

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАДЕЛКИ СЕМЯН ПОЧВОЙ

кандидат технических наук **И. В. Казаков**

ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации
лесного хозяйства», г. Пушкино, Российская Федерация

В существующих конструкциях лесных сеялок для заделки бороздок с высевными семенами наибольшее применение нашли шлейф-боронки, представляющие собой набор соединенных между собой колец, которые не в полной мере отвечают предъявляемым к ним требованиям. Поэтому усовершенствование и обоснование конструктивных параметров устройств, предназначенных для заделки семян почвой, представляет интерес для специалистов лесного хозяйства. Для решения этой проблемы разработана математическая модель, описывающая процесс заделки семян почвой предложенной конструкцией загортача, выполненной в виде двух V-образных полозков, с нижней стороны которых прикреплены прутки. В результате разработанной математической модели процесса заделки бороздки с семенами почвой получена модель, учитывающая действующие на элементы почвы силы и позволяющая с высокой детализацией и пространственным разрешением исследовать процесс работы загортача. Разработанная компьютерная программа для моделирования заделки семян почвой является достаточно адекватной и позволяет детально исследовать процесс заделки семян и обосновать оптимальные конструктивные и технологические параметры загортача. Проведена проверка работоспособности разработанной модели и ее оценка на основе базового компьютерного эксперимента с учетом наиболее характерных параметров загортача и почвы. В результате проведенных исследований получены исходные данные для разработки усовершенствованных конструкций устройств, предназначенных для заделки лесными сеялками семян почвой.

Ключевые слова: сеялка, почва, загортач, заделка семян, математическая модель, программа, параметры.

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF SOIL COVERING OF SEEDS

PhD (Engineering) **I. V. Kazakov**

FBI «All-Russian Research Institute of Forestry and Mechanization of Forestry», Pushkino, Russian Federation

Abstract

In the existing designs of forest planters for embedding grooves with sown seeds, harrows are the most widely used, representing a set of interconnected rings that do not fully meet their requirements. Therefore, improvement and justification of the design parameters of devices intended for soil covering of seeds is interesting to the specialists in forestry. A mathematical model has been developed to solve this problem that describes the process of seed covering with soil, a construction of covering body, made in the form of two V-shaped sliders with rods attached on its bottom side is proposed. As a result of the developed mathematical model of the process of covering seeds with soil, a model has been obtained that takes into account the forces acting on the elements of soil and makes it possible to investigate the work of covering body with high detail and spatial resolution. A developed computer program for simulating covering of seeds with soil is sufficiently adequate and allows a detailed study of the process of seeds covering and justifying the optimal design and technological parameters of covering body. The performance check of the developed model and its assessment has been carried out on the basis of a basic computer experiment, taking into account the most characteristic parameters of covering body and soil. As a result of the conducted research, initial data have been obtained for the development of improved designs of devices intended for planting seed by forest planters.

Keywords: forest planter, soil, covering body, covering of seeds, mathematical model, program, parameters.

В современных конструкциях сеялок для лесных питомников заделка семян в бороздках с высевными семенами осуществляется различными шлейф-боронками, выполненными в виде набора соединенных

между собой колец на всю ширину захвата сеялки [1, 4, 8]. Основным недостатком этих шлейф-боронки является неравномерность глубины заделки семян и нарушение технологического процесса их работы при

встрече с различными включениями в почве. Поэтому усовершенствование конструктивно-технологических параметров загорточей, обеспечивающих требуемую глубину заделки бороздки с семенами почвой путем моделирования процесса их работы представляет научный и практический интерес при модернизации существующих и разработке новых конструкций сеялок для лесных питомников.

На основании известных конструкций устройств [1, 4, 8], предназначенных для заделки семян почвой в посевных бороздках, предложена схема загортача (рис. 1), выполненная в виде двух V-образных полозков 1 с приваренными в их нижних частях прутками 2, смонтированных на тяге 3. Для обеспечения технологического процесса заделки бороздок почвой полозки должны быть отклонены в стороны с углом α между ними, который необходимо обосновать. Полозки необходимо выполнить из стального круга диаметром D , рекомендуемым принять равным 20-22 мм. Прутки 2 предназначены для перемещения почвы в бороздку с ее боков, и их диаметр d должен быть обоснован. Передние части направляющих полозков должны быть отогнуты вверх под радиусом R , равным не менее 100 мм, и с расстоянием между ними, равным B , не превышающим расстояние между бороздками. В задней части полозки должны сходиться на величину, более ширины бороздки на 5-10 мм. Длина рабочей части полозков L оказывает существенное влияние на количество сдвигаемой почвы, и ее также необходимо обосновать.

Загортачи должны быть установлены по следу каждой посевной бороздки и шарнирно присоединены к раме сеялки с помощью тяги, установленной под углом β к направлению движения агрегата, рекомендуемым принять равным $40-45^\circ$.

Для обоснования основных конструктивных параметров загортача: угла между направляющими полозков α , диаметра прутков d и длины рабочей части полозков L необходимо разработать математическую модель процесса заделки бороздки почвой загортачом, обладающую высокими физической адекватностью, пространственным и временным разрешением.

Разработанную математическую модель необходимо ориентировать на использование возможно-

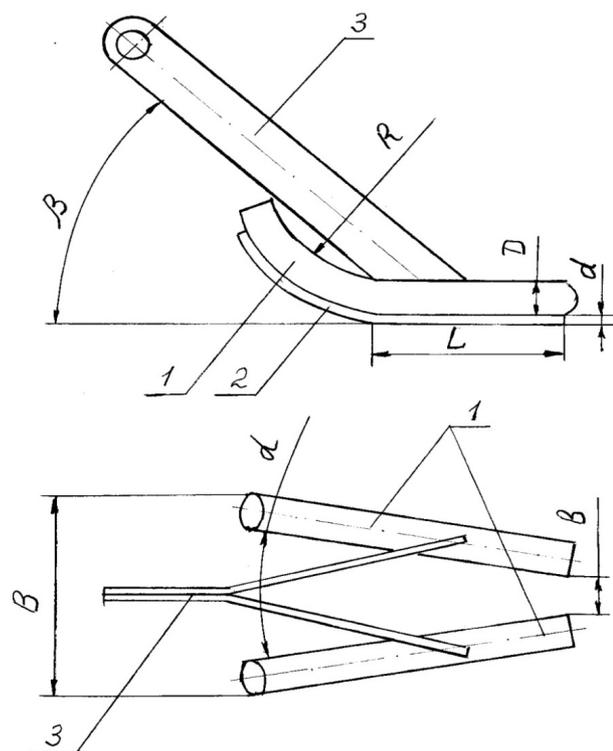


Рис. 1. Схема загортача для заделки бороздки почвой

стей современных компьютеров. В рамках конечного элементного приближения почву целесообразно представить совокупностью большого количества (10^4-10^6) элементов, механически взаимодействующих между собой (рис. 2).

Для моделирования механического поведения почвы под действием загортача используется метод динамики частиц [2, 3, 13, 14], различные варианты которого показали высокую эффективность при моделировании широкого спектра физических процессов: от элементарных частиц, атомов и молекул до звезд, галактик и Вселенной [6, 10, 11, 12]. Особенно широкое применение этот метод находит при моделировании различных сред (жидкие, сыпучие, фрагментируемые, газообразные) в физически-реалистичной компьютерной графике [5, 7, 9, 13].

В рамках метода динамики частиц будем считать, что почва состоит из одинаковых шарообразных элементов с диаметром d_0 (в большинстве расчетов равным 1 мм).

При контакте элементов друг с другом возникают упругие силы и силы вязкого трения (рис. 3, а). Под действием сил в модели рассчитывается движение элементов по законам классической динамики.

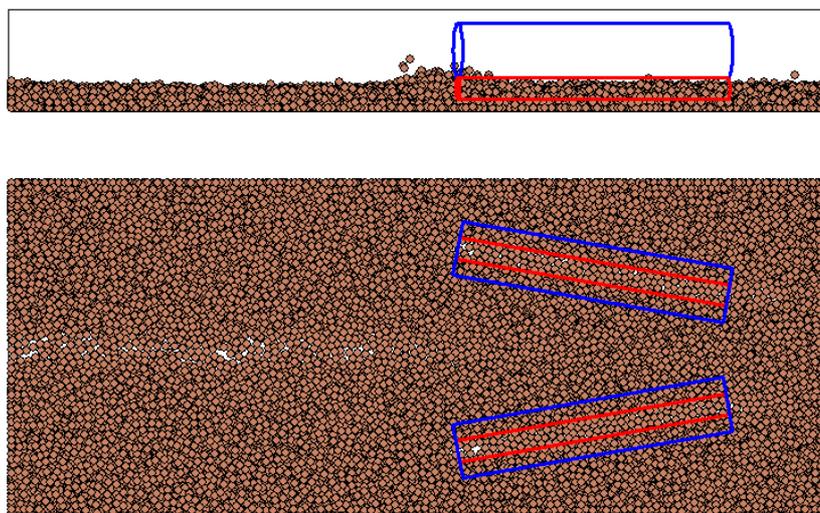


Рис. 2. Представление в модели взаимодействия почвы и загортача

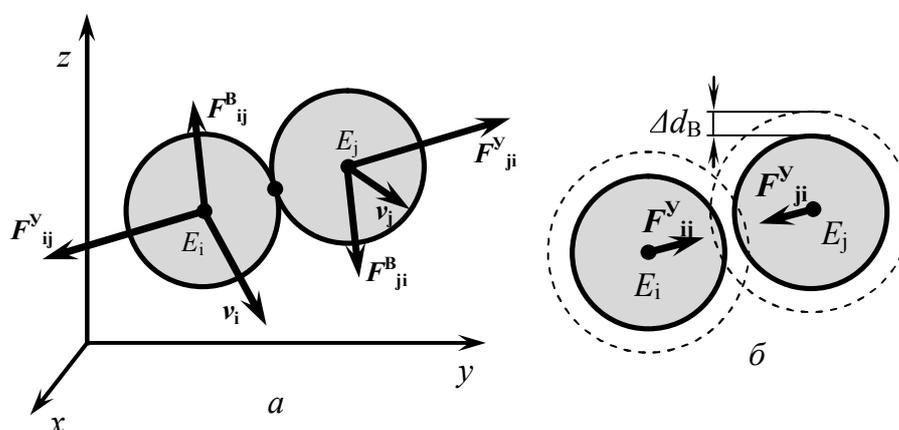


Рис. 3. Силы, действующие на элементы почвы:

a – силы отталкивания при внедрении элементов друг в друга;

б – силы притяжения при удалении элементов друг от друга до определенного расстояния

Моделирование производим в трехмерном пространстве XYZ . Состояние каждого элемента-шара E_i задается шестью переменными: декартовыми координатами его центра (x_i, y_i, z_i) и составляющими скорости (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) . Механическое взаимодействие элементов между собой принято упруго-вязким, что позволяет заложить в модель основные механические свойства почвы: модуль упругости, коэффициент внутреннего трения, предельную деформацию при испытании на разрыв. В модели учитывается, что между соседними элементами могут возникать силы отталкивания при внедрении элементов друг в друга или притяжения при отдалении сцепленных элементов друг от друга (рис. 3, б).

Упругая составляющая взаимодействия между

элементами почвы обеспечивает как их от-талкивание (расстояние между r_{ij} центрами i -го и j -го элементов менее диаметра элемента d_0), так и притяжение в узком диапазоне расстояний ($d_0 > r_{ij} > r_k$) (рис. 3, б), где $r_k = k_0 d_0$ – критическое расстояние, до которого элементы взаимодействуют друг с другом; k_0 – коэффициент выражения критического расстояния через диаметр элемента (в большинстве расчетов принят равным 1,1).

При расчете силы $\overline{F_{ij}}$, действующей со стороны элемента i на элемент j , считается, в соответствии с третьим законом Ньютона, что сила со стороны элемента j на элемент i является такой же по модулю и противоположной по направлению, то есть $\overline{F_{ij}} = -\overline{F_{ji}}$.

Уравнения движения элементов почвы составляются на основе второго закона Ньютона:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\text{Э}}} \left\{ \begin{array}{l} c_{ij} (d_{\text{Э}} - r_{ij}) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}} + k_{ij} (r_{ij} - d_{\text{Э}}) (v_{xi} - v_{xj}), \quad r_{ij} < k_{Oij} d_{\text{Э}}; \\ 0, \quad r_{ij} \geq k_{Oij} d_{\text{Э}}; \end{array} \right. \\ \\ m_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\text{Э}}} \left\{ \begin{array}{l} c_{ij} (d_{\text{Э}} - r_{ij}) \frac{(y_i - y_j)}{r_{ij}} + k_{ij} (r_{ij} - d_{\text{Э}}) (v_{yi} - v_{yj}), \quad r_{ij} < k_{Oij} d_{\text{Э}}; \\ 0, \quad r_{ij} \geq k_{Oij} d_{\text{Э}}; \end{array} \right. \\ \\ m_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} = -m_i g + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\text{Э}}} \left\{ \begin{array}{l} c_{ij} (d_{\text{Э}} - r_{ij}) \frac{(z_i - z_j)}{r_{ij}} + k_{ij} (r_{ij} - d_{\text{Э}}) (v_{zi} - v_{zj}), \quad r_{ij} < k_{Oij} d_{\text{Э}}; \\ 0, \quad r_{ij} \geq k_{Oij} d_{\text{Э}}; \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (1)$$

где i – номер элемента;

m_i – масса элемента;

x_i, y_i, z_i – декартовы координаты элемента;

t – время;

$N_{\text{Э}}$ – количество элементов;

j – номер элемента, возможно контактирующего с i -м элементом;

c_{ij} и k_{ij} – коэффициенты жесткости взаимодействия и вязкого трения друг о друга элементов i и j ;

r_{ij} – расстояние между центрами элементов i и j ;

v_{xi}, v_{yi}, v_{zi} – декартовы составляющие скорости i -го элемента;

g – ускорение свободного падения.

Расстояние r_{ij} между центрами элементов $E_i(x_i, y_i, z_i)$ и $E_j(x_j, y_j, z_j)$ рассчитывается по теореме Пифагора:

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

Решением системы дифференциальных уравнений второго порядка являются функции $x_i(t), y_i(t), z_i(t)$, определяющие траектории движения элементов и позволяющие воспроизвести в модели эволюцию почвы при действии загротачей.

По общепринятой классификации предлагаемая модель является алгоритмической, но не является аналитической [5, 9, 13]. Это означает, что выходные характеристики модели рассчитываются по входным не путем аналитических преобразований (это невозможно в принципе сделать с приемлемой точностью из-за сложности моделируемой системы), а с помощью пространственной и временной дискретизации и соответствующего алгоритма расчета. Расчет по приведенным выше формулам является довольно громоздким и включает в себя три цикла, вложенных один в другой:

по номеру компьютерного эксперимента, по номеру временного шага и по номеру элемента.

Определение параметров модели по справочным и экспериментальным данным

В модели используется целый ряд параметров, связанных с дискретизацией почвы: $m_i, d_{\text{Э}}, c_{ij}, k$. Изложим методику определения параметров по справочным данным.

Расчет массы одного элемента $m_{\text{Э}}$ производится с использованием табличного значения плотности почвы и геометрических соображений:

$$m_i = \rho \cdot V_{\text{Э}} = \rho \cdot \frac{4\pi}{3} \left(\frac{d_{\text{Э}}}{2} \right)^3 \cdot k_{\Phi} = \frac{\pi}{6} \rho d_{\text{Э}}^3 k_{\Phi}, \quad (3)$$

где ρ – объемная плотность среды, кг/м³;

$V_{\text{Э}}$ – объем элемента, м³;

k_{Φ} – коэффициент формы, необходимый для учета того, что шарообразные элементы не полностью заполняют пространство между ними, безразмерный.

Значение коэффициента k_{Φ} зависит от плотности случайной упаковки и принято равным 1,4.

Для расчета жесткости взаимодействия двух элементов используется табличное значение модуля упругости почвы и также геометрические соображения, касающиеся дискретизации:

$$c_{\Pi} = E \cdot \frac{\pi d}{4} k_{\Phi}, \quad (4)$$

где E – модуль упругости почвы, Па.

Коэффициент вязкого трения k_{ij} связан с внутренним трением в почве и определяется по справочным значениям расстояния затухания звуковых волн.

Коэффициент α обнуления взаимодействия ме-

жду соседними элементами рассчитывается по справочным значениям предельной деформации при испытании образцов почвы на растяжение.

Рассмотрим особенности решения системы дифференциальных уравнений.

Метод численного интегрирования. Дифференциальные уравнения, описывающие движение элементов почвы, являются однотипными и в общем виде записываются следующим образом:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = k_1 \frac{dx}{dt} + k_2 x + k_3 \quad (5)$$

или $ma = k_1 v + k_2 x + k_3,$ (6)

где m – масса элемента почвы;

x – искомая функция (зависимость координаты x, y или z от времени); t – время;

k_1, k_2, k_3 – величины, не зависящие от x , но зависящие от других искомым функций системы дифференциальных уравнений;

a – ускорение (соответствующая декартова компонента a_x, a_y или a_z);

v – скорость (соответствующая декартова компонента v_x, v_y или v_z).

В совокупности с начальными условиями данные уравнения представляют собой задачу Коши. Для ее решения используем численный метод Рунге-Кутты второго порядка (модифицированный метод Эйлера-Коши) [3]. Этот метод реализуется следующими итерационными формулами:

$$x^{\tau+1} = x^{\tau} + v^{\tau} \cdot \Delta t + \frac{k_1 v^{\tau} + k_2 x^{\tau} + k_3}{m} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2}; \quad (7)$$

$$v^{\tau+1} = v^{\tau} + \frac{k_1 v^{\tau} + k_2 x^{\tau} + k_3}{m} \cdot \Delta t, \quad (8)$$

где индексы τ и $\tau+1$ обозначают текущий и последующий шаг интегрирования по времени;

Δt – величина шага интегрирования.

Данный метод имеет второй порядок точности по отношению к искомой функции $x(t)$. Этот метод является универсальным и надежным, а также быстро программируемым. Шаг интегрирования системы дифференциальных уравнений составляет $\Delta t = 0,001$ с.

Начальные условия. Для основной системы дифференциальных уравнений, описывающей движе-

ние элементов почвы, необходимо задать начальные условия: положение в пространстве и скорость элементов в начальный момент времени. В начальный момент времени заданное количество элементов почвы размещается в геометрической области в форме прямоугольного параллелепипеда по всему объему области моделирования, при этом координаты элементов выбираются случайным образом с помощью генератора случайных чисел, реализующего равномерный закон распределения

$$x_i(t=0) = x_{Г1} + F_{1i} \cdot (x_{Г2} - x_{Г1}); \quad (9)$$

$$y_i(t=0) = y_{Г1} + F_{2i} \cdot (y_{Г2} - y_{Г1}); \quad (10)$$

$$z_i(t=0) = z_{Г1} + F_{3i} \cdot (z_{Г2} - z_{Г1}); \quad (11)$$

где F_{1i}, F_{2i}, F_{3i} – реализации случайной величины, имеющей равномерный закон распределения, и принимающей значение от 0 до 1;

$x_{Г1}, x_{Г2}, y_{Г1}, y_{Г2}, z_{Г1}, z_{Г2}$ – координаты границ куба.

- начальные скорости элементов почвы приняты равными нулю:

$$v_{xi}(t=0) = 0; v_{yi}(t=0) = 0; v_{zi}(t=0) = 0; \quad (12)$$

Граничные условия. Механическое движение элементов почвы ограничено границами модельного пространства размером $L_x \times L_y \times L_z$. Те элементы, которые выходят за границы модельного пространства, принудительно возвращаются обратно. Так, например, если координата x_i элемента превысит длину модельного пространства L_x , производится коррекция координаты и скорости элемента:

$$\text{если } x_i > L_x, \text{ то } x_i = L_x; v_{xi} = -v_{xi}. \quad (13)$$

Допущения и приближения. В предлагаемой модели приняты следующие допущения:

- фрагменты почвы являются шарообразными;
- в пределах одного элемента почва считается сплошной средой с постоянными физическими свойствами по всему объему, в частности объемной плотностью.
- элементы движутся по законам классической динамики;
- механическое взаимодействие элементов почвы между собой и с рабочими поверхностями загорточа носит линейный упруго-вязкий характер;
- реальные свойства почвы переносятся в свойства элементов и задаются только пятью параметрами: диаметр, масса, коэффициенты жесткости, вязкого трения, ограничения взаимодействия.

Разработанная математическая модель представляет собой систему из десятков тысяч дифференциальных и алгебраических уравнений. Для удобства исследования системы уравнений разработана компьютерная программа «Программа для моделирования заделки семян» на языке ObjectPascal в интегрированной среде программирования BorlandDelphi 7.0.

Программа предназначена для проведения компьютерных экспериментов по заделке бороздки загорточом. Перед началом моделирования геометри-

ческие параметры загорточа и физические параметры почвы могут быть скорректированы в окнах интерфейсной форме (рис. 4) и в тексте программы.

В процессе работы программа выводит на экран компьютера три проекции исследуемого фрагмента почвы, две проекции загорточа и текущие значения показателей эффективности (рис. 5).

Программа применима для почв различного типа и сохраняет работоспособность при изменении параметров загорточа в широких пределах.

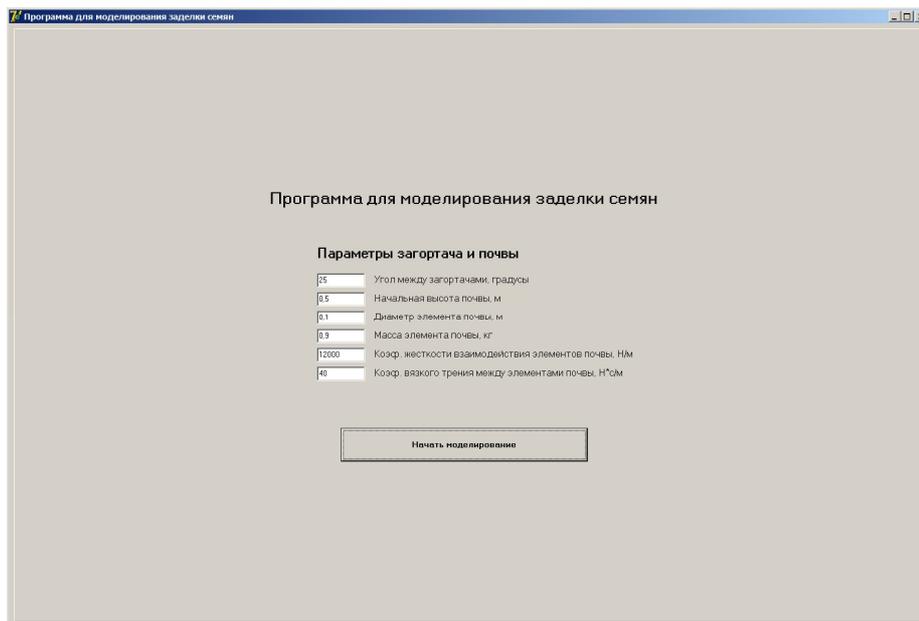


Рис. 4. Интерфейсная форма ввода параметров почвы и загорточа перед началом моделирования

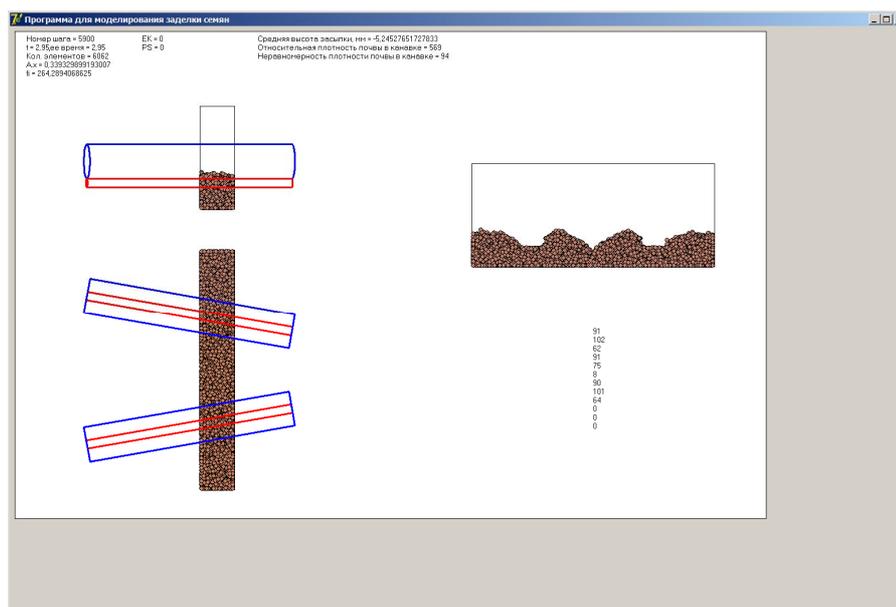


Рис. 5. Вывод результатов моделирования в разработанной программе

При первичной проверке работоспособности модели и оценки ее адекватности проведен базовый компьютерный эксперимент с наиболее характерными параметрами загортача и почвы. В процессе базового компьютерного эксперимента загортач двигался вдоль поверхности почвы, контактируя с ее верхним слоем (рис. 6). Для исследования был подготовлен фрагмент почвы, имеющий малую протяженность (20 мм) вдоль направления движения загортача, что обосновывается симметрией процесса его работы. Исследуемый фрагмент почвы имел ширину 150 мм и высоту 25 мм и представлял собой своеобразное сечение, в котором можно было изучать перемещение почвы загортачом.

Перед началом действия загортача в исследуемом фрагменте почвы была сформирована бороздка квадратного сечения 20×20 мм (рис. 6, б). При касании загортачом исследуемого сечения почвы края бороздки начинают смещаться навстречу друг другу (рис. 6, в). По мере движения загортача через исследуемое сечение почвы прутки загортача смещают внутрь бороздки объемы почвы приблизительно прямоугольной формы (рис. 6, е, з). После прохода загортача бороздка оказывается засыпанной почвой и уплотненной с формированием «горки» (рис. 6, к). Через несколько секунд после прохода загортача «горка» частично осыпается в соответствии с физическими свойствами почвы (рис. 6, л).

Первоначально моделировали не узкий фрагмент почвы, а протяженный участок почвы (рис. 7). Однако такие компьютерные эксперименты занимали значительное время (около 40 минут на типичном персональном компьютере), хотя по результатам практически не отличались от узкого фрагмента почвы, для которого компьютерный эксперимент длится около 2,5 минут.

Таким образом, разработана математическая модель процесса заделки бороздки с семенами почвой, учитывающая действующие на элементы почвы силы и позволяющая с высокой детализацией и пространственным разрешением исследовать процесс работы загортача. Состав-

лена компьютерная программа для моделирования заделки семян почвой, которая является достаточно адекватной и позволяет детально исследовать процесс заделки семян и обосновать оптимальные конструктивные и технологические параметры предлагаемой конструкции загортача. Проведена проверка работоспособности разработанной модели и ее оценка на основе базового компьютерного эксперимента с учетом наиболее характерных параметров загортача и типа почвы.

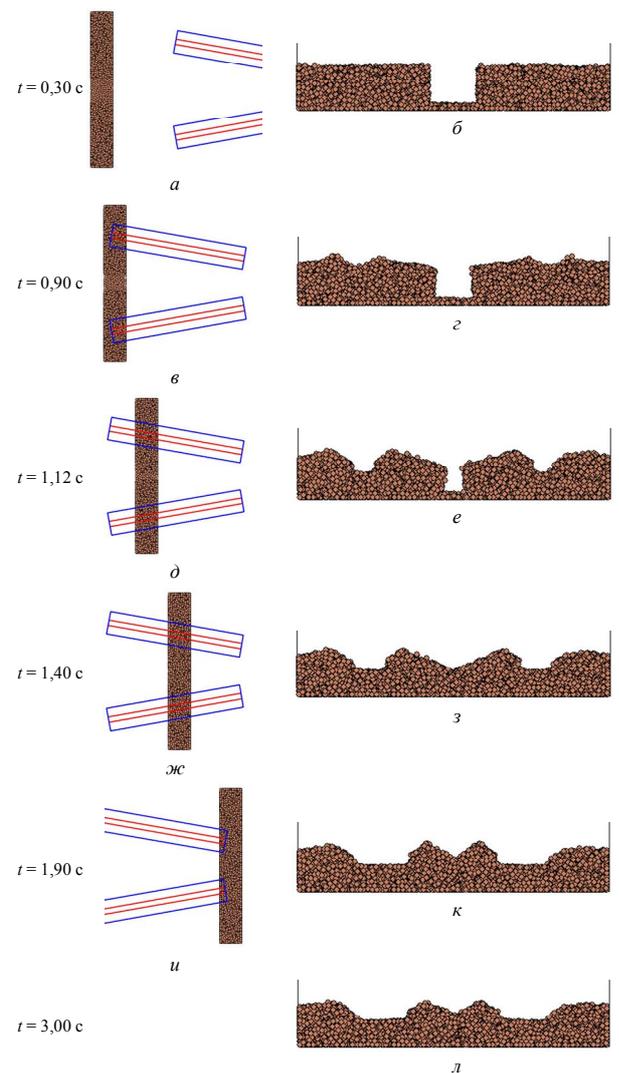


Рис. 6. Движение загортача в процессе базового компьютерного эксперимента относительно фрагмента почвы (а, в, д, ж, и) и соответствующие профили засыпанной бороздки (б, в, е, з, к, л)

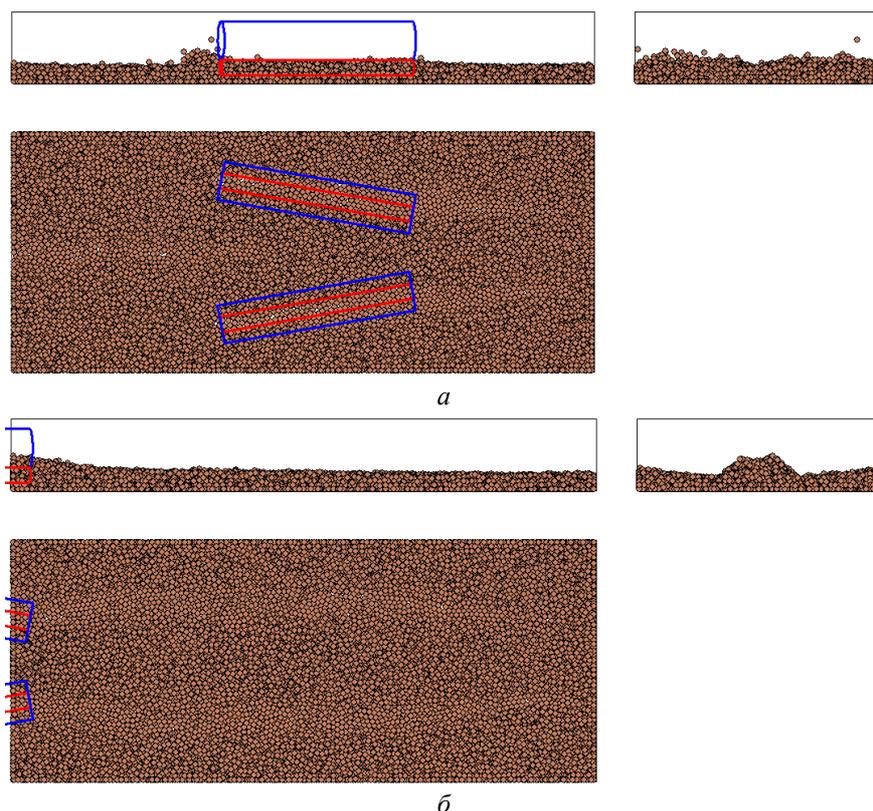


Рис. 7. Компьютерный эксперимент по заделке бороздки в протяженном фрагменте почвы:
а – в процессе заделки; *б* – после прохода загортача

Библиографический список

1. Бартнев, И. М. Совершенствование технологий и средств механизации лесовосстановления [Текст] / И. М. Бартнев, М. В. Драпалюк, В. И. Казаков. – М. : ФЛИНТА : Наука, 2013. – 208 с.
2. Василенко, В. В. Расчет рабочих органов почвообрабатывающих и посевных машин [Текст]: учеб. пособие / В. В. Василенко. – Воронеж : Изд-во ВП, 1994. – 288 с.
3. Гулд, Х. Компьютерное моделирование в физике. Ч. 2 [Текст] / Х. Гулд, Я. Тобочник. – М. : Мир, 1990. – 400 с.
4. Инженерные расчеты на ЭВМ [Текст] : справ. пособие / под ред. В. А. Троицкого. – Л. : Машиностроение, 1979. – 288 с.
5. Казаков, В. И. Технологии и механизация выращивания посадочного материала в питомниках лесной зоны [Текст] / В. И. Казаков. – М., 2001. – 186 с.
6. Кривцов, А. М. Деформирование и разрушение тел с микроструктурой [Текст] / А. М. Кривцов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 304 с.
7. Лагарьков, А. Н. Метод молекулярной динамики в статистической физике [Текст] / А. Н. Лагарьков, В. М. Сергеев // УФН. – 1978. – Т. 125. – № 7. – С. 409–448.
8. Полухин, В. А. Компьютерное моделирование динамики и структуры жидких металлов [Текст] / В. А. Полухин, В. Ф. Ухов, М. М. Дзугутов. – М. : Наука, 1981. – 323 с.
9. Пошарников, Ф. В. Перспективные технологии выращивания лесопосадочного материала [Текст] / Ф. В. Пошарников, И. В. Казаков. – Воронеж, 2007. – 290 с.
10. Советов, Б. Я. Моделирование систем [Текст] : учеб. пособие / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М. : Высш. шк., 1998. – 319 с.
11. Хеерман, Д. В. Методы компьютерного эксперимента в теоретической физике [Текст] / Д. В. Хеерман. – М. : Наука, 1990. – 176 с.
12. Allen, M. P. Computer Simulation of Liquids / M. P. Allen, D. J. Tildesley. – Oxford : Clarendon Press, 1987. – 408 p.

13. Hafner, J. Atomic-Scale Computation Materials Science / J Hafner // Acta Mater. – 2000. – Vol. 48. – P. 71-92.
14. Hoover, W. G. Atomistic Nonequilibrium Computer Simulations / W. G. Hoover // Physica A. – 1983. – Vol. 118. – P. 111-122.
15. Monaghan, J. Smoothed Particle Hydrodynamics / J. Monaghan // Annu. Rev. Astron. Astrophys. – 1992. – Vol. 30. – P. 543-574.

References

1. Bartenev, I. M., Drapaljuk M. V., Kazakov V. I. *Sovershenstvovanie tehnologij i sredstv mehanizacii lesovosstanovlenija* [Improvement of technologies and means of mechanization of forest regeneration]. Moscow, 2013, 208 p. (In Russian)
2. Vasilenko V. V. *Raschet rabochih organov pochvoobrabatyvayushchih i posevnyh mashin* [Calculation of working bodies of tillage and sowing machines: proc. The Manual]. Voronezh: Publishing house VP, 1994. 288 p. (In Russian)
3. Guld H., Tобоchnik Ya. *Komp'yuternoe modelirovanie v fizike* [Computer simulation in physics. Part 2]. M.: World, 1990. 400 p. (In Russian)
4. *Engineering calculations on a computer* [Engineering calculations on a computer: reference book / Under the editorship of V. A. Troitsky]. L.: Mechanical Engineering, 1979. 288 p. (In Russian)
5. Kazakov V. I. *Tehnologii i mehanizacija vyrashhivaniya posadochnogo materiala v pitomnikah lesnoj zony* [Technology and mechanization of cultivation of planting material in nurseries of the forest zone]. Moscow, 2001, 186 p. (In Russian)
6. Krivcov A. M. *Deformirovanie i razrushenie tel s mikrostrukturaj*. [Deformation and fracture of bodies with microstructure]. M.: FIZMATLIT, 2007. 304 p. (In Russian)
7. Lagarkov A. N., Sergeev V. M. *Metod molekulyarnoj dinamiki v statisticheskoj fizike*. [Method of molecular dynamics in statistical physics]. UFN. 1978. Vol. 125. № 7. P. 409-448. (In Russian)
8. Poluhin V. A., Uhov V. F., Dzugutov M. M. *Komp'yuternoe modelirovanie dinamiki i struktury zhidkih metallov* [Computer simulation of dynamics and structure of liquid metals]. Moscow: Science, 1981. 323 p. (In Russian)
9. Posharnikov F. V., Kazakov I. V. *Perspektivnye tehnologii vyrashchivaniya lesoposadochnogo materiala*. [Perspective technologies of cultivation of planting stock]. Voronezh, 2007. 290 p. (In Russian)
10. Sovetov B. Ya. *Modelirovanie sistem* [System Modeling : textbook]. M. : Vyssh. Shk., 1998. 319 p. (In Russian)
11. Heerman D. V. *Metody komp'yuternogo eksperimenta v teoreticheskoj fizike* [Methods of computer experiment in theoretical physics]. Moscow: Science, 1990. 176 p. (In Russian)
12. Allen M. P., Tildesley D. J. *Computer Simulation of Liquids*. Oxford: Clarendon Press, 1987. 408 p.
13. Hafner J. Atomic-Scale Computer Science // Acta Mater. 2000. Vol. 48. P. 71-92.
14. Hoover W. G. Atomistic Nonequilibrium Computer Simulations // Physica A. 1983. Vol. 118. P. 111-122.
15. Monaghan J. Smoothed Particle Hydrodynamics // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1992. Vol. 30. P. 543-574.

Сведения об авторе

Казakov Игорь Владимирович – заведующий отделом механизации лесохозяйственных работ и стандартизации ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства», кандидат технических наук, г. Пушкино, Российская Федерация; e-mail: igor.kazakov2015@bk.ru.

Information about the author

Kazakov Igor Vladimirovich – Head of the Department of mechanization of forestry works and standardization, FBI «All-Russian Research Institute of Forestry and Mechanization of Forestry», PhD (Engineering), Pushkino, Russian Federation; e-mail: igor.kazakov2015@bk.ru.