$$r_i = \sqrt{(x_i - R_D)^2 + y_i^2 + z_i^2}. \quad (2)$$

Для определения радиуса R_D по известным d_D и r_D (радиус диска) в прямоугольном треугольнике ACD (рисунок 3) можно отметить, что стороны связаны теоремой Пифагора:

$$R_D^2 = (R_D - d_D)^2 + r_D^2 \text{ откуда } R_D = \frac{d_D}{2} + \frac{r_D^2}{2d_D} \quad (3)$$

Точка B соединения отвала со сферическим диском располагается на линии, получающейся при пересечении сферического диска вертикальной плоскостью, включающей ось диска (рисунок 2б). Координаты точки B следующие:

$$x_B = R_D - \sqrt{R_D^2 - h_o^2}, \quad y_B = 0, \quad z_B = h_o. \quad (4)$$

Распределение шарообразных конечных элементов по поверхности отвала производится с использованием следующего условия принадлежности:

$$\begin{cases} y_i > -r_D; \\ y_i < 0; \\ x_i < l_D; \\ \sqrt{(x_i - R_D)^2 + y_i^2 + z_i^2} < (R_D - \gamma) \text{ или } x_i > d_D. \end{cases} \quad (5)$$

где γ — зазор между диском и отвалом.

При математическом описании плоскости отвала только две координаты пробной точки (x_i и y_i) генерируются случайным образом, а третья координата находится из условия принадлежности точки к плоскости отвала. Уравнение плоскости, моделирующей отвал, составляется по известной из аналитической геометрии формуле:

$$\begin{vmatrix} x - x_B & y - y_B & z - z_B \\ x_E - x_B & y_E - y_B & z_E - z_B \\ x_F - x_B & y_F - y_B & z_F - z_B \end{vmatrix} = 0 \quad (6)$$

где x_E, y_E, z_E и x_F, y_F, z_F — координаты вспомогательных точек E и F .

Точки E и F служат для того, чтобы отклонить плоскость отвала на углы α_o и β_o соответственно. Для упрощения дальнейшего расчёта точки выбираются так, чтобы их удаление от точки B составляло 1 м, а точка F лежала в декартовой плоскости XOZ :

$$\begin{aligned} x_E &= x_B; & y_E &= -\cos(\beta_o); & z_E &= -\sin(\beta_o); \\ x_F &= \cos(\alpha_o); & y_F &= y_B = 0; & z_F &= \sin(\alpha_o). \end{aligned} \quad (7)$$

При раскрытии определителя и подстановки выражений для координат точек B, E и F получается уравнение плоскости отвала в канонической форме:

$$\begin{aligned} A_o x + B_o y + C_o z + D_o &= 0, \text{ где } A_o = -\cos \beta_o (\sin \alpha_o - h_o); \\ B_o &= (\sin \beta_o + h_o) \cdot \left(R_D - \sqrt{R_D^2 - h_o^2} - \cos \alpha_o \right) \\ C_o &= \cos \beta_o \cdot \left(\cos \alpha_o - R_D + \sqrt{R_D^2 - h_o^2} \right); \\ D_o &= -A_o \left(R_D - \sqrt{R_D^2 - h_o^2} \right) - C_o h_o. \end{aligned} \quad (8)$$

В процессе генерации i -го шара отвала координата z_i определяется по известным x_i и y_i из уравнения (8) следующим образом:

$$z_i = -\frac{A_o x_i + B_o y_i + D_o}{C_o} \quad (9)$$

При выполнении случайной генерации на поверхностях рабочего органа точки будут располагаться на различных участках хаотически — на некоторых из них может быть скопление шаров, а на других участках — разрежение.

Для равномерного распределения шаров применяется специальный алгоритм прореживания, при котором первоначально создаётся количество точек, в 3...4 раза большее необходимого, а затем убираются точки, располагающиеся в плотных участках.

Создаваемая таким образом поверхностная плотность точек достаточна для моделирования поверхности диска в виде сплошного тела с малой ребристостью. Совокупность точек (x_i, y_i, z_i) , представляющая диск, сохраняется и используется при проведении компьютерных экспериментов. Описанный данным способом рабочий орган задаётся в системе координат, привязанной к центру диска (точка O). В общей модели процесса учитывается поступательное и вращательное движение диска, для этого производится пересчёт координат.

Во-первых, при реализации разработанной модели на ЭВМ в виде компьютерного эксперимента производится учёт вращения диска вокруг оси OX на каждом шаге интегрирования:

$$\begin{aligned}x_i^{(1)} &= x_i; \\y_i^{(1)} &= \sqrt{y_i^2 + z_i^2} \cos\left(\omega t + \text{Arctg} \frac{z_i}{y_i}\right); \\z_i^{(1)} &= \sqrt{y_i^2 + z_i^2} \sin\left(\omega t + \text{Arctg} \frac{z_i}{y_i}\right),\end{aligned}\tag{10}$$

где $x_i^{(1)}, y_i^{(1)}, z_i^{(1)}$ — координаты точек вращающегося диска в системе координат, связанной с центром диска (точка O); ω — угловая скорость вращательного движения диска; t — время начала компьютерного эксперимента.

Во-вторых, учитывается установка диска под углом атаки α к направлению движения агрегата и под углом наклона диска β по отношению к поверхности почвы. Поворот диска на угол α производится в процессе следующего пересчёта координат:

$$\begin{aligned}x_i^{(2)} &= \sqrt{(x_i^{(1)})^2 + (y_i^{(1)})^2} \cos\left(\alpha + \text{Arctg} \frac{y_i^{(1)}}{x_i^{(1)}}\right); \\y_i^{(2)} &= \sqrt{(x_i^{(1)})^2 + (y_i^{(1)})^2} \sin\left(\alpha + \text{Arctg} \frac{y_i^{(1)}}{x_i^{(1)}}\right); \\z_i^{(2)} &= z_i^{(1)}.\end{aligned}\tag{11}$$

Затем производится поворот плуга на угол β :

$$\begin{aligned}
 x_i^{(3)} &= \sqrt{(x_i^{(2)})^2 + (z_i^{(2)})^2} \cos\left(\beta + \text{Arctg} \frac{z_i^{(2)}}{x_i^{(2)}}\right); \\
 y_i^{(3)} &= y_i^{(2)}; \\
 z_i^{(3)} &= \sqrt{(x_i^{(2)})^2 + (z_i^{(2)})^2} \sin\left(\beta + \text{Arctg} \frac{z_i^{(2)}}{x_i^{(2)}}\right).
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

В процедуре поворота плуга участвуют уже как точки диска, так и точки отвала.

Затем производится перерасчёт координат диска в системе координат, связанной с почвенной средой. При этом учитывается, что диск находится на высоте, при которой обеспечивается глубина обработки a , и перемещается с постоянной скоростью v вдоль оси OY :

$$\begin{aligned}
 x_i^{(4)} &= x_i^{(3)} + s_x; \\
 y_i^{(4)} &= y_i^{(3)} + s_y + v \cdot t; \\
 z_i^{(4)} &= z_i^{(3)} - z_{\min} + s_z - a + d_{\text{ш}} / 2,
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

где s_x — положение диска по ширине почвенного канала; s_y — расстояние от диска до края почвенного канала при $t=0$; s_z — толщина слоя почвы (расстояние от дна модельного параллелепипеда до поверхности почвы); z_{\min} — минимальная координата z_i среди точек плуга.

В модели задано, что шарообразные элементы диска взаимодействуют с частицами почвы вязкоупруго, также как и почвенные шары между собой. Жёсткость взаимодействия элементов сферического диска и почвы $c_{\text{П}}$ имеет большее значение, т. к. материал диска (сталь), а коэффициент демпфирования $k_{\text{П}}$ менее важен из-за лучшего скольжения почвы по стали.

В рамках моделирования производится решение уравнений движения почвенных частиц, при добавлении в которые математического описания взаимодействия почвенных элементов с рабочим органом получается следующая система уравнений:

$$\begin{aligned}
 m_{\text{ш}} \frac{d^2 x_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{\text{ш}}} (F_{xij}^Y + F_{xij}^B) + \sum_{j=1}^{N_{\text{шш}}} F_{xij}^{\text{ВВП}}; \\
 m_{\text{ш}} \frac{d^2 y_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{\text{ш}}} (F_{yij}^Y + F_{yij}^B) + \sum_{j=1}^{N_{\text{шш}}} F_{yij}^{\text{ВВП}}; \\
 m_{\text{ш}} \frac{d^2 z_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{\text{ш}}} (F_{zij}^Y + F_{zij}^B) + \sum_{j=1}^{N_{\text{шш}}} F_{zij}^{\text{ВВП}} - m_{\text{ш}} g,
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

где $N_{шп}$ — количество шаров в модели диска.

Силы $F^{ВУП}$ вязкоупругого взаимодействия почвенных шаров с элементами диска задаются в следующем виде:

$$\begin{aligned} F_{xij}^{ВУП} &= c_{\Pi} \left(\frac{d_{ш} + d_{\Pi}}{2} - r_{ij} \right) (x_i - x_j) / r_{ij} + k_{\Pi} \left(r_{ij} - \frac{d_{ш} + d_{\Pi}}{2} \right) (v_{xi} - v_{xj}); \\ F_{yij}^{ВУП} &= c_{\Pi} \left(\frac{d_{ш} + d_{\Pi}}{2} - r_{ij} \right) (y_i - y_j) / r_{ij} + k_{\Pi} \left(r_{ij} - \frac{d_{ш} + d_{\Pi}}{2} \right) (v_{yi} - v_{yj}); \\ F_{zij}^{ВУП} &= c_{\Pi} \left(\frac{d_{ш} + d_{\Pi}}{2} - r_{ij} \right) (z_i - z_j) / r_{ij} + k_{\Pi} \left(r_{ij} - \frac{d_{ш} + d_{\Pi}}{2} \right) (v_{zi} - v_{zj}), \end{aligned} \quad (15)$$

где $N_{шп}$ — количество шаров в модели диска.

Эти силы вычисляются только при выполнении условия $r_{ij} < (d_{ш} + d_{\Pi}) / 2$, в противном случае сферические элементы между собой не взаимодействуют и вязкоупругие силы равны нулю.

Уравнения (14) вместе с начальными условиями $x_i(t=0)$, $y_i(t=0)$, $z_i(t=0)$, $v_{xi}(t=0)$, $v_{yi}(t=0)$, $v_{zi}(t=0)$ представляют собой задачу Коши для шести $N_{шп}$ обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, решение которой осуществлялось модифицированным методом Эйлера. Координаты шара определялись по следующим формулам:

— составляющие скорости v_{xi} :

$$\begin{aligned} x_i^{k+1} &= x_i^k + v_{xi}^k \cdot \Delta t + \frac{a_{xi}^k \cdot (\Delta t)^2}{2}; \\ y_i^{k+1} &= y_i^k + v_{yi}^k \cdot \Delta t + \frac{a_{yi}^k \cdot (\Delta t)^2}{2}; \\ z_i^{k+1} &= z_i^k + v_{zi}^k \cdot \Delta t + \frac{a_{zi}^k \cdot (\Delta t)^2}{2}, \end{aligned} \quad (16)$$

где (x_i^k, y_i^k, z_i^k) — координаты центра шара i в момент времени t_k ; $(x_i^{k+1}, y_i^{k+1}, z_i^{k+1})$ — координаты центра шара i в момент времени $t_{k+1} = t_k + \Delta t$; $v_{xi}^k, v_{yi}^k, v_{zi}^k$ — декартовы составляющие скорости шара i в момент времени t_k ; $a_{xi}^k = \left(\frac{d^2 x_i}{dt^2} \right)_{t=t_k}$, $a_{yi}^k = \left(\frac{d^2 y_i}{dt^2} \right)_{t=t_k}$,

$a_{zi}^k = \left(\frac{d^2 z_i}{dt^2} \right)_{t=t_k}$ — декартовы составляющие ускорения шара i в момент времени t_k ,

рассчитываемые из (14); Δt — шаг интегрирования (элементарный отрезок времени).

При этом составляющие скорости v_{xi}^{k+1} , v_{yi}^{k+1} , v_{zi}^{k+1} на следующем шаге интегрирования рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned}v_{xi}^{k+1} &= v_{xi}^k + \frac{a_{xi}^k + a_{xi}^{k+1}}{2} \cdot \Delta t ; \\v_{yi}^{k+1} &= v_{yi}^k + \frac{a_{yi}^k + a_{yi}^{k+1}}{2} \cdot \Delta t ; \\v_{zi}^{k+1} &= v_{zi}^k + \frac{a_{zi}^k + a_{zi}^{k+1}}{2} \cdot \Delta t .\end{aligned}\tag{17}$$

В процессе решения данной системы основной объём вычислений составляет определение сил взаимодействия между сферическими элементами F_{ij} .

Так как силы действуют только между соседними шарами, можно определить только n соседних шаров для каждого элемента, при этом количество расчётов сокращается. При определении соседних элементов целесообразно применять алгоритм разбивки рассматриваемого объёма почвы на множество кубов путём использования кубической сетки. В этом случае шар из некоторого куба имеет взаимодействие только со сферическими частицами из соседних кубов.

Для реализации математической модели и проведения теоретических экспериментов разработана компьютерная программа на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7.0.

Функциональные возможности программы:

— подготовка модели почвы в рамках расположения вязкоупруго взаимодействующих шарообразных почвенных частиц;

— подготовка модели дискового рабочего органа в виде совокупности точек, задающих его форму;

— проведение компьютерного эксперимента для исследования взаимодействия сферического диска, оснащённого дополнительным отвалом, с почвой;

— непрерывное отслеживание в процессе компьютерного эксперимента трёх проекций создаваемой плугом борозды для визуального анализа изменения её профиля, а также основных параметров эксперимента.

Основные ограничения программы:

— количество шарообразных почвенных частиц: от 500 до 8000;

— диаметр шарообразных почвенных частиц: от 3 до 10 см;

— количество точек, задающих форму сферического диска: от 70 до 500;

— скорость движения плуга: 0,1...2 м/с.

Программа может работать в трёх режимах:

1) «Подготовка почвы». По заданным параметрам программа подготавливает исходную конфигурацию почвы для проведения компьютерного эксперимента.

2) «Подготовка плуга». По заданным параметрам программа подготавливает модель дискового рабочего органа.

3) «Компьютерный эксперимент». По заданным параметрам программа производит моделирование взаимодействия сферического диска с почвой.

Компьютерный эксперимент с моделью заключается в том, что рабочий орган с заданными параметрами движется поступательно на заданное расстояние с заданной скоростью, при этом фиксируются конфигурация оставляемой борозды и основные параметры, характеризующие качество обработки почвы и энергоёмкость процесса. Расстояние, которое должен пройти диск для получения статистически значимых результатов, определяется размером сферических элементов, а также размером и формой фрагментов почвы, отделяемых и отваливаемых рабочим органом.

Входными параметрами модели при проведении компьютерного эксперимента являются:

— Параметры почвы:

$N_{Ш}$ — количество шарообразных элементов в модели почвы;

$d_{Ш}$ — диаметр элементов почвы;

$m_{Ш}$ — масса одной частицы;

$d_{М}$ — расстояние притяжения;

$c_{С}$ — жёсткость взаимодействия склеенных элементов;

$c_{Р}$ — жёсткость взаимодействия несклеенных элементов;

$k_{В}$ — коэффициент демпфирования при взаимодействии элементов.

— Параметры рабочего органа:

$N_{ШП}$ — количество шарообразных элементов в модели рабочего органа;

$d_{П}$ — диаметр элементов, составляющих сферический диск;

$k_{П}$ — коэффициент демпфирования при взаимодействии шарообразных элементов диска с частицами почвы;

r_{D} — радиус диска;

d_{D} — прогиб диска;

α — угол атаки диска;

β — угол наклона диска;

h_o — высота установки отвала;

α_o — поперечный угол установки отвала;

β_o — продольный угол установки отвала;

l_o — ширина отвала.

— Параметры компьютерного эксперимента:

a — глубина обработки;

v — скорость агрегата;

ω — угловая скорость вращения диска плуга.

Выходные характеристики, которые выводятся на экран компьютера по окончании эксперимента, на основе оценки которых определяется эффективность работы сферического диска с дополнительно установленным отвалом (рисунок 4):

- внешний вид борозды, оставленной плугом в почве (три проекции);
- поперечный профиль борозды;
- траектории движения частиц почвы;

d — поперечное смещение пласта;

r — коэффициент оборачиваемости пласта;

N_{II} — мощность поступательного движения плуга;

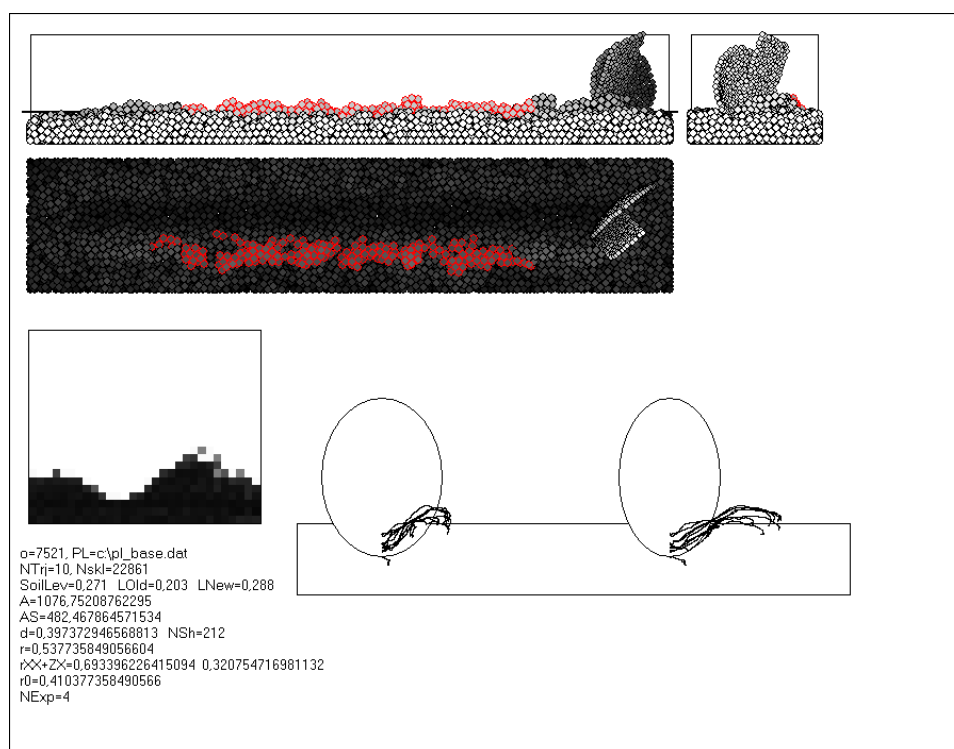


Рисунок 4. Выводимое на экран компьютера изображение борозды при проведении компьютерного эксперимента

Для расчета d и r при проведении компьютерного эксперимента запоминаются шары, сместившиеся более, чем на 5 см. При этом к учёту принимаются только шары, первоначально находящиеся в диапазоне $1,3 \text{ м} < y_i < 4,7 \text{ м}$. Смещение пласта d рассчитывается как средняя разность положения (вдоль оси OX) «смещённых» шаров после смещения x_{ik} и до смещения x_{in} :

$$d = \frac{\sum_{i=1}^{N_{см}} (x_{ik} - x_{in})}{N_{см}}, \quad (18)$$

где $N_{см}$ — количество «смещённых» шаров.

Коэффициент оборачиваемости пласта r близок по смыслу к коэффициенту качества оборота пласта, который представлял собой процент полностью обёрнутых частиц. В данном случае коэффициент r рассчитывается другим способом. «Смещённые» шары делятся на «верхние» и «нижние», для чего подбирается такой горизонтальный уровень, который делит количество $N_{см}$ «смещённых» шаров на «верхние» и «нижние» поровну. Затем таким же образом «смещённые» шары делятся на «верхние» и «нижние» до смещения — по исходной модели почвенной среды. Затем подсчитывается количество $N_{в \rightarrow н}$ шаров, изменивших своё состояние с «верхнего» на «нижнее», и количество шаров, изменивших своё состояние с «нижнего» на «верхнее» $N_{н \rightarrow в}$. Затем, рассчитывается коэффициент оборачиваемости:

$$r = \frac{N_{в \rightarrow н} + N_{н \rightarrow в}}{N_{см}}. \quad (19)$$

4. Заключение

Представленная методика математического описания процесса взаимодействия лесного дискового плуга, оснащённого дополнительным отвалом лемешного типа, с почвенной средой при создании противопожарных минерализованных полос может быть рекомендована к использованию в рамках моделирования работы лесохозяйственных и сельскохозяйственных почвообрабатывающих агрегатов или сходных по технологическому процессу машин, рабочие органы которых при работе контактируют с почвой.

Список литературы

1. Зимарин, С. В. Дисковый корпус плуга с гиперболоидным отвалом / С. В. Зимарин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. — 2015. — Т. 3, № 2—1 (13—1). — С. 47—49.
2. Лягоскин, М. А. Особенности выполнения основной обработки почвы на вырубках / М. А. Лягоскин, Н. В. Алиев, Д. Ю. Дручинин // Молодой учёный. — 2017. — № 14 (148). — С. 92—96.
3. Попиков, П. И. Методика моделирования лесной почвы при взаимодействии с рабочими органами лесохозяйственных машин / П. И. Попиков, Д. Ю. Дручинин, Н. А. Шерстюков // Resources and Technology. — Петрозаводск, 2017. — № 14 (3). — С. 1—12.
4. Бахтин, А. А. Моделирование на ЭВМ процесса взаимодействия дискового ротационного окучника с почвой / А. А. Бахтин // Совершенствование технологических процессов

и рабочих органов в растениеводстве и животноводстве : сб. науч. тр. — Санкт-Петербург, 1993. — С. 9—14.

5. *Коротких, В. Н.* Имитационное моделирование технологического процесса лесной машины с гидроприводом дискового рабочего органа / В. Н. Коротких, В. П. Попиков, М. В. Драпалюк // Вестник КрасГАУ. — 2009. — № 5. — С. 129—132.
6. *Советов, Б. Я.* Моделирование систем / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. — Москва : Высш. шк., 1998. — 319 с.
7. Моделирование сельскохозяйственных агрегатов и их систем управления / под ред. А. Б. Лурье. — Ленинград : Колос. Ленингр. отд-ние, 1979. — 312 с.
8. *Ranjbar, I.* Modeling of double action disc harrow draft force based on tillage depth and forward speed / I. Ranjbar, M. Rashidi, H. F. Lehmalı, M. Mirmoradi, E. Abdolalizadeh // Middle east journal of scientific research. — 2013. — Vol. 17, № 8. — P. 1061—1067.
9. *Karmakar, S.* Simulation of soil deformation around a tillage tool using computational fluid dynamics / S. Karmakar, R. L. Kushwaha // Transactions of the ASAE. — 2005. — Vol. 48, № 3. — P. 923—932.
10. *Olatunji, O. M.* Modeling the effect of weight and forward speed on the performance of disc plough / O. M. Olatunji, A. J. Akor, B. A. Ozogu, W. Burubai, R. M. Davies // Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry. — 2009. — Vol. 8, № 2. — P. 130—149.
11. *Sharifat, K.* Modeling soil movement by tillage tools / K. Sharifat // Canadian Biosystems Engineering. — 2000. — Vol. 42, № 4. — P. 165—172.

References

1. *Zimarin, S. V.* 2015. The disc plough body with a hyperboloidal dump. Relevant directions of scientific research of the 21st century: theory and practice / S. V. Zimarin. — 2015. — Т. 3, № 2—1 (13—1). — P. 47—49.
2. *Lyagoskin, M. A.* Particularities of basic soil cultivation on cutting-down / M. A. Lyagoskin, N. V. Aliev, D. U. Druchinin // Young scientist. — 2017. — № 14 (148). — P. 92—96.
3. *Popikov, P. I.* Methods of modeling forest soil in interaction with the attachments of forest machinery / P. I. Popikov, D. Yu. Druchinin, N. A. Sherstyukov // Resources and Technology. — 2017. — № 14 (3). — P. 1—12.
4. *Bakhtin, A. A.* 1993. Modeling on the COMPUTER of a disk rotational butting plow interaction process with the soil / A. A. Bakhtin // Improvement of technological processes and attachments in crop production and livestock production: collection of scientific works : sb. nauch. tr. — Sankt-Peterburg, 1993. — P. 9—14.
5. *Korotkikh, V. N.* Simulation of technological process of forest machines with hydraulic drive disk attachment / V. N. Korotkikh, V. P. Popikov, M. V. Drapalyuk // Vestnik Krasnoyarsk state agrarian university. — 2009. — № 5. — P. 129—132.
6. *Sovetov, B. Y.* Modeling of systems / B. Y. Sovetov, S. A. Yakovlev. — Moskva : Vyssh. wk., 1998. — 319 p.
7. *Lurie, A. B.* Modeling of agricultural units and their control systems / A. B. Lurie. — Ленинград : Kolos. Leningr. otd-nie, 1979. — 312 p.
8. *Ranjbar, I.* Modeling of double action disc harrow draft force based on tillage depth and forward speed / I. Ranjbar, M. Rashidi, H. F. Lehmalı, M. Mirmoradi, E. Abdolalizadeh // Middle east journal of scientific research. — 2013. — Т. 17, № 8. — P. 1061—1067.

9. *Karmakar, S.* Simulation of soil deformation around a tillage tool using computational fluid dynamics / S. Karmakar, R. L. Kushwaha // Transactions of the ASAE. — 2005. — Vol. 48, № 3. — P. 923—932.
10. *Olatunji, O. M.* Modeling the effect of weight and forward speed on the performance of disc plough / O. M. Olatunji, A. J. Akor, B. A. Ozogu, W. Burubai, R. M. Davies // Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry. — 2009. — Vol. 8, № 2. — P. 130—149.
11. *Sharifat, K.* Modeling soil movement by tillage tools / K. Sharifat // Canadian Biosystems Engineering. — 2000. — Vol. 42, № 4: — P. 165—172.

© Попиков П. И., Дручинин Д. Ю., Коротких В. Н., Зимарин С. В., Шерстюков Н. А.,
Ступников Д. С., 2017