

УДК 630\*4

UDC 630\*4

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПОДАЧИ И ВЫБРОСА ГРУНТА РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ КОМБИНИРОВАННОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ**

**MATHEMATICAL MODEL OF GIVING AND SOIL EMISSION PROCESS WITH THE WORKING TOOLS OF THE COMBINED MACHINE FOR FOREST FIRES SUPPRESSION**

Драпалюк Михаил Валентинович  
д.т.н., профессор

Drapalyuk Mikhail Valentinovich  
Dr.Sci.Tech., professor

Бартенев Иван Михайлович  
д.т.н., профессор

Bartenev Ivan Mikhaylovich  
Dr.Sci.Tech., professor

Гнусов Максим Александрович  
аспирант

Gnusov Maksim Aleksandrovich  
postgraduate student

Дручинин Денис Юрьевич  
ассистент  
*Воронежская государственная лесотехническая академия, Воронеж, Россия*

Druchinin Denis Yurievich  
assistant  
*Voronezh State Forestry Academy, Voronezh, Russia*

Марков Олег Борисович  
к.т.н., доцент  
*Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия*

Markov Oleg Borisovich  
Cand.Tech.Sci., associate professor  
*Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia*

Клубничкин Евгений Евгеньевич  
к.т.н., доцент  
*Московский государственный университет леса, Мытищи, Россия*

Klubnichkin Evgeniy Evgeniyevich  
Cand.Tech.Sci., associate professor  
*Moscow State Forest University, Mytishi, Russia*

Разработана математическая модель процесса подачи и выброса грунта рабочими органами комбинированного грунтомета для оптимизации различных параметров разработанного агрегата

The mathematical model of the process of giving and soil emission with the working tools of a combined soil-thrower is developed for optimization of various parameters of the developed assembly

Ключевые слова: ЛЕСНОЙ ПОЖАР, ГРУНТОМЕТ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ГРУНТ, РАБОЧИЕ ОРГАНЫ

Keywords: FOREST FIRE, SOIL-THROWER, MATHEMATICAL MODEL, SOIL, WORKING TOOL

**Введение.** Лесные пожары – одна из наиболее острых проблем сохранения лесов России. Они наносят серьезный ущерб лесному хозяйству Российской Федерации. В настоящее время в практике активное тушение лесных пожаров осуществляется водой и огнегасящими химикатами, однако применение данных способов тушения лесных пожаров не всегда возможно в специфических лесных условиях. Применяется и пассивный способ тушения, а именно: создание на пути движения кромки пожара минерализованных или заградительных полос и пуск от них встречного низового огня.

Использование грунта для непосредственной борьбы с лесными пожарами представляет большую перспективу. Для этого созданы специальные машины для тушения лесных пожаров – грунтометы. В Воронежской государственной лесотехнической академии разработана перспективная конструкция комбинированной машины для тушения лесных пожаров, способной применяться также и для прокладки минерализованных полос.

**Постановка и решение задачи.** Для теоретического исследования функционирования грунтомета необходима математическая модель, всесторонне описывающая происходящие явления: движение рабочих поверхностей машины, взаимодействие поверхностей машины с грунтом, движение грунта в пространстве.

Лесная почва является сложным для моделирования объектом, ввиду своего типологического разнообразия и большого количества физико-математических параметров (тип почвы, ее твердость, влажность, плотность, рельеф поверхности) [1, 2]. В то же время движение потоков почвы лежит в основе принципа работы грунтомета, поэтому модель почвы должна быть максимально близкой к реальности. Для моделирования почвы используется метод конечных элементов [3, 4]. В рамках метода почва представляется совокупностью большого количества шарообразных элементов малого размера, способных взаимодействовать как между собой, так и с рабочими поверхностями машины (с роторами и дисками). С геометрической точки зрения взаимодействие рабочей поверхности с почвой представляет собой задачу о нахождении расстояния  $r_b$  от некоторой поверхности до сферической поверхности произвольного шарового элемента почвы. При этом вязкоупругая сила  $\overset{\mathbf{I}}{F}$ , действующая на элемент почвы, определяется по формуле

$$\overset{\mathbf{I}}{F} = c \cdot r_g \cdot \overset{\mathbf{r}}{n} - k\overset{\mathbf{r}}{v}, \quad (1)$$

где  $\dot{n}$  и  $\dot{v}$  – направление и скорость взаимодействия шарового элемента и рабочей поверхности;  $c$  и  $k$  – коэффициенты жесткости и вязкости взаимодействия.

Наибольшую сложность в данной модели представляет расчет сил, действующих со стороны рабочей поверхности на элементы почвы и приводящих к эволюции почвенной системы. Кроме того производится обратный расчет: суммарной силы со стороны почвенных элементов на рабочие поверхности, оказывающих сопротивление их движению. Состояние каждого элемента почвы  $i$  определяется шестью переменными: координатами его центра ( $x_i, y_i, z_i$ ) и тремя составляющими скорости ( $v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}$ ). Взаимодействие шаров между собой носит вязкоупругий характер, что позволяет адекватно учитывать упругость почвы и, при рассмотрении ее как среды для движения рабочей поверхности, высокую ее вязкость [2]. Кроме того, в модели шары почвы первоначально связаны между собой, и при удалении двух шаров друг от друга рабочими поверхностями происходит отрыв – вязкоупругое взаимодействие отключается. Это решение позволяет адекватно учесть в модели первоначальное связанное состояние почвы и способность ее к разделению на фрагменты, рассыпчатость почвы. Также предусмотрена возможность имитации "слипания" почвы – отделенные шары притягиваются друг к другу на малых расстояниях, хотя это притяжение значительно более слабое, чем было ранее, когда почва не была разделена на фрагменты. Таким образом, можно производить моделирование почв с высоким содержанием влаги.

Расчет сил, действующих на шары, производится следующим образом. Некоторый шар  $i$  испытывает силовое воздействие со стороны каждого из окружающих его шаров  $j$ :

$$F_i = \sum_{j=1}^{N_{ш}} (F_{ij}^V + F_{ij}^B), \quad (2)$$

где  $F_{ij}^V$  и  $F_{ij}^B$  – силы упругого и вязкого взаимодействия шаров  $i$  и  $j$

(жирным шрифтом здесь и ниже выделены векторные величины);  $N_{ш}$  – общее количество шаров в модели почвы.

При расчете сил для каждой пары шаров предварительно вычисляется расстояние  $r_{ij}$  между их центрами  $S_i(x_i, y_i, z_i)$  и  $S_j(x_j, y_j, z_j)$  (рисунок 2.1):

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}. \quad (3)$$

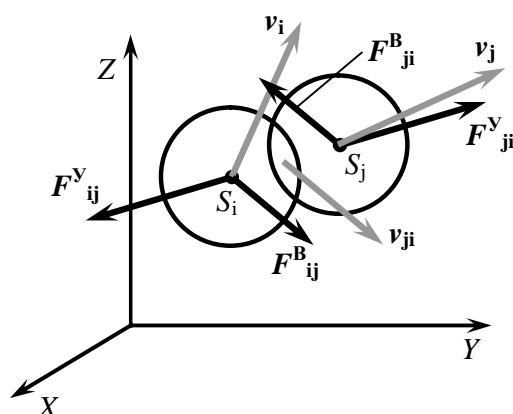


Рисунок 1 – Вязкоупругое взаимодействие двух частиц почвы

Шары, находящиеся на расстояниях  $r_{ij} > d_{ш} + d_M$  (где  $d_{ш}$  – диаметр шара,  $d_M$  – расстояние притяжения), считаются не взаимодействующими ( $F_{ij}^Y = 0, F_{ij}^B = 0$ ) (рисунок 2). При меньших расстояниях упругие силы  $F_{ij}^Y$  вычисляются следующим образом

1) Если  $r_{ij} < d_{ш}$ , то

$$\begin{aligned} F_{xij}^Y &= c_c(d_{ш} - r_{ij})(x_i - x_j)/r_{ij}; \\ F_{yij}^Y &= c_c(d_{ш} - r_{ij})(y_i - y_j)/r_{ij}; \\ F_{zij}^Y &= c_c(d_{ш} - r_{ij})(z_i - z_j)/r_{ij}. \end{aligned} \quad (4)$$

2) Если  $d_{ш} < r_{ij} < d_{ш} + d_M/2$ , то

$$\begin{aligned} F_{xij}^Y &= c(d_{ш} - r_{ij})(x_i - x_j)/r_{ij}; \\ F_{yij}^Y &= c(d_{ш} - r_{ij})(y_i - y_j)/r_{ij}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$F_{zij}^V = c(d_{III} - r_{ij})(z_i - z_j) / r_{ij}.$$

3) Если  $d_{III} + d_M/2 < r_{ij} < d_{III} + d_M$ , то

$$F_{xij}^V = c(r_{ij} - (d_{III} + d_M))(x_i - x_j) / r_{ij};$$

$$F_{yij}^V = c(r_{ij} - (d_{III} + d_M))(y_i - y_j) / r_{ij}; \quad (6)$$

$$F_{zij}^V = c(r_{ij} - (d_{III} + d_M))(z_i - z_j) / r_{ij}.$$

Здесь  $F_{xij}^V$ ,  $F_{yij}^V$ ,  $F_{zij}^V$  – декартовы составляющие силы  $F_{ij}^V$ ;  $c$  – жесткость упругого взаимодействия шаров, которая может принимать два значения:  $c = c_c$ , если шары  $i$  и  $j$  связаны,  $c = c_p$  – если шары  $i$  и  $j$  не связаны.

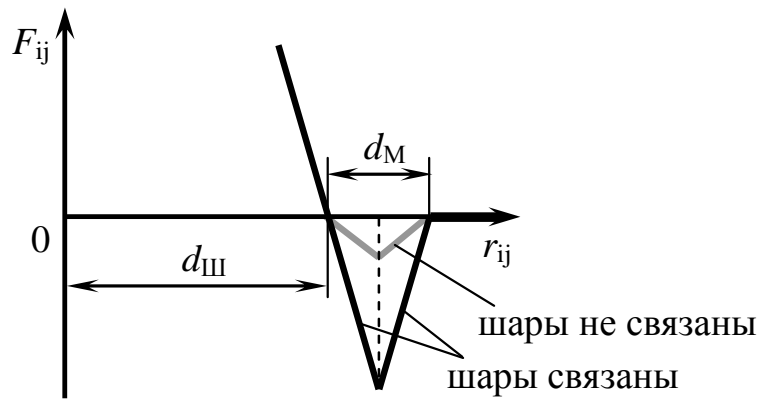


Рисунок 2 – Зависимость силы взаимодействия двух шаров  $i$  и  $j$  от расстояния между ними

Функция  $F_{ij}(r)$  не должна иметь разрывов во всей области изменения  $r_{ij}$ , чтобы облегчить интегрирование уравнений движения. Поэтому при выборе вида зависимости  $F_{ij}(r)$  в интервале  $d_{III} + d_M/2 < r_{ij} < d_{III} + d_M$  использовали зеркально отраженную относительно вертикали ветвь из интервала  $d_{III} < r_{ij} < d_{III} + d_M/2$ .

Декартовы составляющие вязких сил рассчитываются следующим образом

$$F_{xij}^B = k_B (r_{ij} - (d_{III} + d_M))(v_{xi} - v_{xj});$$

$$F_{yij}^B = k_B (r_{ij} - (d_{III} + d_M))(v_{yi} - v_{yj}); \quad (7)$$

$$F_{zij}^B = k_B (r_{ij} - (d_{III} + d_M))(v_{zi} - v_{zj}),$$

где  $v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}$  и  $v_{xj}, v_{yj}, v_{zj}$  – декартовы составляющие скоростей  $i$ -го и  $j$ -го шара;  $k_B$  – коэффициент вязкости.

Для  $F_{ij}^B$  выбрана общепринятая прямо-пропорциональная зависимость вязкой силы от скорости движущегося в среде тела. При этом введен дополнительный коэффициент  $(r_{ij} - (d_{III} + d_M))$ , характеризующий взаимное проникновение шаров друг в друга, так как торможение шаров друг от друга зависит от степени их контакта.

При взаимодействии двух шаров, согласно третьему закону Ньютона, силы возникают парами, то есть

$$F_{ji} = -F_{ij}.$$

В соответствии со вторым законом Ньютона запишем уравнения движения  $i$ -го шара

$$\begin{aligned} m_{III} \frac{d^2 x_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{III}} (F_{xij}^V + F_{xij}^B); \\ m_{III} \frac{d^2 y_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{III}} (F_{yij}^V + F_{yij}^B); \\ m_{III} \frac{d^2 z_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{III}} (F_{zij}^V + F_{zij}^B) - m_{III} g, \end{aligned} \tag{8}$$

где  $m_{III}$  – масса шара;  $t$  – время;  $g$  – ускорение свободного падения.

Данные уравнения движения описывают эволюцию почвы с течением времени в случае, когда почва не взаимодействует с рабочими поверхностями.

В модели не учитывается вращение шаров вокруг их центров, при этом практически не вносится погрешность, так как шары образуют более крупные фрагменты почвы (комья, пласты). При движении таких крупных фрагментов учет их вращения происходит автоматически – движением шаров друг относительно друга.

В ходе компьютерного эксперимента шары могут двигаться внутри прямоугольного параллелепипеда размерами  $L_X \times L_Y \times L_Z$  (рисунок 3). В начале эксперимента шары, в несколько слоев, располагаются в нижней части параллелепипеда. При этом шары образуют случайную плотную упаковку (подготовленную заранее по алгоритму встряски). Движущаяся вдоль направления  $OY$  машина, взаимодействуя дисками и роторами с шарами почвы, удаляет их из слоя почвы и заставляет двигаться по баллистической траектории. При этом за машиной образуются характерная борозда, близкая к реальной по своей конфигурации.

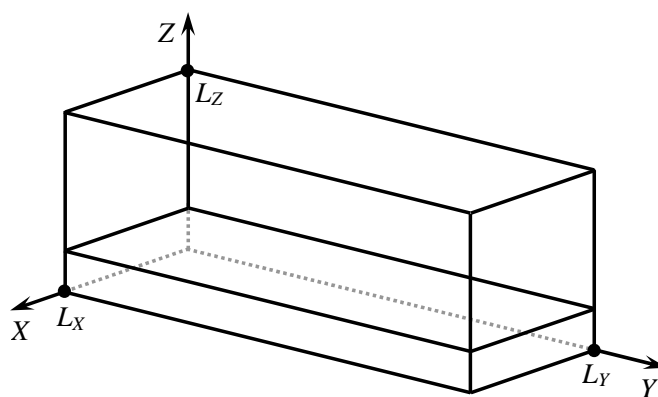


Рисунок 3 – Объем  $L_X \times L_Y \times L_Z$ , в котором проводится моделирование

Если в ходе компьютерного эксперимента какой-либо шар выходит за пределы параллелепипеда, то есть выполняется одно из условий:  $x_i < 0$ ,  $x_i > L_X$ ,  $y_i < 0$ ,  $y_i > L_Y$ ,  $z_i < 0$ ,  $z_i > L_Z$ , то этом случае шар возвращается в параллелепипед путем зеркального отражения от соответствующей стенки. Так, например, если выполнилось условие  $x_i > L_X$ , координате  $x_i$  шара присваивается значение  $x_i = L_X - (x_i - L_X)$ , а скорость шара в направлении  $OX$  меняет знак:  $v_{xi} = -v_{xi}$ . При отражении шара от стенки также производится незначительное гашение его энергии по адаптированным формулам (7).

Диаметр шаров  $d_{III}$  влияет на адекватность модели почвы. Для более точного представления почвы  $d_{III}$  должен быть как можно меньше. В

то же время количество шаров  $N_{ш}$ , необходимое для представления заданного объема почвы  $V_{п}$ , резко возрастает по кубическому закону с уменьшением  $d_{ш}$ . При увеличении же количества шаров увеличивается количество уравнений, описывающих почву и, соответственно, время расчета на ЭВМ. Даже уменьшение диаметра шара вдвое приводит к увеличению длительности расчета минимум в восемь раз. Поэтому, если ориентироваться на вычислительные возможности современных ЭВМ, оптимальный диаметр шаров, позволяющий с достаточной точностью описать почву, но одновременно не приводящий к сверхдлительным компьютерным расчетам, составляет порядка 7 см. При этом общее количество шаров в модели составляет 7000.

Перед проведением компьютерного эксперимента производится специальная процедура подготовки плотноупакованного объема почвы. Сначала необходимое количество шаров распределяется случайным образом по всему объему параллелепипеда. Затем производится интегрирование уравнений движения (8) в течении промежутка времени 15 с. При этом под действием сил тяжести шары начинают оседать и формировать в нижней части параллелепипеда слой почвы. Для создания более плотной упаковки в промежуток времени от 5 до 10 с производится встряска почвы: координатам  $(x_i, y_i, z_i)$  всех шаров на каждом шаге интегрирования сообщают незначительные случайные смещения. В процессе процедуры подготовки почвы скорости шаров, первоначально возникшие вследствие свободного падения, постепенно гасят, чтобы к концу процедуры шары образовали неподвижный плотноупакованный слой почвы. Впоследствии, в ходе компьютерного эксперимента, шары приобретают скорости за счет взаимодействия с рабочими органами грунтомета.

В конце процедуры подготовки почвы производится связывание шаров. Для этого заполняется двумерный массив  $K(i, j)$ , каждая ячейка



которого принимает значение "истинно" в случае, если шары  $i$  и  $j$  находятся на расстоянии

$$r_{ij} < d_{ш} + d_{м}, \quad (9)$$

и значение "ложно" в противоположном случае. Во время проведения эксперимента, на каждом шаге интегрирования для каждой связанной пары  $i-j$  проверяется, не разделилась ли она, по тому же условию (9), и в случае невыполнения (9) в массив  $K(i, j)$  записывается значение "ложно".

По окончании процедуры подготовки почвы координаты, скорости элементов и массив связанности заносятся в файл на жестком диске компьютера. Подготовленная модель почвы впоследствии вызывается при проведении компьютерных экспериментов. В случае моделирования рассыпчатого грунта (песчаной почвы) все элементы почвы считаются не связанными.

В модели необходимо корректно воспроизвести сложную геометрическую форму рабочих поверхностей, а также взаимодействие поверхностей с элементами-шарами почвы. В рамках конечно-элементного подхода поверхности сложной формы обычно заменяются большим количеством плоских фигур [3]. Как правило, в качестве элементарной фигуры используют треугольники, так как они легко стыкуются между собой и позволяют воспроизводить поверхность любой формы. Поэтому в рамках разрабатываемой модели рабочие поверхности представляются в виде совокупности элементарных треугольников. Так как в данной работе необходимо оптимизировать форму и геометрическое расположение поверхностей, то представление поверхностей в виде совокупности треугольников очень удобно тем, что можно легко изменить, например, размер ротора, изменяя координаты лишь нескольких вершин треугольников.

Треугольник в трехмерном пространстве задается координатами трех его вершин  $T_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ ,  $T_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$ ,  $T_{i3}(x_{i3}, y_{i3}, z_{i3})$ , где  $T$  –

обозначение точки-вершины треугольника;  $i$  – номер треугольника; индексы 1, 2 или 3 – означают номер вершины для  $i$ -го треугольника. Для образования сложных поверхностей треугольники стыкуются между собой по какому либо ребру: для соседних треугольников совпадают по две вершины (например  $T_{71} = T_{81}$ ,  $T_{72} = T_{82}$ ). Так как поверхности не являются замкнутыми, после стыковки всех треугольников остаются свободные ребра, которые выступают, например, в качестве режущих кромок роторов и дисков.

Рабочие поверхности в модели с некоторой степенью закругления были разбиты на 64 элементарных треугольника (рисунок 4). При этом поверхность каждого ротора состояла из восьми треугольников, а поверхность каждого диска из 24 треугольников.

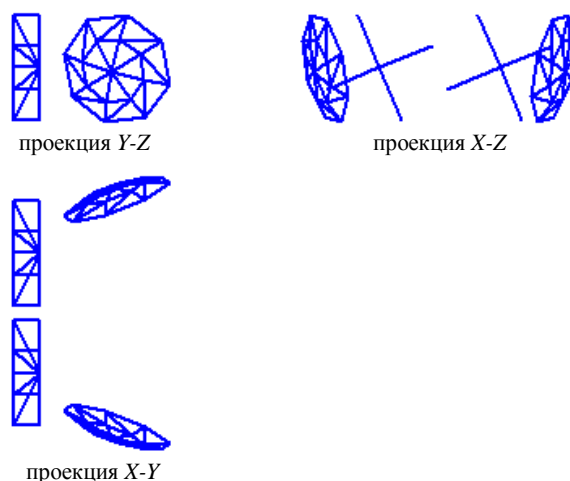


Рисунок 4 – Представление в модели рабочих поверхностей грунтомета как совокупности элементарных треугольников (показаны три проекции)

С течением времени рабочие поверхности совершают сложное поступательно-вращательное движение по отношению к почве. При этом необходимо непрерывно корректировать координаты точек-вершин треугольников  $T_{ij}$  (где  $i$  – номер треугольника,  $j$  – номер вершины). В рамках приближения о равномерном прямолинейном движении рабочих органов грунтомета вдоль оси  $OY$  необходимо изменять все игрековые

координаты треугольников:

$$y_{ij} = y_{0ij} + v_c \cdot t, \quad (10)$$

где  $y_{0ij}$  – координаты вершин треугольников в момент начала моделирования;  $v_c$  – скорость поступательного движения машины;  $t$  – время, прошедшее с начала моделирования.

В модели также необходимо учесть постепенное заглубление машины в первые секунды движения. В момент времени  $t = 0$  диски и роторы находятся над почвой (нижние точки касаются поверхности почвы), и за промежуток времени  $t_{\text{заг}}$  они должны выйти на заданную глубину  $a$ . Поэтому до момента времени  $t = t_{\text{заг}}$  координаты  $z_{ij}$  всех вершин треугольников изменяются по следующему линейному закону:

$$z_{ij} = z_{0ij} - a \cdot t / t_{\text{заг}}, \quad (11)$$

где  $z_{0ij}$  – координаты вершин треугольников в момент начала моделирования.

При движении рабочих поверхностей, они входят в контакт с элементами почвы, что вызывает появление как сил, действующих на поверхности и вызывающих сопротивление движению, так и сил, действующих на элементы почвы и вызывающих движение элементов и изменение конфигурации почвенной системы. Силы рассчитываются в предположении о вязко-упругом взаимодействии между поверхностью и элементами почвы. При расчете сил основную сложность вызывает проверка, контактирует ли элемент с данным треугольником  $T_{ij}$ , и, если контактирует, расчет величины внедрения  $r_{\text{вн}}$  элемента в плоскость данного треугольника и направления взаимодействия.

Проверка контакта шара  $j$  с треугольником  $i$  производится в два этапа: сначала находится проекция центра шара  $(x_j, y_j, z_j)$  на плоскость, содержащую треугольник, затем проверяется, попадает ли точка проекции внутрь треугольника. Поэтому сначала составляется уравнение плоскости, проходящей через три точки – вершины  $T_{i1}$ ,  $T_{i2}$ ,  $T_{i3}$  треугольника по

известной в аналитической геометрии формуле

$$\begin{vmatrix} x - x_{i1} & y - y_{i1} & z - z_{i1} \\ x_{i2} - x_{i1} & y_{i2} - y_{i1} & z_{i2} - z_{i1} \\ x_{i3} - x_{i1} & y_{i3} - y_{i1} & z_{i3} - z_{i1} \end{vmatrix} = 0. \quad (12)$$

После раскрытия определителя последнее уравнение приводится к виду

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (13)$$

где  $A, B, C, D$  – коэффициенты уравнения плоскости.

Затем уравнение плоскости нормируется путем деления всех коэффициентов уравнения на длину нормального вектора  $\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$  :

$$\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}x + \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}y + \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}z + \frac{D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} = 0, \quad (14)$$

или, введя новые обозначения коэффициентов (с индексом "н"), нормированное уравнение плоскости можно записать в следующем виде

$$A_n x + B_n y + C_n z + D_n = 0. \quad (15)$$

Тогда отклонение  $r_{вн}$  центра шара  $(x_j, y_j, z_j)$  от плоскости рассчитывается по формуле

$$r_{вн} = A_n x_j + B_n y_j + C_n z_j + D_n = 0. \quad (16)$$

Так как большинство элементов почвы не контактируют с рабочими органами грунтомета, на данном этапе расчета производится отсечение всех не контактирующих элементов почвы по условию  $r_{вн} > d_{ш}/2$ .

Затем необходимо найти проекцию центра шара на плоскость данного треугольника. Так как известны координаты нормального вектора  $A_n, B_n$  и  $C_n$  и отклонение  $r_{вн}$  от точки до плоскости, проекция  $P(x_{п}, y_{п}, z_{п})$  находится смещением по нормальному вектору

$$x_{п} = x_j - A_n \cdot r_{вн};$$

$$y_{\Pi} = y_j - B_n \cdot r_{вн}; \quad (17)$$

$$z_{\Pi} = z_j - C_n \cdot r_{вн}.$$

Для того, чтобы проверить, попадает ли точка Р внутрь треугольника  $T_i$ , используется метод проверки по площадям: сумма площадей трех треугольников с вершиной Р должна равняться площади всего треугольника  $T_i$ , то есть,

$$S(\Delta T_{i1}T_{i2}T_{i3}) = S(\Delta PT_{i2}T_{i3}) + S(\Delta T_{i1}PT_{i3}) + S(\Delta T_{i1}T_{i2}P). \quad (18)$$

Если суммарная площадь треугольников  $\Delta PT_{i2}T_{i3}$ ,  $\Delta T_{i1}PT_{i3}$  и  $\Delta T_{i1}T_{i2}P$  оказывается больше площади элементарного треугольника  $S(\Delta T_{i1}T_{i2}T_{i3})$ , это означает, что точка Р не лежит внутри треугольника  $T_i$ . и шар не контактирует с данным треугольником.

В случае же если шар контактирует с треугольником, производится расчет сил, действующих между элементом почвы и поверхностью по известной величине внедрения  $r_{вн}$  по формуле, аналогичной (1).

Разработанная модель в целом представляет собой систему из большого количества дифференциальных и алгебраических уравнений, а также условий включения тех или иных сил. Решение системы дифференциальных уравнений производится численно. Используется модифицированный метод Эйлера-Коши [5], который особенно эффективен при решении дифференциальных уравнений второго порядка. При этом координаты и скорости рассчитываются по формулам вида

$$x_{i+1} = x_i + v_i \cdot \Delta t + a_i \cdot (\Delta t)^2 / 2; \quad (19)$$

$$v_{i+1} = v_i + a_i \cdot \Delta t,$$

где  $x, v, a$  – координата, скорость и ускорение некоторого тела (элемента почвы или сеянца);  $i$  – номер шага интегрирования ( $i$  – текущий шаг,  $i + 1$  – последующий шаг);  $\Delta t$  – шаг интегрирования.

Шаг численного интегрирования  $\Delta t$  системы дифференциальных

уравнений определяется путем многократного проведения экспериментов с последовательно уменьшающимся в 2 раза шагом. Останавливаются на том шаге, после которого результаты моделирования практически не изменяются (изменение составляет не более 1–2 %). Определенный таким образом шаг составил  $\Delta t = 5 \cdot 10^{-4}$  с и был использован во всех расчетах при проведении теоретических исследований.

На рисунке 5 представлена блок-схема алгоритма программы, моделирующей машину. В процессе моделирования производится проход по двум циклам: внутреннему (по переменной  $t$ ), соответствующему изменению моделируемой системы с течением времени, и внешнему (по переменной  $N_{\text{Э}}$ ), позволяющему провести серию из определенного количества компьютерных экспериментов для последующего построения графика.

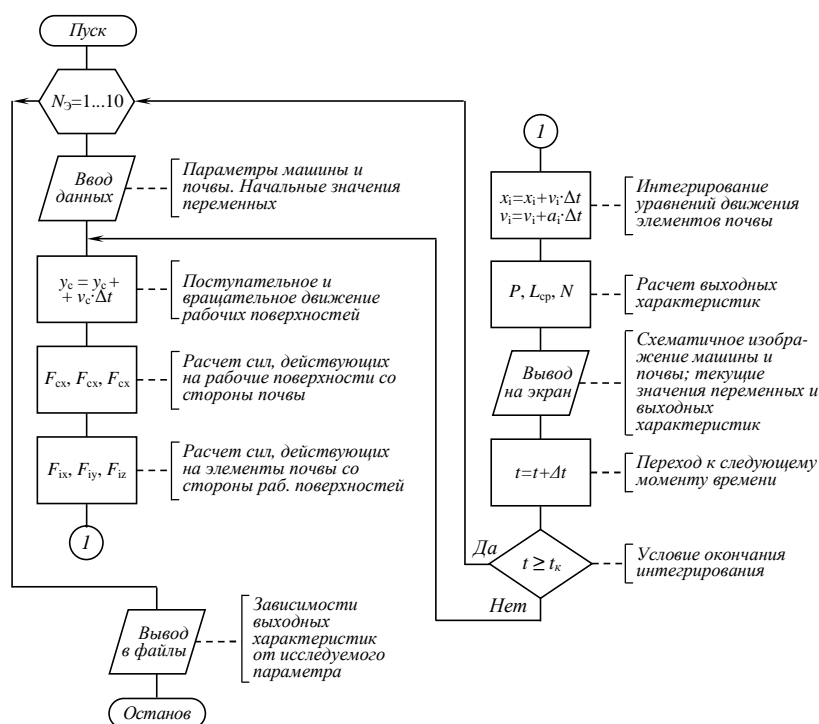


Рисунок 5 – Схема алгоритма моделирования работы грунтомета

**Заключение.** Разработана математическая модель функционирования комбинированной двухроторной машины для тушения лесных пожаров. Модель позволяет на основе компьютерных

экспериментов исследовать влияние на эффективность работы машины ее конструктивных и технологических параметров, параметров грунта и в дальнейшем провести теоретическую оптимизацию параметров грунтомета.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по государственному соглашению № 14.В37.21.2095 в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы»*

#### Список литературы

1. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: учебное пособие. М.: Высшая школа, 1998. 319 с.
2. Малиновский Е.Ю. Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ. М.: Машиностроение, 1980. 216 с.
3. Синеоков Г.Н., Панов И.М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. М.: Машиностроение, 1977. 328 с.
4. Лурье А.Б. Моделирование сельскохозяйственных агрегатов и их систем управления: Учеб. для вузов. Л.: Колос. Ленингр. отд-ние, 1979. 312 с.
5. Троицкий В.А. Инженерные расчеты на ЭВМ: Справочное пособие. Л.: Машиностроение, 1979. 288 с.