

УДК: 631.311, 004.94

Компьютерное моделирование процесса обработки почвы рабочими органами почвообрабатывающих машин

М. Н. Лысыч

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова,
Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8

E-mail: miklynea@yandex.ru

Получено 03.02.2020, после доработки — 03.03.2020.

Принято к публикации 11.03.2020.

В работе анализируются методы исследования процесса взаимодействия почвенных сред с рабочими органами почвообрабатывающих машин. Подробно рассмотрены математические методы численного моделирования, позволяющие преодолеть недостатки аналитических и эмпирических подходов. Приводятся классификация и обзор возможностей континуальных (FEM — метод конечных элементов, CFD — вычислительная гидродинамика) и дискретных (DEM — метод дискретных элементов, SPH — гидродинамика сглаженных частиц) численных методов. На основе метода дискретных элементов разработана математическая модель, представляющая почву, в виде множества взаимодействующих сферических элементов малых размеров. Рабочие поверхности почвообрабатывающего орудия в рамках конечноэлементного приближения представлены в виде совокупности элементарных треугольников. В модели рассчитывается движение элементов почвы под действием сил контакта элементов почвы друг с другом и с рабочими поверхностями орудия (упругие силы, силы сухого и вязкого трения). Это дает возможность оценивать влияние геометрических параметров рабочих органов, технологических параметров процесса и параметров почвы на геометрические показатели смещения почвы, показатели самоустановки орудия, силовые нагрузки, показатели качества рыхления и пространственное распределение показателей. Всего исследуются 22 показателя (или распределение показателя в пространстве). Возможности математической модели демонстрируются на примере комплексного исследования процесса обработки почвы дисковой культиваторной батареей. В компьютерном эксперименте использованы виртуальный почвенный канал размером 5×1.4 м и 3D-модель дисковой культиваторной батареи. Радиус почвенных частиц принимался равным 18 мм, скорость рабочего органа — 1 м/с, общее время моделирования — 5 с. Глубина обработки составляла 10 см при углах атаки 10, 15, 20, 25 и 30°. Проверка достоверности результатов моделирования производилась на лабораторной установке, для объемного динамометрирования, путем исследования натурального образца, выполненного в полном соответствии с исследованной 3D-моделью. Контроль осуществлялся по трем составляющим вектора тягового сопротивления: F_x , F_y и F_z . Сравнение данных, полученных экспериментальным путем, с данными моделирования показало, что расхождение составляет не более 22.2 %, при этом во всех случаях максимальные значения наблюдались при углах атаки 30°. Хорошая согласуемость данных по трем ключевым силовым параметрам подтверждает достоверность всего комплекса исследованных показателей.

Ключевые слова: почвообрабатывающие орудия, метод дискретных элементов, дисковая культиваторная батарея, математическая модель, виртуальный эксперимент, силовые характеристики, показатели качества

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00920.

UDC: 631.311, 004.94

Computer simulation of the process soil treatment by tillage tools of soil processing machines

M. N. Lysych

Voronezh State University of Forestry and Technologies named G. F. Morozov,
8 Timiryazeva st., Voronezh, 394087, Russia

E-mail: miklynea@yandex.ru

Received 03.02.2020, after completion — 03.03.2020.

Accepted for publication 11.03.2020.

The paper analyzes the methods of studying the process of interaction of soil environments with the tillage tools of soil processing machines. The mathematical methods of numerical modeling are considered in detail, which make it possible to overcome the disadvantages of analytical and empirical approaches. A classification and overview of the possibilities the continuous (FEM — finite element method, CFD — computational fluid dynamics) and discrete (DEM — discrete element method, SPH — hydrodynamics of smoothed particles) numerical methods is presented. Based on the discrete element method, a mathematical model has been developed that represents the soil in the form of a set of interacting small spherical elements. The working surfaces of the tillage tool are presented in the framework of the finite element approximation in the form of a combination of many elementary triangles. The model calculates the movement of soil elements under the action of contact forces of soil elements with each other and with the working surfaces of the tillage tool (elastic forces, dry and viscous friction forces). This makes it possible to assess the influence of the geometric parameters of the tillage tools, technological parameters of the process and soil parameters on the geometric indicators of soil displacement, indicators of the self-installation of tools, power loads, quality indicators of loosening and spatial distribution of indicators. A total of 22 indicators were investigated (or the distribution of the indicator in space). This makes it possible to reproduce changes in the state of the system of elements of the soil (soil cultivation process) and determine the total mechanical effect of the elements on the moving tillage tools of the implement. A demonstration of the capabilities of the mathematical model is given by the example of a study of soil cultivation with a disk cultivator battery. In the computer experiment, a virtual soil channel of 5×1.4 m in size and a 3D model of a disk cultivator battery were used. The radius of the soil particles was taken to be 18 mm, the speed of the tillage tool was 1 m/s, the total simulation time was 5 s. The processing depth was 10 cm at angles of attack of 10, 15, 20, 25 and 30°. The verification of the reliability of the simulation results was carried out on a laboratory stand for volumetric dynamometry by examining a full-scale sample, made in full accordance with the investigated 3D-model. The control was carried out according to three components of the traction resistance vector: F_x , F_y and F_z . Comparison of the data obtained experimentally with the simulation data showed that the discrepancy is not more than 22.2%, while in all cases the maximum discrepancy was observed at angles of attack of the disk battery of 30°. Good consistency of data on three key power parameters confirms the reliability of the whole complex of studied indicators.

Keywords: tillage implements, discrete element method, disk cultivator tool, mathematical model, virtual experiment, power characteristics, quality indicators

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 607–627 (Russian).

The work was supported by RFBR according to the research project No. 18-38-00920.

1. Введение

Процесс обработки почвы орудием является чрезвычайно сложным с точки зрения физики, геометрии и математического анализа. Для адекватного представления в модели процесса обработки почвы необходимо учитывать геометрическую конфигурацию орудия и структурно-механические свойства почвы. Поэтому математическая модель должна обладать высоким пространственным разрешением для корректного воспроизведения почвы и формы рабочих органов, а также достаточным временным разрешением для описания перемещений почвы под действием орудия.

На данный момент существует несколько различных методов математического моделирования процесса взаимодействия почвы с рабочими органами почвообрабатывающих машин.

Классическая почвенная механика рассматривает большинство рабочих органов почвообрабатывающих орудий как разновидности двугранного или трехгранного клина. Поэтому предполагается, что, исследовав характер деформаций почвы при воздействии на них клина, можно перейти к изучению деформаций почвы, возникающих при работе почвообрабатывающих и землеройных орудий. Наиболее распространенной схемой взаимодействия клина с почвой в настоящее время является схема процесса деформации пласта клином, предложенная В. П. Горячкиным [Горячкин, 1965а, 1965b], Пановым и Синеоковым [Синеоков, Панов, 1977]. Так, Г. Н. Синеоков рассматривает модель, уподобляющую пласт твердому упругому телу. Л. В. Гячев предлагает две модели пласта: недеформируемый пласт, подобный абсолютно твердому телу, и деформируемый пласт, в котором абсолютные перемещения частиц совпадают с направлением действия сил [Гячев, 1961]. Эти исследования характеризуются узкой направленностью и проблематичностью их применения для рабочих органов со сложной пространственной геометрией.

Другой подход, получивший интенсивное развитие в связи с ростом вычислительных возможностей компьютерной техники и развитием САПР, заключается в применении методов численного моделирования (рис. 1). Здесь можно выделить два типа методов: континуальные и дискретные.

К континуальным методам относится метод конечных элементов (FEM — Finite Element Method), заключающийся в разбиении на конечное количество подобластей (элементов) области, в которой ищется решение дифференциальных уравнений. Данный метод нашел достаточно широкое применение в исследованиях процессов обработки почвы [Bentaher et al., 2013; Ibrahmi et al., 2015, 2017; Ovsyanko, Petrovsky, 2014; Tagar et al., 2015].

Анализ исследований, выполненных с применением континуальных методов, показывает, что достоверность получаемых сил даже при использовании нелинейных моделей почвы недостаточна. Движение почвенных агрегатов воспроизводится либо недостоверно, либо весьма грубо.

Также к континуальным методам относится вычислительная гидродинамика (CFD — Computational Fluid Dynamics). Это подраздел механики сплошных сред, включающий совокупность физических, математических и численных методов, предназначенных для вычисления характеристик потоковых процессов. Данный метод нашел значительно меньшее распространение при исследовании почвенных взаимодействий из-за значительных погрешностей получаемых сил и отсутствия возможности оценки движения почвенных агрегатов [Bartzanas et al., 2013; Karmakar et al., 2007; Karmakar, Kushwaha, 2005; Subrata, 2005; Tenu et al., 2012].

Таким образом, использование континуальных численных методов не всегда дает достоверный результат из-за предположения о непрерывности почвенной среды.

Наиболее эффективно преодолевают недостатки непрерывных численных методов метод дискретных элементов (DEM — Discrete Element Method) и схожий с ним метод динамики частиц. Они могут достоверно описывать разрушение почвы, деформацию и смещение почвенных агрегатов, а также позволяют получать различные силовые характеристики [Chen, Li, 2017; Chen et al., 2013; Hang et al., 2017; Kornel, 2018; Li et al., 2014; López et al., 2014; Mak et al., 2012; Milkevych et al., 2018; Shahgoli, Shahi, 2011; Tanaka et al., 2007; Ucgul et al., 2018].

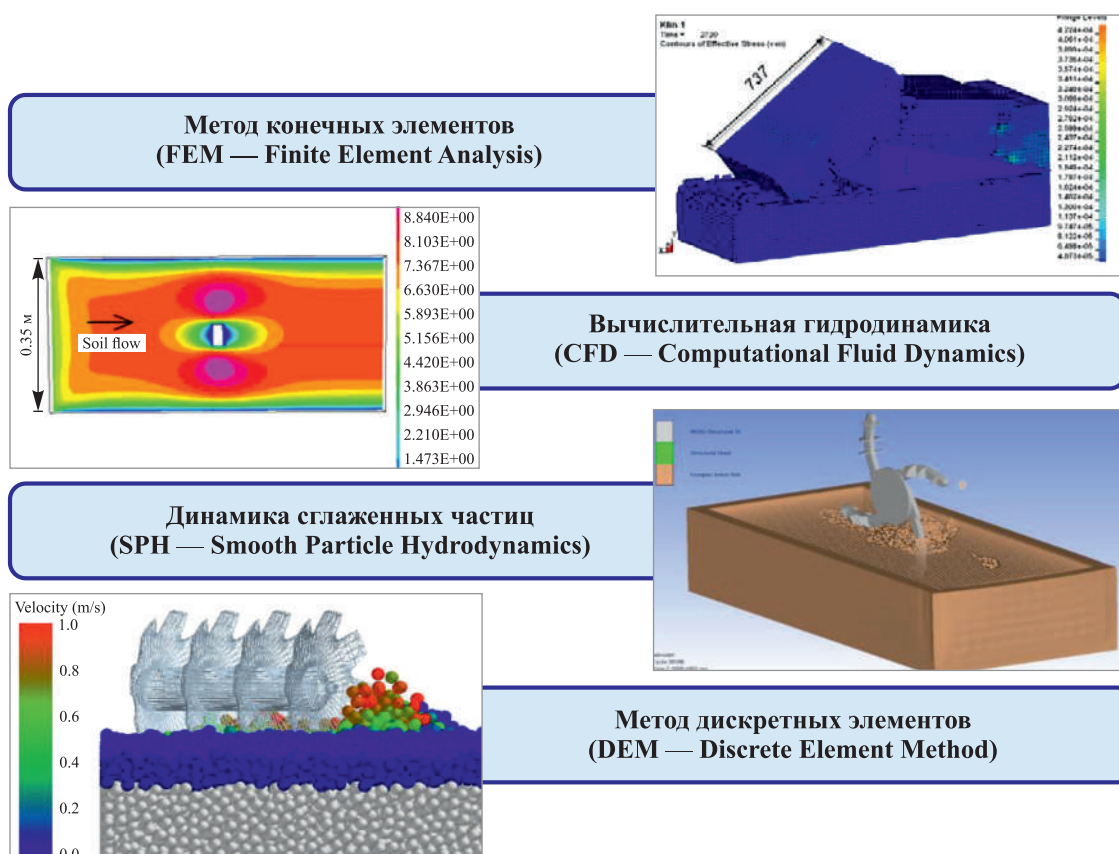


Рис. 1. Численные методы, применяемые для моделирования взаимодействий «почва – рабочий орган»

Также в последнее время появились исследования по моделированию почвенных сред с использованием метода динамики сглаженных частиц (SPH — Smooth Particle Hydrodynamics). Он позволяет получать результаты, приближающиеся по достоверности к методу дискретных элементов при меньших временных затратах [Gao, Jin, 2011; Major, Csanády, 2014; Urbán et al., 2002].

2. Материалы и методы

2.1. Описание взаимодействующих элементов

В исследовании используется метод динамики частиц, который в последние годы широко применяется при моделировании разнообразных сред. В рамках метода почва представляется как совокупность множества (порядка 10^3 – 10^5) шарообразных элементов диаметром порядка 10^{-4} – 10^{-3} м. Каждый элемент имитирует либо крупную частицу почвы, либо некоторый объем почвы, ведущий себя как единое целое (рис. 2) [Coetzee, 2017; EDEM 2.4. User Guide, 2011].

В рамках конечноэлементного приближения рабочие поверхности почвообрабатывающего орудия представляются в виде совокупности множества элементарных треугольников (более 100).

На рис. 3, а представлена детализированная 3D-модель дискового культиваторного рабочего органа, созданная в САПР SolidWorks. С целью оптимизации процесса численного моделирования геометрия модели была упрощена (рис. 3, б). Удалялись все элементы, не взаимодействующие с почвенной средой. Геометрия рабочих поверхностей не подвергалась изменению. Далее упрощенная модель экспортировалась в формат STL. Для свободного доступа к данным производилась конвертация в открытый формат OBJ (содержит позицию каждой

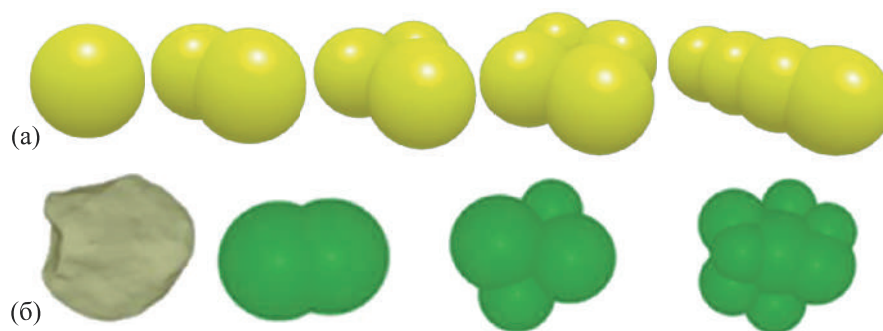


Рис. 2. Представление частиц в виде сфер и их совокупности: а) частицы библиотеки программы EDEM; б) пользовательские частицы, создаваемые по 3D-модели

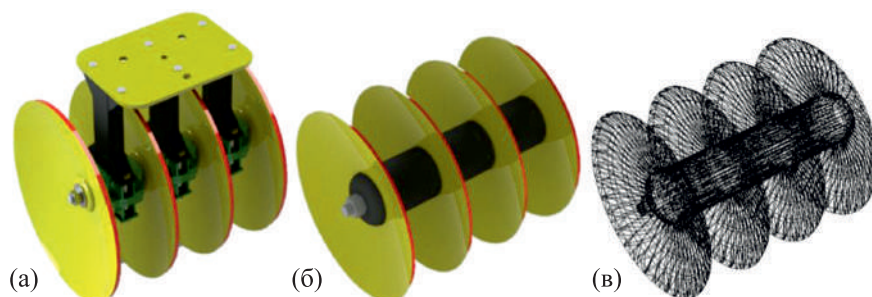


Рис. 3. Модель рабочего органа: а) исходная модель; б) упрощенная модель; в) расчетная модель

вершины, нормаль для каждой вершины, а также параметры, создающие полигоны) средствами программы Blender. Там же оптимизировалось число полигонов с применением модификатора Decimate, позволяющего уменьшать количество вершин и граней с минимальными изменениями формы объекта, что, практически не влияя на точность расчетов, значительно их ускоряет.

2.2. Описание механического движения элементов почвы

При контакте элементов почвы друг с другом и с рабочими поверхностями орудия возникают упругие силы, а также силы сухого и вязкого трения (рис. 4). С использованием этой модели рассчитывается движение элементов почвы под действием указанных сил. В модели воспроизводится изменение состояния системы элементов почвы (процесс обработки почвы) и определяется их суммарное механическое воздействие на движущиеся рабочие органы, позволяя рассчитать потребляемую мощность.

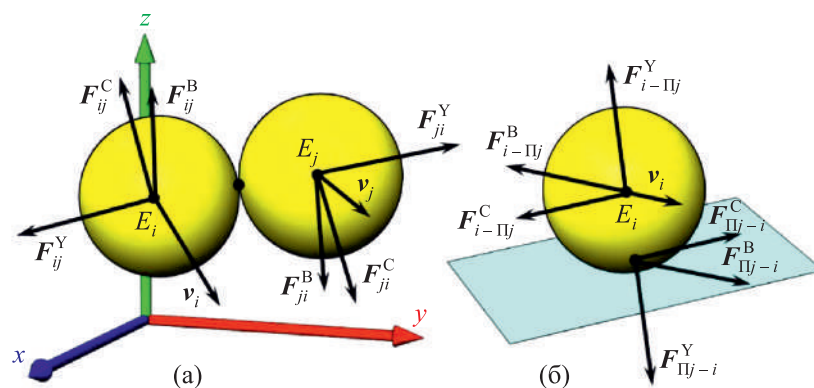


Рис. 4. Схемы силового контакта элементов почвы: а) силы, возникающие при контакте двух элементов почвы; б) силы, возникающие при контакте элемента почвы и поверхности рабочего органа; F^Y — упругие силы; F^C и F^B — силы сухого и вязкого трения (векторные величины обозначены жирным шрифтом)

Моделирование производится в трехмерном декартовом пространстве (x, y, z) . Состояние каждого элемента E_i задается шестью переменными: координатами его центра (x_i, y_i, z_i) и компонентами скорости (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) .

Уравнения движения элементов составлены на основе второго закона Ньютона:

$$\begin{aligned}
 & i=1 \dots N_3; \\
 & m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_3} \left\{ c_{ij} \left(\frac{d_i + d_j}{2} - r_{ij} \right) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{xi} - v_{xj}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_j|} + k_{ij}^B (v_{xi} - v_{xj}) \right) c_{ij} \left(r_{ij} - \alpha_n \frac{d_i + d_j}{2} \right), r_{ij} < \alpha_n \frac{d_i + d_j}{2}, \right. \\
 & \left. 0, r_{ij} \geq \alpha_n \frac{d_i + d_j}{2} \right\} + \\
 & + \sum_{j=1}^{N_{\Pi}} \left\{ c_{i-\Pi j} \left(\frac{d_i}{2} - r_{i-\Pi j} \right) \frac{(x_i - x_{i-\Pi j})}{r_{i-\Pi j}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{xi} - v_{x\Pi j}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_{\Pi j}|} + k_{ij}^B (v_{xi} - v_{x\Pi j}) \right) c_{ij} \left(r_{i-\Pi j} - \alpha_n \frac{d_i}{2} \right), r_{i-\Pi j} < \alpha_n \frac{d_i}{2}, \right. \\
 & \left. 0, r_{i-\Pi j} \geq \alpha_n \frac{d_i}{2} \right\}, \\
 & m_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_3} \left\{ c_{ij} \left(\frac{d_i + d_j}{2} - r_{ij} \right) \frac{(y_i - y_j)}{r_{ij}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{yi} - v_{yj}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_j|} + k_{ij}^B (v_{yi} - v_{yj}) \right) c_{ij} \left(r_{ij} - \alpha_n \frac{d_i + d_j}{2} \right), r_{ij} < \alpha_n \frac{d_i + d_j}{2}, \right. \\
 & \left. 0, r_{ij} \geq \alpha_n \frac{d_i + d_j}{2}; \right\} + \\
 & + \sum_{j=1}^{N_{\Pi}} \left\{ c_{i-\Pi j} \left(\frac{d_i}{2} - r_{i-\Pi j} \right) \frac{(y_i - y_{i-\Pi j})}{r_{i-\Pi j}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{yi} - v_{y\Pi j}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_{\Pi j}|} + k_{ij}^B (v_{yi} - v_{y\Pi j}) \right) c_{ij} \left(r_{i-\Pi j} - \alpha_n \frac{d_i}{2} \right), r_{i-\Pi j} < \alpha_n \frac{d_i}{2}, \right. \\
 & \left. 0, r_{i-\Pi j} \geq \alpha_n \frac{d_i}{2} \right\}, \\
 & m_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_3} \left\{ c_{ij} \left(\frac{d_i + d_j}{2} - r_{ij} \right) \frac{(z_i - z_j)}{r_{ij}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{zi} - v_{zj}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_j|} + k_{ij}^B (v_{zi} - v_{zj}) \right) c_{ij} \left(r_{ij} - \alpha_n \frac{d_i + d_j}{2} \right), r_{ij} < \alpha_n \frac{d_i + d_j}{2}, \right. \\
 & \left. 0, r_{ij} \geq \alpha_n \frac{d_i + d_j}{2} \right\} + \\
 & + \sum_{j=1}^{N_{\Pi}} \left\{ c_{i-\Pi j} \left(\frac{d_i}{2} - r_{i-\Pi j} \right) \frac{(z_i - z_{i-\Pi j})}{r_{i-\Pi j}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{zi} - v_{z\Pi j}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_{\Pi j}|} + k_{ij}^B (v_{zi} - v_{z\Pi j}) \right) c_{ij} \left(r_{i-\Pi j} - \alpha_n \frac{d_i}{2} \right), r_{i-\Pi j} < \alpha_n \frac{d_i}{2}, \right. \\
 & \left. 0, r_{i-\Pi j} \geq \alpha_n \frac{d_i}{2} \right\} - m_i g,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где i — номер элемента почвы,

N_3 — количество элементов почвы,

m_i — масса элемента почвы,

t — время,

j — номер элемента почвы, возможно контактирующего с i -м элементом почвы,

c_{ij} — коэффициент жесткости взаимодействия элементов почвы i и j (рассчитывается через модули упругости почвы),

k_{ij}^C и k_{ij}^B — коэффициенты сухого трения элементов почвы i и j друг о друга,

d_i — диаметр i -го элемента почвы,

r_{ij} — расстояние между центрами элементов почвы i и j ,

α_n — коэффициент ограничения взаимодействия между элементами почвы (выбирается из диапазона 1.0...1.1 и позволяет задавать «липкость» элементов почвы),

N_{Π} — количество элементарных поверхностей рабочего органа,
 $c_{i-\Pi j}$, $k_{i-\Pi j}^C$ и $k_{i-\Pi j}^B$ — коэффициенты жесткости сухого и вязкого трения при взаимодействии элемента почвы i с поверхностью рабочего органа j ,
 $r_{i-\Pi j}$ — расстояние от центра i -го элемента почвы до j -й поверхности рабочего органа,
 $x_{i-\Pi j}$, $y_{i-\Pi j}$, $z_{i-\Pi j}$ — декартовы координаты точки-проекции центра элемента почвы i на поверхность рабочего органа j ,
 $v_{x\Pi j}$, $v_{y\Pi j}$, $v_{z\Pi j}$ — компоненты скорости центра j -й элементарной поверхности рабочего органа,
 $|\dots|$ — модуль вектора,
 g — ускорение свободного падения.

2.3. Описание взаимодействия элементов почвы с рабочими поверхностями почвообрабатывающего орудия

Поверхности исследуемых рабочих органов представлены в модели совокупностью порядка $10^2 \dots 10^3$ элементарных треугольников. Элементарные треугольники совершают в пространстве поступательное и вращательное движение.

Если элементарная треугольная поверхность рабочего органа Π_j контактирует с элементом почвы i , в соответствии с уравнением (1) между ними возникают упругие силы отталкивания (или притяжения при попытке разделения элементов почвы, что задается коэффициентом α_0) и силы сухого и вязкого трения. Силы, действующие на элемент почвы, приводят к изменению его траектории движения, а противоположные им силы, действующие на треугольные поверхности рабочего органа, позволяют рассчитать суммарное сопротивление движению рабочего органа и затем потребляемую им мощность, а также воспроизвести процессы с обратной связью, например самоустановку почвообрабатывающего орудия по глубине, вращение дисковой батареи под действием набегающего потока почвы.

Для расчета указанных сил необходимо определить, контактирует ли элемент почвы с треугольной элементарной поверхностью, и если контактирует, то контактирует ли с центральной частью треугольника (вариант *I*), с ребром (вариант *II*) или с вершиной треугольника (вариант *III*) (рис. 5).

Если центр элемента попадает в области 1, 3, 5, то элемент почвы взаимодействует с ребром элементарной треугольной поверхности. Если попадает в области 2, 4, 6 — взаимодействует с вершиной элементарной треугольной поверхности.

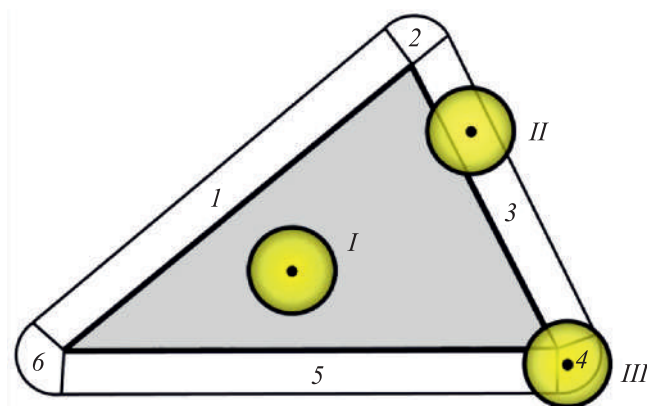


Рис. 5. Возможные варианты взаимодействия элемента почвы с элементарной треугольной поверхностью рабочего органа: *I* — с плоскостью, *II* — с ребром, *III* — с вершиной; 1–6 — области взаимодействия

Далее определяются расстояние $r_{i-Пj}$ от элемента почвы до плоскости, позволяющее считать величину упругой силы отталкивания, и направление действия силы, задаваемое отрезком $E_i - E_{ипр}$, где E_i и $E_{ипр}$ — центр элемента и проекция центра элемента на плоскость элементарной поверхности (в варианте II определяется проекция на ребро, в варианте III в качестве $E_{ипр}$ используется вершина треугольника).

2.4. Программная реализация модели

Для реализации расчета по представленным выше формулам и удобства проведения серий компьютерных экспериментов разработана компьютерная программа «Программа для моделирования обработки почвы почвообрабатывающим орудием» на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7.

Программа предназначена для многократного проведения компьютерных экспериментов по обработке почвы заданным рабочим органом, определения показателей качества и потребляемой мощности. Это позволяет определять оптимальные конструктивные параметры рабочего органа и технологические параметры процесса обработки почв различных типов. Программа применима для разнообразных рабочих органов, подключаемых с помощью файлов формата OBJ, и широкого спектра почв с различными структурно-механическими свойствами: от каменистых и песчаных до глинистых и черноземных почв в вязком состоянии.

2.5. Комплексный анализ процесса обработки почвы

Как правило, к выходным параметрам эффективности обработки почвы относят показатели производительности, качества обработки, энергетических (или экономических) затрат. В соответствии с этим составлена схема влияния входных параметров модели на выходные характеристики, которая далее является основой теоретического исследования (рис. 6).

Входные параметры можно разделить на три группы. К первой группе относятся параметры рабочего органа:

Φ — форма (геометрическая конфигурация) рабочего органа,

$m_{ор}$ — масса орудия, приведенная к рабочему органу,

α, β — углы ориентации рабочего органа в пространстве.

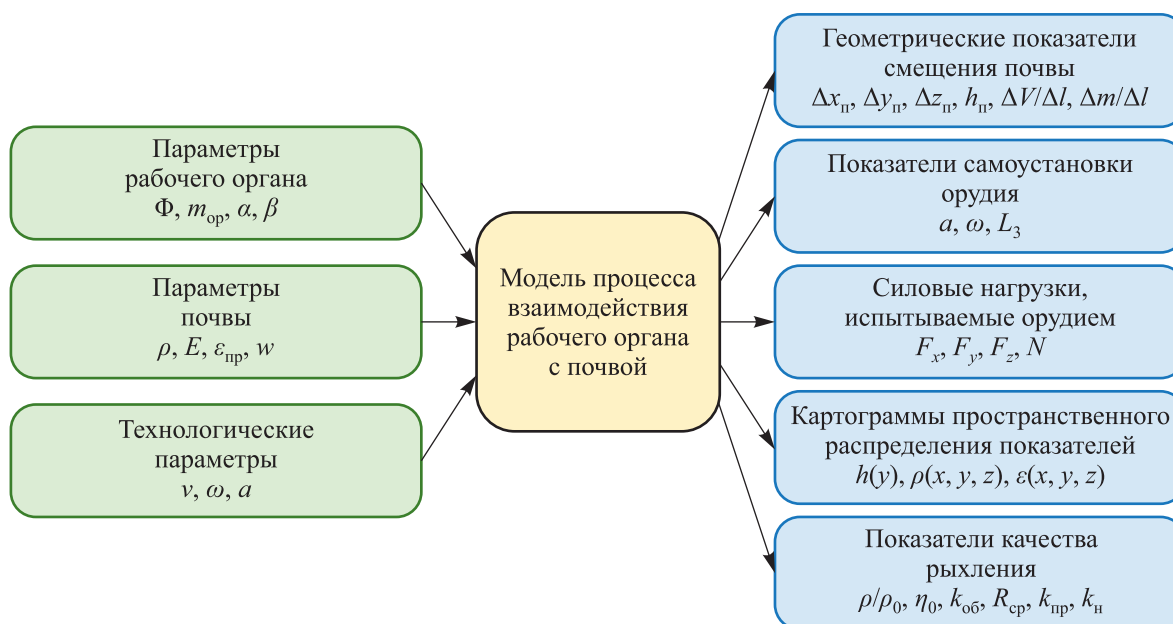


Рис. 6. Входные параметры и выходные характеристики математической модели

Ко второй группе входных параметров относятся структурно-механические параметры почвы:

ρ — плотность почвы,
 E — модуль упругости почвы,
 $\varepsilon_{пр}$ — предельная деформация почвы при испытании на растяжение,
 w — влажность почвы.

Третья группа входных параметров представляет собой технологические параметры:

v — скорость движения орудия (агрегата в целом),
 ω — частота принудительного вращения (для осесимметричных рабочих органов с приводом),
 a — величина принудительного заглубления орудия.

Эффективность работы почвообрабатывающего орудия характеризуется пятью группами показателей.

1. Геометрические показатели смещения почвы:

$\Delta x_{п}$ — среднее смещение почвы в продольном направлении,
 $\Delta y_{п}$ — среднее смещение почвы в боковом направлении,
 $\Delta z_{п}$ — среднее смещение почвы в вертикальном направлении,
 $h_{п}$ — высота пласта над исходной поверхностью почвы,
 $\Delta V/\Delta l$ — удельный объем перемещаемой почвы (объем на единицу длины пути),
 $\Delta m/\Delta l$ — удельная масса перемещаемой почвы (масса на единицу длины пути).

2. Показатели самоустановки орудия:

a — величина самопроизвольного заглубления орудия,
 ω — установившаяся угловая скорость диска (дисковой батареи),
 L_z — длина заглубления орудия, изначально помещенного на поверхность почвы.

3. Силовые параметры процесса:

F_x — средняя сила тяги,
 F_y — средняя сила бокового смещения,
 F_z — выглубляющая сила,
 N — средняя потребляемая мощность.

4. Картограммы пространственного распределения показателей:

$h(y)$ — профиль борозды (зависимость высоты пласта h от поперечной координаты y),
 $\rho(x, y, z)$ — распределение плотности почвы в пространстве вблизи орудия,
 $\varepsilon(x, y, z)$ — распределение деформаций почвы в пространстве вблизи орудия.

5. Показатели качества рыхления:

ρ/ρ_0 — относительная плотность обработанной почвы,
 η_p — КПД рыхления (отношение полезной мощности, направленной на рыхление почвы, к общей потребляемой мощности),

$k_{об}$ — коэффициент оборачиваемости пласта почвы,
 $R_{ср}$ — средний размер почвенных частиц при рыхлении,
 $k_{пр}$ — коэффициент полноты разрушения почвенных частиц,
 k_n — коэффициент неоднородности рыхления почвы в продольном направлении.

Дальнейшее теоретическое исследование заключается в исследовании влияния параметров рабочего органа, почвы и технологических параметров на пять групп показателей эффективности процесса обработки почвы.

Перечисленные выше показатели эффективности рассчитывались следующим образом.

Для расчета среднего смещения почвы в продольном направлении $\Delta x_{п}$ необходимо определить, какие элементы почвы явно смещены, и усреднить величины их смещения в продольном направлении x . Элемент почвы i считается смещенным орудием, если его смещение в пространстве за время компьютерного эксперимента превышает определенную пороговую величину ξ (для определенности в расчетах принято $\xi = 5$ мм):

$$\sqrt{(x_i(t_k) - x_i(t_n))^2 + (y_i(t_k) - y_i(t_n))^2 + (z_i(t_k) - z_i(t_n))^2} > \xi, \quad (2)$$

где t_n и t_k — моменты времени, в которые начинается и оканчивается компьютерный эксперимент.

Среднее смещение почвы Δx_n рассчитывается путем усреднения по всем смещенным элементам:

$$\Delta x_n = \frac{\sum_{i=1}^{N_3} \begin{cases} x_i(t_k) - x_i(t_n), & \sqrt{(x_i(t_k) - x_i(t_n))^2 + (y_i(t_k) - y_i(t_n))^2 + (z_i(t_k) - z_i(t_n))^2} > \xi, \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}}{\sum_{i=1}^{N_3} \begin{cases} 1, & \sqrt{(x_i(t_k) - x_i(t_n))^2 + (y_i(t_k) - y_i(t_n))^2 + (z_i(t_k) - z_i(t_n))^2} > \xi, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}}. \quad (3)$$

Аналогичным образом рассчитывается среднее смещение почвы в боковом Δy_n и вертикальном Δz_n направлениях.

Для расчета высоты пласта h_n над исходной поверхностью почвы необходимо определить максимальную высоту профиля обработанной почвы, в нескольких поперечных сечениях, вдоль обработанного участка почвы, и затем усреднить:

$$h_n = \frac{1}{N_{ty}} \sum_{k=1}^{N_{ty}} \begin{cases} \max_{i=1 \dots N_3} (z_i(t_k)), \\ \left\{ x_1 + \frac{k}{N_{ty}}(x_2 - x_1) - \frac{B_d}{2} < x_i(t_k) < x_1 + \frac{k}{N_{ty}}(x_2 - x_1) + \frac{B_d}{2} \right\} \end{cases} \quad (4)$$

где N_{ty} — количество точек усреднения (далее в расчетах использовалось $N_{ty} = 20$),

k — номер поперечного сечения,

x_1 и x_2 — координаты начала и конца участка однородно обработанной почвы,

B_d — ширина диапазона координат x элементов, в котором элемент считается принадлежащим сечению (далее в расчетах использовалось $B_d = 50$ мм).

Удельный объем $\Delta V / \Delta l$ перемещаемой почвы рассчитывается по формуле

$$\frac{\Delta V}{\Delta l} = \frac{\sum_{i=1}^{N_3} \begin{cases} \frac{\pi d_i^3}{3} k_\phi, & \begin{cases} \sqrt{(x_i(t_k) - x_i(t_n))^2 + (y_i(t_k) - y_i(t_n))^2 + (z_i(t_k) - z_i(t_n))^2} > \xi, \\ x_1 < x_i(t_n) < x_2, \end{cases} \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}}{x_2 - x_1}, \quad (5)$$

где k_ϕ — коэффициент перехода от объема шара к эквивалентному объему в плотной упаковке шаров.

Удельная масса перемещаемой почвы $\Delta m / \Delta l$ рассчитывается по формуле, аналогичной предыдущей:

$$\frac{\Delta m}{\Delta l} = \frac{\sum_{i=1}^{N_3} \begin{cases} m_i, & \begin{cases} \sqrt{(x_i(t_k) - x_i(t_n))^2 + (y_i(t_k) - y_i(t_n))^2 + (z_i(t_k) - z_i(t_n))^2} > \xi, \\ x_1 < x_i(t_n) < x_2 \end{cases} \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}}{x_2 - x_1}. \quad (6)$$

Для определения установившейся глубины обработки a и установившейся угловой скорости вращения диска (дисковой батареи) орудия ω необходимо в компьютерном эксперименте определить момент времени начала наблюдения t_n , к которому закончится переходной процесс погружения орудия и раскручивания диска (дисковой батареи):

$$t_n = t \left\{ \begin{aligned} & |a(t) - a(t-\tau)| < \Delta a_{\text{пор}}, \\ & |\omega(t) - \omega(t-\tau)| < \Delta \omega_{\text{пор}} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

где $\Delta a_{\text{пор}}$ и $\Delta \omega_{\text{пор}}$ — пороговые значения величины заглубления и угловой скорости (в дальнейших расчетах приняты $\Delta a_{\text{пор}} = 5$ мм и $\Delta \omega_{\text{пор}} = 0.314$ рад/с).

После определения момента времени начала наблюдения производится усреднение a и ω в интервале наблюдения $t_n \dots t_k$, при этом интервал наблюдения должен быть достаточно велик для минимизации случайной ошибки (в дальнейших расчетах интервал наблюдения составляет не менее 5 с):

$$a = \frac{1}{t_k - t_n} \int_{t_n}^{t_k} a(t) dt, \quad (8)$$

$$\omega = \frac{1}{t_k - t_n} \int_{t_n}^{t_k} \omega(t) dt. \quad (9)$$

Учитывая, что модель обработки почвы основана на дискретизации по времени с шагом Δt , интегралы в последних формулах рассчитываются численным методом — методом прямоугольников с тем же шагом Δt .

Длина L_z заглубления орудия, изначально помещенного на поверхность почвы, определяется по условию выхода глубины обработки на установившееся значение после прекращения переходного процесса заглубления:

$$L_z = x_{\text{ор}} \Big|_{|a(t) - a(t-\tau)| < \Delta a_{\text{пор}}} - x_{\text{ор}} \Big|_{a(t)=0}, \quad (10)$$

где $x_{\text{ор}}$ — продольная координата орудия.

Средние сила тяги F_x , сила бокового смещения F_y и выглубляющая сила F_z рассчитываются путем усреднения мгновенных значений сил $F_x(t)$, $F_y(t)$ и $F_z(t)$ за интервал времени наблюдения (установившегося движения) $t_n \dots t_k$:

$$F_x = \frac{1}{t_k - t_n} \int_{t_n}^{t_k} F_x(t) dt, \quad (11)$$

$$F_y = \frac{1}{t_k - t_n} \int_{t_n}^{t_k} F_y(t) dt, \quad (12)$$

$$F_z = \frac{1}{t_k - t_n} \int_{t_n}^{t_k} F_z(t) dt. \quad (13)$$

Средняя потребляемая мощность N при постоянной скорости движения v агрегата определяется произведением силы тяги и скорости:

$$N = F_x \cdot v = \frac{v}{t_k - t_n} \int_{t_n}^{t_k} F_x(t) dt. \quad (14)$$

Для получения профиля борозды $h(y)$ необходимо построить функцию $h(y)$ в нескольких поперечных сечениях и усреднить их между собой. Это производится по формуле

$$h(y) = \frac{1}{N_{\text{ты}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{ты}}} \left\{ \begin{array}{l} \max_{i=1 \dots N_{\text{б}}} (z_i(t_k)), \\ x_1 + \frac{k}{N_{\text{ты}}} (x_2 - x_1) - \frac{B_{\text{д}}}{2} < x_i(t_k) < x_1 + \frac{k}{N_{\text{ты}}} (x_2 - x_1) + \frac{B_{\text{д}}}{2}, \\ y - B_y < x_i(t_k) < y + B_y \end{array} \right. \quad (15)$$

где $N_{\text{ты}}$ — количество точек усреднения (далее в расчетах использовалось $N_{\text{ты}} = 20$),

k — номер поперечного сечения,

x_1 и x_2 — координаты начала и конца участка однородно обработанной почвы, соответствующие моментам времени начала t_n и конца наблюдения t_k ,

B_d — ширина диапазона координат x элементов, в котором элемент считается принадлежащим сечению (далее в расчетах использовалось $B_d = 50$ мм),

B_y — ширина окна усреднения в поперечном направлении.

Функция распределения плотности почвы вблизи орудия $\rho(x, y, z)$ позволяет оценить качество рыхления почвы. Данная функция получается перемещением окна усреднения радиусом R_y , в котором определяется плотность по суммарной массе элементов почвы, попавших в объем окна:

$$\rho(x, y, z) = \frac{1}{\frac{4}{3}\pi R_y^3} \sum_{i=1}^{N_y} \begin{cases} m_i, & \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} < R_y, \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases} \quad (16)$$

Радиус окна усреднения в дальнейших расчетах выбирался из условия попадания в окно усреднения 10...20 элементов и составлял 0.05 м.

Аналогичным образом определяется функция распределения деформаций в почве в пространстве вблизи орудия $\varepsilon(x, y, z)$. При этом деформация ε определяется смещением элементов относительно их исходных положений, усредненным по количеству элементов, попадающих в окно усреднения.

$$\varepsilon(x, y, z) = \frac{\sum_{i=1}^{N_y} \begin{cases} \sqrt{(x_i(t_k) - x_i(t_n))^2 + (y_i(t_k) - y_i(t_n))^2 + (z_i(t_k) - z_i(t_n))^2}, \\ \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} < R_y, \\ 0 & \text{— в противном случае,} \end{cases}}{\sum_{i=1}^{N_y} \begin{cases} 1, & \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} < R_y, \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases}}. \quad (17)$$

Рассчитанная по данной формуле деформация ε измеряется в единицах длины и представляет собой не относительную деформацию, а абсолютную деформацию: среднее смещение почвы в данной точке (x, y, z) после обработки орудием.

Качество рыхления почвы характеризуется следующими шестью показателями. Для расчета относительной плотности ρ/ρ_0 обработанной почвы необходимо определить объем почвы, который подвергся обработке, и определить его плотность ρ . Это производится с помощью полученной ранее функции $\rho(x, y, z)$ и условия смещения элементов почвы (2).

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{\sum_{i=1}^{N_y} \begin{cases} \rho(x_i, y_i, z_i), & \sqrt{(x_i(t_k) - x_i(t_n))^2 + (y_i(t_k) - y_i(t_n))^2 + (z_i(t_k) - z_i(t_n))^2} > \xi, \\ 0 & \text{— в противном случае} \end{cases}}{\sum_{i=1}^{N_y} \begin{cases} 1, & \sqrt{(x_i(t_k) - x_i(t_n))^2 + (y_i(t_k) - y_i(t_n))^2 + (z_i(t_k) - z_i(t_n))^2} > \xi, \\ 0 & \text{— в противном случае} \end{cases}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_y} \begin{cases} \rho(x_i, y_i, z_i), & \sqrt{(x_i(t_k) - x_i(t_n))^2 + (y_i(t_k) - y_i(t_n))^2 + (z_i(t_k) - z_i(t_n))^2} < \xi, \\ 0 & \text{— в противном случае} \end{cases}}{\sum_{i=1}^{N_y} \begin{cases} 1, & \sqrt{(x_i(t_k) - x_i(t_n))^2 + (y_i(t_k) - y_i(t_n))^2 + (z_i(t_k) - z_i(t_n))^2} < \xi, \\ 0 & \text{— в противном случае} \end{cases}}. \quad (18)$$

Для расчета КПД (коэффициента полезного действия) рыхления η_p необходимо рассчитать мощность, тратящуюся на рыхление почвы, и поделить ее на общую потребляемую мощность N . Одним из способов определения мощности, тратящейся на рыхление почвы, является подсчет количества разорванных связей изначально связанных элементов почвы:

$$\eta_p = \frac{1}{N(t_k - t_n)} \sum_{i=1}^{N_3} \sum_{j=1}^i E_{ij}, \quad (19)$$

где E_{ij} — величина энергии, которую необходимо затратить, чтобы разделить элементы i и j .

Для расчета коэффициента оборачиваемости пласта почвы $k_{об}$ необходимо предварительно, до обработки орудием, условно разделить элементы почвы на «верхние» по условию $z_i > z_n - h_c$, и «нижние» по условию $z_i < z_n - h_c$, где z_n — высота поверхности почвы, h_c — глубина слоя (в дальнейших расчетах принято $h_c = 0.05$ м). После обработки почвы орудием необходимо аналогичным образом разделить элементы на «верхние» и «нижние» и подсчитать долю элементов, изменивших статус («нижние» стали «верхними», и наоборот). При этом надо учитывать только элементы, находящиеся в области обработки; в частности, далее рассматриваются элементы, для которых выполняется условие смещения в процессе обработки (2). Таким образом, коэффициент оборачиваемости $k_{об}$ рассчитывается по формуле

$$k_{об} = \frac{N_{B \rightarrow H} + N_{H \rightarrow B}}{N_{B \rightarrow H} + N_{H \rightarrow B} + N_{H \rightarrow H} + N_{B \rightarrow B}}, \quad (20)$$

где $N_{B \rightarrow H}$ — количество элементов в области обработки, которые перешли из верхнего в нижний слой в результате обработки орудием;

$N_{H \rightarrow B}$ — количество элементов в области обработки, которые перешли из нижнего в верхний слой;

$N_{H \rightarrow H}$ и $N_{B \rightarrow B}$ — количество элементов в области обработки, оставшихся в том же слое обработки, соответственно нижнем и верхнем.

Для определения среднего размера почвенных частиц, образовавшихся после рыхления R_{cp} после обработки почвы орудием в программе, реализующей модель, производится поиск кластеров в системе элементов почвы, располагающейся в области обработки (для которой выполняется условие (2)). Кластеры выделяются по условию остаточной связности элементов i и j почвы. До обработки почва в модели представляет собой плотную упаковку шаров с большим количеством связей между ними: в среднем каждый элемент в глубине почвы имеет около 12 связей с соседними элементами. После прохода орудия разрываются связи между элементами, удаленными друг от друга, и силы притяжения в таких парах элементов далее не учитываются. Однако часть элементов в области обработки, остаются связанными и образуют фрагменты почвы, состоящие из нескольких элементов (от 2 до нескольких десятков). Таким образом, для расчета среднего размера почвенных частиц необходимо после выделения кластеров определить их размеры и усреднить по всем кластерам, включая кластеры, состоящие из одного элемента:

$$R_{cp} = \frac{1}{N_{кл}} \sum_{i=1}^{N_{кл}} R_{кли} = \frac{1}{N_{кл}} \sum_{i=1}^{N_{кл}} \sqrt[3]{6N_{экли}V_э}, \quad (21)$$

где $N_{кл}$ — количество кластеров,

$R_{кли}$ — размер кластера i ,

$N_{экли}$ — количество шарообразных элементов почвы в кластере i ,

$V_э$ — эффективный объем шарообразного элемента.

Для расчета коэффициента полноты разрушения почвенных частиц необходимо поделить количество разорванных связей между элементами после прохода рабочего органа N_{pc} на общее количество связей до прохода рабочего органа N_{c0} :

$$k_{пр} = \frac{N_{pc}}{N_{c0}}. \quad (22)$$

При расчете N_{pc} и N_{c0} учитываются только элементы, находящиеся в области обработки, то есть для которых выполняется условие (2).

Коэффициент неоднородности рыхления почвы в продольном направлении определяется с использованием полученной ранее функции распределения плотности почвы $\rho(x, y, z)$:

$$k_n = \frac{1}{N_{ty}} \sum_{i=1}^{N_{ty}} \left| \rho \left(x_1 + \frac{i}{N_{ty}} (x_2 - x_1), y_{cp}, z_{cp} \right) - \rho_{cp} \right|, \quad (23)$$

где N_{ty} — количество точек усреднения вдоль продольной координаты x (для определения данного параметра в дальнейших расчетах $N_{ty} = 100$),

y_{cp} и z_{cp} — средние в полосе обработки поперечная и вертикальная координаты,

ρ_{cp} — средняя плотность почвы в полосе обработки.

Таким образом, новизна разработанной модели заключается в возможности расчета 22 показателей для характеристик производительности, качества и энергетических затрат обработки почвы, часть которых либо не исследовалась, либо оценивалась на основании экспериментальных исследований.

2.6. Описание виртуального стенда, использованного в компьютерном эксперименте

Использованный в исследовании виртуальный почвенный канал имеет длину 5 м и ширину 1.4 м (рис. 7).

Участок почвенного канала, на котором осуществлялся сбор данных, был выбран длиной в 3 м и располагался в центральной части канала (рис. 8). Именно в этой области по результатам предварительных экспериментов наблюдался установившийся режим. Скорость рабочего органа принималась равной 1 м/с, а общее время моделирования — 5 с. Соответственно, интервал сбора данных был 1...4 с.

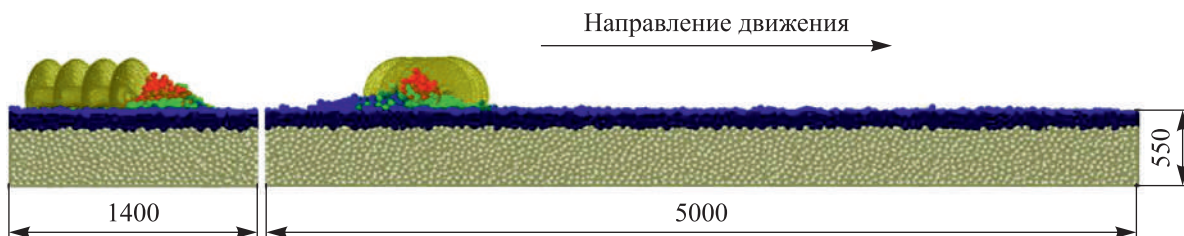


Рис. 7. Виртуальный почвенный канал, использованный при моделировании

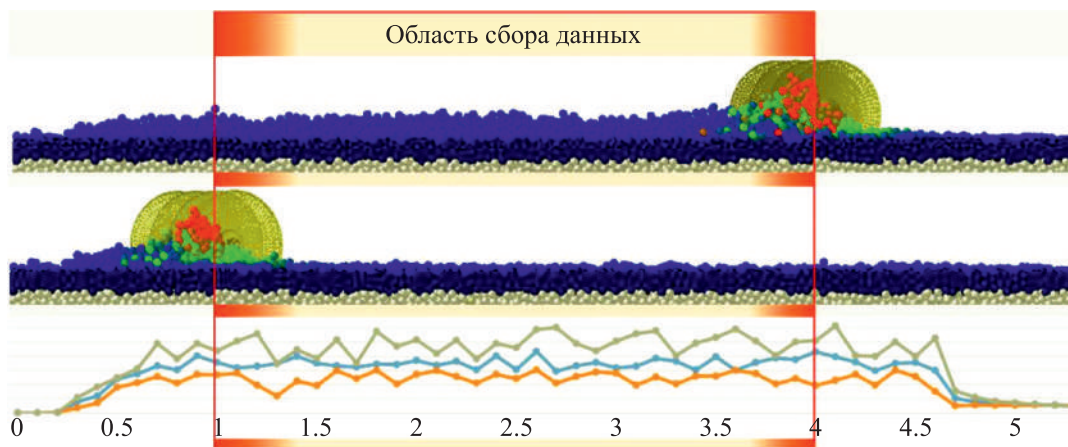


Рис. 8. Область сбора данных

Радиус почвенных частиц во всех сериях экспериментов составлял 18 мм. Это минимальный диаметр частиц, позволяющий выполнять виртуальный эксперимент на персональном компьютере с длительностью, не превышающей 8–10 часов. При уменьшении диаметра частиц, с целью приближения к размерам реальных почвенных агрегатов, время моделирования значительно возрастает, что требует использования специализированных вычислительных машин. Плотность почвенных частиц принималась равной плотности твердой фазы почвы 2500 кг/м^3 . Заполнение виртуального почвенного канала происходило путем генерации заданного числа частиц в объеме расчетной области ($5 \times 1.4 \times 1.4 \text{ м}$) с последующим их падением и случайным распределением под действием силы тяжести. Образовавшийся почвенный пласт обладал значительно меньшей плотностью порядка 1600 кг/м^3 , что соответствует плотности естественных лесных почв.

Для визуального контроля результатов моделирования и оценки смещения почвенных частиц использовались поверхностные цветовые эпюры скоростей движения частиц (рис. 9). Нулевой скорости частиц соответствует синий цвет, скорости в 1 м/с — красный цвет, промежуточные значения — оттенки зеленого.

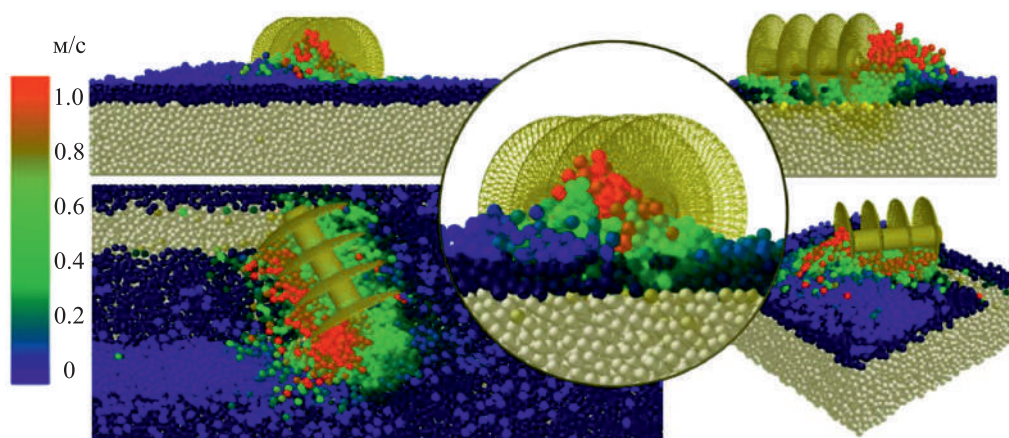


Рис. 9. Процесс моделирования

2.7. Описание лабораторной установки для пространственного динамометрирования

Проверка достоверности результатов моделирования производилась на лабораторной установке для объемного динамометрирования путем исследования натурального образца, выполненного в полном соответствии с исследованной 3D-моделью. На рис. 10, а представлена 3D-модель секции орудия с установленной на ней дисковой батареей. Рисунок 10, б демонстрирует изготовленный натуральный образец. Процесс исследования дисковой батареи на установке для пространственного динамометрирования показан на рис. 10, в.

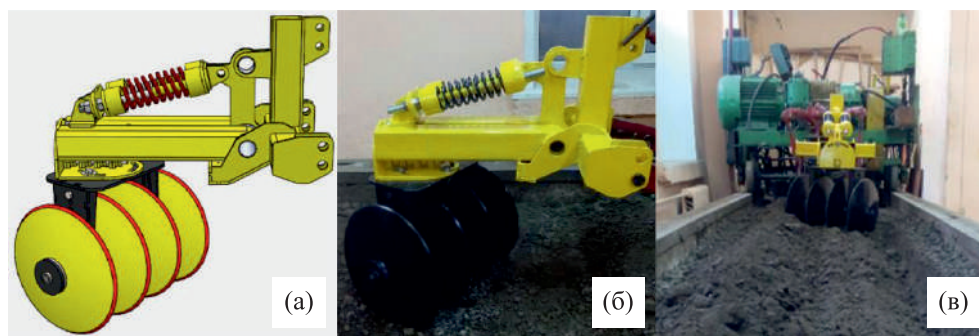


Рис. 10. Объемное динамометрирование дисковой батареи: а) 3D-модель секции орудия; б) натуральный образец; в) процесс пространственного динамометрирования

3. Результаты и обсуждение

3.1. Моделирование рабочего процесса батарейного дискового рабочего органа

Для демонстрации возможностей математической модели и компьютерной программы приводятся результаты комплексного исследования рабочего процесса дисковой культиваторной батареи. Виртуальный эксперимент проводился при постоянной глубине обработки 10 см и углах атаки 10, 15, 20, 25 и 30°.

На рис. 11 представлен почвенный канал после проведения виртуального эксперимента по взаимодействию рабочего органа с почвенной средой (*а* — угол атаки $\alpha = 10^\circ$; *б* — $\alpha = 20^\circ$; *в* — $\alpha = 30^\circ$).

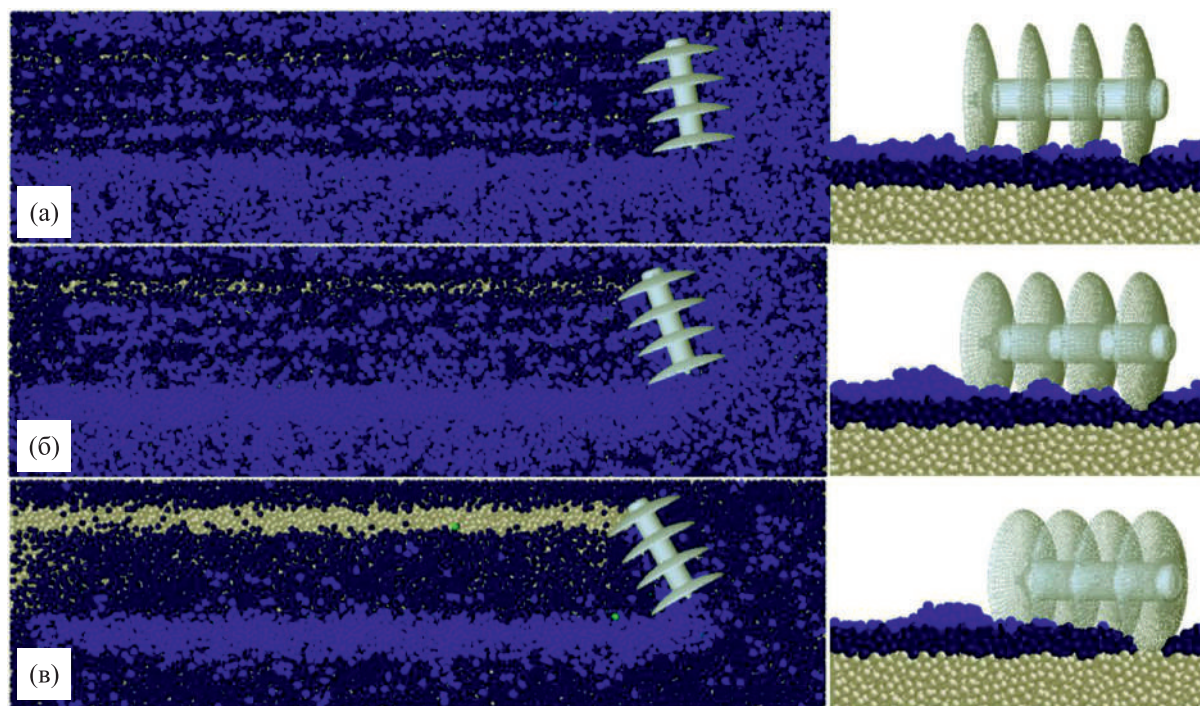


Рис. 11. Моделирование рабочего процесса дискового культиваторного рабочего органа: а) угол атаки $\alpha = 10^\circ$; б) угол атаки $\alpha = 20^\circ$; в) угол атаки $\alpha = 30^\circ$

3.2. Силовые нагрузки, испытываемые рабочим органом

При углах атаки 10...20° сила тяги F_x и, соответственно, потребляемая мощность N малы и практически не зависят от α (рис. 12). Однако при увеличении угла атаки более 20° из-за перехода дисковой батареи в режим хорошей заглубляемости и интенсивной фрагментации почвы сила тяги и потребляемая мощность существенно возрастают. С увеличением угла атаки также возрастает сила бокового увода батареи F_y . В то же время выталкивающая сила F_z снижается с увеличением α из-за улучшения заглубления дисковой батареи.

Сравнение результатов имитационного моделирования и лабораторных исследований представлено на рис. 12. Анализ графиков показывает высокую схожесть экспериментальных данных и данных моделирования. Наибольшие различия наблюдаются в значениях силы тяги F_x . Так, при углах атаки 30° экспериментальные данные превышают данные моделирования на 348 Н (22.2 %). Сила бокового увода F_y практически идентична при углах атаки 10...25°, и лишь при 30° экспериментальные данные превышают теоретические на 134 Н (13.7 %). Выталкивающая сила F_z тоже имеет наибольшие расхождения при углах атаки 30°, однако здесь значения, полученные при моделировании, превышают экспериментальные на 377 Н (19.9 %).

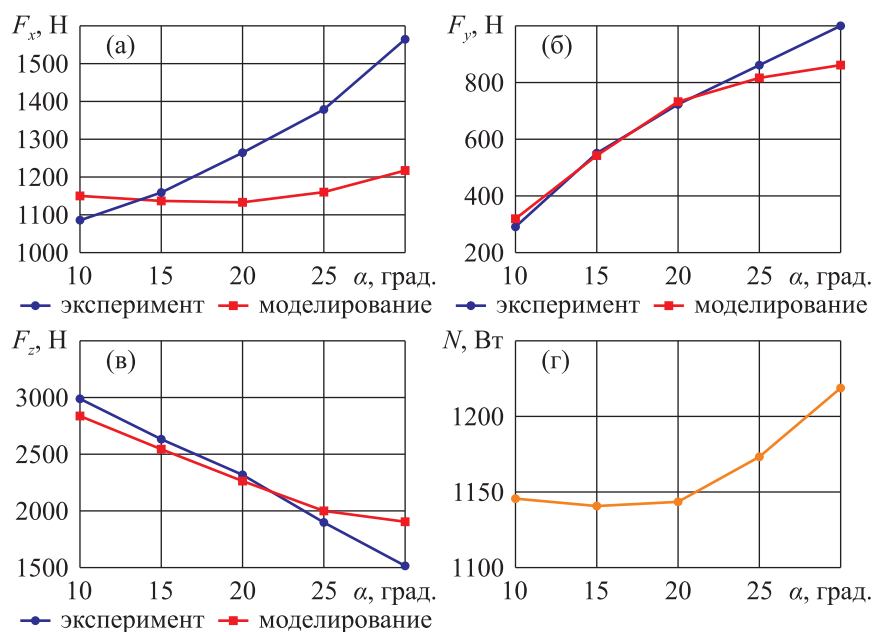


Рис. 12. Влияние угла атаки дисковой батареи α на силовые нагрузки, испытываемые рабочим органом: силу тяги F_x (а), силу бокового увода F_y (б), выглубляющую силу F_z (в), тяговую мощность N (г)

Таким образом, различия между экспериментальными данными и данными моделирования составляют не более 22.2 %, при этом во всех случаях максимальные расхождения наблюдаются при углах атаки 30°. Это, вероятно, связано с различающейся связностью почвы и невозможностью абсолютно жесткой фиксации дисковой батареи в лабораторном эксперименте.

3.3. Геометрические показатели смещения почвы

Геометрические показатели смещения почвы (рис. 13) характеризуют смещение почвы в процессе обработки. С увеличением угла атаки дисковой батареи увеличиваются все шесть показателей данной группы.

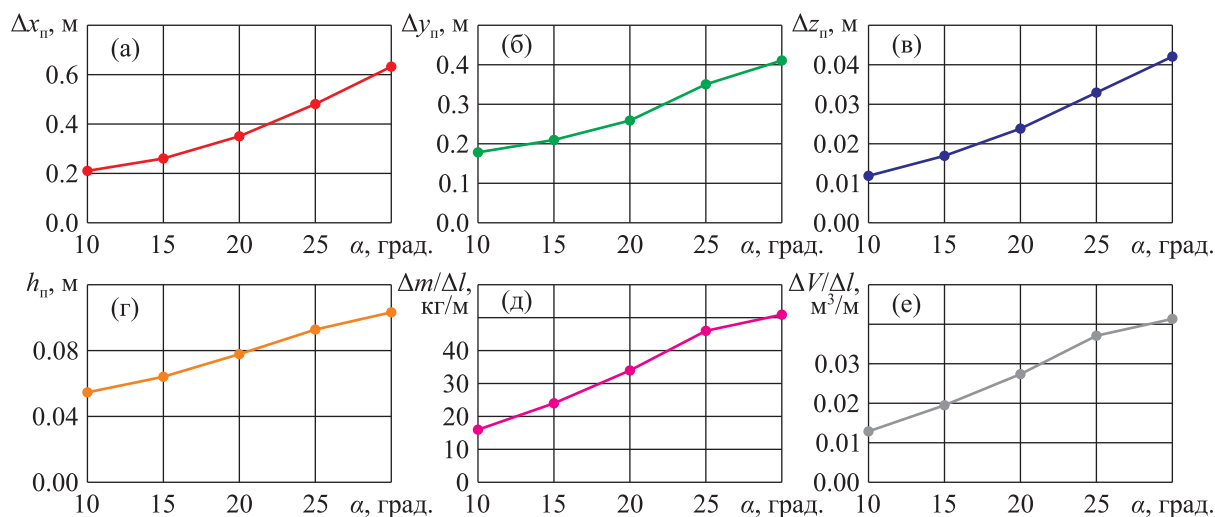


Рис. 13. Влияние угла атаки дисковой батареи α на геометрические показатели смещения почвы: среднее смещение почвы в продольном Δx_n (а), боковом Δy_n (б), вертикальном Δz_n (в) направлениях, высоту пласта над исходной поверхностью почвы h_n (г), удельные массу $\Delta m/\Delta l$ (д) и объем $\Delta V/\Delta l$ (е) перемещаемой почвы (на единицу длины)

3.4. Показатели самоустановки орудия

Для расчета показателей самоустановки орудия проведена отдельная серия компьютерных экспериментов, в которых величина заглубления дисковой батареи a не фиксировалась на заданном уровне, а самопроизвольно устанавливалась на определенном стабильном значении в результате баланса заглубляющих и выглубляющих сил. Также в данной серии компьютерных экспериментов дисковая батарея изначально помещалась так, чтобы диски касались поверхности почвы, и далее, в ходе компьютерного эксперимента, батарея постепенно заглублялась и выходила на постоянное значение глубины обработки a на определенной длине заглубления рабочего органа l_3 .

Обнаружено, что увеличение угла атаки α приводит к увеличению величины заглубления. Также наблюдается снижение угловой скорости вращения дисковой батареи ω , по-видимому, из-за того, что касательная к дискам составляющая скорости уменьшается при повороте оси батареи от перпендикулярного направления к оси движения OX . Так как с увеличением угла атаки улучшается заглубляемость, длина заглубления орудия l_3 уменьшается (рис. 14).

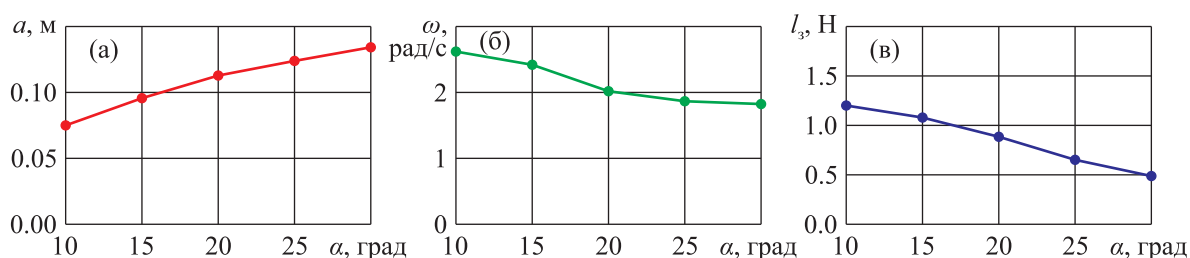


Рис. 14. Влияние угла атаки дисковой батареи α на показатели самоустановки орудия: величину самопроизвольного заглубления орудия a (а), установившуюся угловую скорость вращения дисковой батареи ω (б), длину заглубления орудия l_3 (в)

3.5. Показатели качества рыхления почвы

Увеличение угла атаки дисковой батареи благоприятно сказывается на большинстве показателей качества обработки почвы (рис. 15). Уменьшается плотность почвы в обработанной полосе. Увеличивается КПД рыхления (доля мощности трактора, идущая непосредственно на рыхление) и достигает максимума 0.83 при $\alpha = 25^\circ$. Улучшается обрабатываемость пласта почвы и достигает максимума $k_{об} = 0.61$ при $\alpha = 25^\circ$. Снижается средний размер почвенных частиц, достигая практического минимума при углах атаки более 20° . Увеличивается коэффициент полноты разрушения почвенных частиц.

Неблагоприятное влияние увеличения угла атаки заключается в росте коэффициента неоднородности рыхления почвы в продольном направлении.

3.6. Картограммы пространственного распределения показателей

Одним из важных преимуществ моделирования, перед реальным экспериментом, является относительная простота получения пространственного распределения того или иного показателя. Ниже для примера показаны две картограммы распределения.

На картограмме распределения деформаций видно, что верхние слои почвы (до глубины около 0.2 м) испытывают существенное смещение порядка 25...100 мм и более (рис. 16, а). Нижние же слои почвы практически не деформируются, деформация составляет менее 3 мм на глубине ниже 0.6 м.

Картограмма распределения плотности позволяет судить о качестве рыхления (рис. 16, б). На глубине более 0.3 м плотность почвы при обработке остается практически неизменной, более 0.99 от исходной. Наименьшая плотность наблюдается в области прохода дисковой батареи, менее 0.9 от исходной.

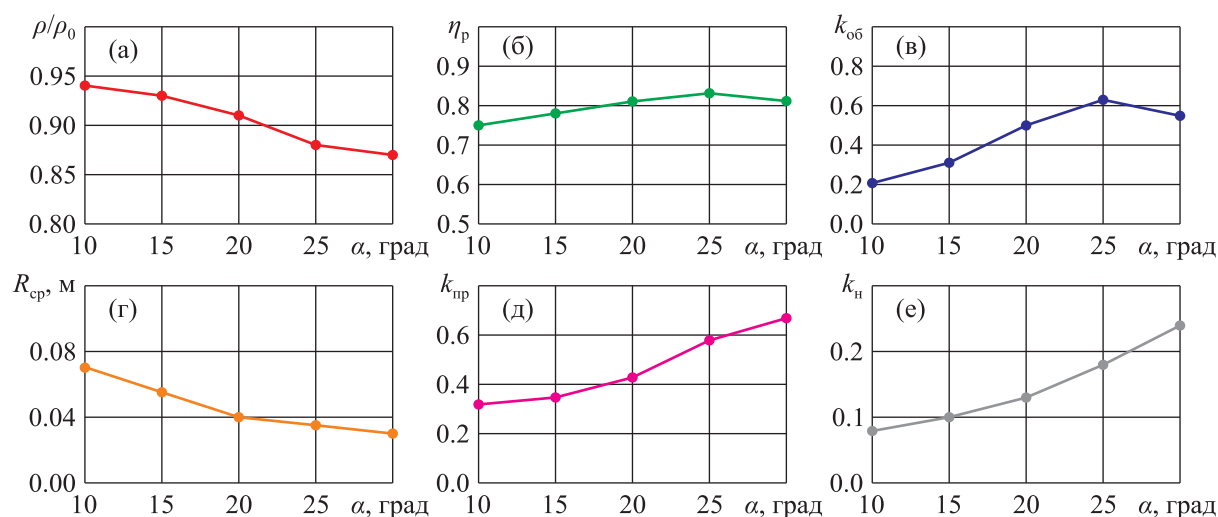


Рис. 15. Влияние угла атаки дисковой батареи α на показатели качества рыхления почвы: относительную плотность обработанной почвы ρ/ρ_0 (а), КПД рыхления η_p (б), коэффициент оборачиваемости пласта почвы $k_{об}$ (в), средний размер почвенных частиц после рыхления $R_{ср}$ (г), коэффициент полноты разрушения почвенных частиц $k_{тр}$ (д), коэффициент неоднородности рыхления почвы в продольном направлении k_n (е)

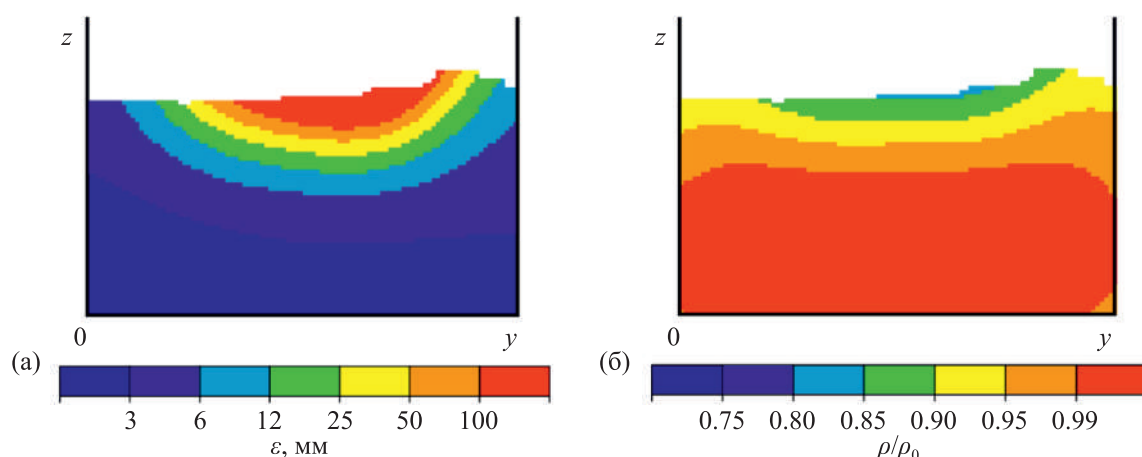


Рис. 16. Картограммы распределения свойств в поперечном сечении модельного грунтового канала: а) деформации $\varepsilon(y, z)$; б) плотность почвы $\rho(y, z)/\rho_0$

4. Выводы

Разработанная математическая модель и средства ее реализации позволяют произвести комплексное исследование различных почвообрабатывающих органов сельско- и лесохозяйственных, а также различных дорожно-строительных и землеройных машин. Модель дает возможность оценить влияние геометрических параметров рабочих органов, технологических параметров процесса и параметров почвы на геометрические показатели смещения почвы, показатели самоустановки орудия, силовые нагрузки, испытываемые орудием, показатели качества рыхления и пространственное распределение показателей. Всего исследуются 22 показателя (или распределение показателя в пространстве).

В качестве примера представлено комплексное исследование рабочего процесса дисковой культиваторной батареи, широко применяемой в сельско- и лесохозяйственных почвообрабатывающих машинах. Проверка достоверности результатов моделирования производилась на лабораторной установке для объемного динамометрирования путем исследования натурального

образца, выполненного в полном соответствии с исследованной 3D-моделью. Контроль производился по трем составляющим вектора тягового сопротивления: F_x , F_y и F_z . Результаты показали достаточно высокую схожесть экспериментальных данных и данных моделирования. Наибольшие расхождения составили 22.2 %.

Таким образом, предложенная математическая модель позволяет произвести комплексную оценку рабочего процесса обработки почвы, а не отдельных его показателей и изучить ряд показателей, не исследовавшихся ранее либо оценивавшихся на основании экспериментальных данных.

Список литературы (References)

- Горячкин В. П. Теория клина. — М.: Колос, 1965. — С. 382–389.
Goryachkin V. P. Teoriya klina [Wedge Theory]. — Moscow: Kolos, 1965. — P. 382–389 (in Russian).
- Горячкин В. П. Теория разрушения почв. — М.: Колос, 1965. — С. 369–381.
Goryachkin V. P. Teoriya razrusheniya pochv [Soil Destruction Theory]. — Moscow, Kolos, 1965. — P. 369–381 (in Russian).
- Гячев Л. В. Теория лемешно-отвальной поверхности // Тр. Азово-Черномор. ИМЭСХ. — Вып. 13. — Зерноград, 1961. — 317 с.
Gyachev L. V. Teoriya lemeshno-otval'noi poverkhnosti [Theory of a Share-Moulboard Surface] // Tr. Azovo-Chernomor. IMESKh. — Vyp. 13. — Zernograd, 1961. — 317 p. (in Russian).
- Синеоков Г. Н., Панов И. М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. — М.: Машиностроение, 1977. — 328 с.
Sineokov G. N., Panov I. M. Teoriya i raschet pochvoobrabatyvayushchikh mashin [Theory and Calculation of Tillage Machines]. — Moscow: Mashinostroenie, 1977. — 328 p. (in Russian).
- Bartzanas T., Kacira M., Zhu H., Karmakar S., Tamimi E., Katsoulas N. Computational fluid dynamics applications to improve crop production systems // Computers and Electronics in Agriculture. — 2013. — Vol. 93. — P. 151–167.
- Bentaher H., Ibrahmi A., Hamza E., Hbaieb M., Kantchev G., Maalej A. Finite element simulation of moldboard-soil interaction // Soil & Tillage Research. — 2013. — Vol. 134. — P. 11–16.
- Chen Y., Li B. Measurement and modelling of soil displacement from sweeps with different cutting widths // Biosystems Engineering. — 2017. — Vol. 161. — P. 1–13.
- Chen Y., Munkholm L. J., Nyord T. A discrete element model for soil-sweep interaction in three different soils // Soil & Tillage Research. — 2013. — Vol. 126. — P. 34–41.
- Coetzee C. J. Review: Calibration of the Discrete Element Method // Powder Technol. — 2017. — Vol. 310. — P. 104–142.
- Gao J., Jin Y. Soil-cutting simulation and test of oblique rotary the research of oblique rotary virtual prototyping system // Computer and Computing Technologies in Agriculture V. CCTA 2011. IFIP Advances in Information and Communication Technology. — 2011. — Vol. 370. — P. 1–11.
- EDEM 2.4 User Guide. — 2011. — 134 p.
- Hang C., Gao X., Yuan M., Huang Y. Discrete element simulations and experiments of soil disturbance as affected by the tine spacing of subsoiler // Biosystems Engineering. — 2017. — Vol. 168. — P. 73–82.
- Ibrahmi A., Bentaher H., Hbaieb M., Maalej A., Mouazen A. M. Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 1. Finite element simulation // Computers and Electronics in Agriculture. — 2015. — Vol. 117. — P. 258–267.
- Ibrahmi A., Bentaher H., Hamza E., Maalej A., Mouazen A. M. 3D finite element simulation of the effect of mouldboard plough's design on both the energy consumption and the tillage quality // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2017. — Vol. 90. — P. 473–487.

- Karmakar S., Kushwaha R. L., Laguë C.* Numerical modelling of soil stress and pressure distribution on a flat tillage tool using computational fluid dynamics // *Biosystems Engineering*. — 2007. — Vol. 97. — P. 407–414.
- Kornel T.* The role of bond and damping in the discrete element model of soil-sweep interaction // *Biosystems engineering*. — 2018. — Vol. 169. — P. 57–70.
- Li B., Liu F. Y., Mu J. Y., Chen J., Han W. T.* Distinct element method analysis and field experiment of soil resistance applied on the subsoiler // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. — 2014. — Vol. 7. — P. 54–59.
- López E., Tijssens E., Herrera M., Gonzalez O., Ramon H.* Prediction model for non-inversion soil tillage implemented on discrete element method // *Computers and Electronics in Agriculture*. — 2014. — Vol. 106. — P. 120–127.
- Major T., Csanády V.* Application of numerical analysis for the design of rotating tools // *Hungarian Agricultural Engineering*. — 2014. — Vol. 26. — P. 16–19.
- Mak J., Chen Y., Sadek M. A.* Determining parameters of a discrete element model for soil – tool interaction // *Soil & Tillage Research*. — 2012. — Vol. 118. — P. 117–122.
- Milkevych V., Munkholm L. J., Chen Y., Nyord T.* Modelling approach for soil displacement in tillage using discrete element method // *Soil & Tillage Research*. — 2018. — Vol. 183. — P. 60–71.
- Ovsyanko V., Petrovsky A.* The Computer Modeling of Interaction Between Share-Moulboard Surface of Plough and Soil // *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. — 2014. — Vol. 59. — P. 100–103.
- Karmakar S., Kushwaha R. L.* Simulation of Soil Deformation Around a Tillage Tool Using Computational Fluid Dynamics // *Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural and Biological Engineers*. — 2005. — Vol. 48. — P. 923–932.
- Shahgoli G., Shahi N.* Modeling of Soil and Oscillatory Tine Interaction Using Discrete Element Method // *Journal of Agricultural Machinery Science*. — 2011. — Vol. 7 (3). — P. 271–275.
- Subrata K.* Numerical Modeling of Soil Flow and Pressure Distribution on a Simple Tillage Tool Using Computational Fluid Dynamics // A Thesis Submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in Partial Fulfilment of the Requirement for the Degree of Doctor of Philosophy. — 2005. — 192 p.
- Tagar A. A., Changying J., Adamowski J., Malard J., Qi C. S., Qishuo D.* Finite Element Simulation of Soil Failure Patterns Under Soil Bin and Field Testing Conditions // *Soil & Tillage Research*. — 2015. — Vol. 45. — P. 157–170.
- Tanaka H., Oida A., Daikoku M., Inooku K., Sumikawa O., Nagasaki Y.* DEM Simulation of Soil Loosening Process Caused by a Vibrating Subsoiler // *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript PM 05 010*. — 2007. — Vol. IX. — P. 1–18.
- Tenu I., Carlescu P., Cojocariu P., Rosca R.* Impact of Agricultural Traffic and Tillage Technologies on the Properties of Soil // *World's Largest Science, Technology & Medicine Open Access Book Publisher*. — 2012. — Vol. 10. — 263 p.
- Ucgul M., Saunders C., Fielke J. M.* Comparison of the Discrete Element and Finite Element Methods to Model the Interaction of Soil and Tool Cutting Edge // *Biosystems Engineering*. — Vol. 169. — P. 199–208.
- Urbán M., Kotrocz K., Kerényi G.* Investigation of The Soil-Tool Interaction by SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) Based Simulation // *American Transaction on Engineering & Applied Sciences*. — 2002. — P. 1–6.

