

УДК 630*431

DOI: 10.34220/2311-8873-2020-3-3-128-139

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ
ЗЕМЛЕРОЙНЫХ И ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН
С ПОЧВЕННЫМИ СРЕДАМИ

Гнусов М.А., Лысыч М.Н.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»

Email: mgnusov@yandex.ru, miklynea@yandex.ru

Аннотация: Проведение теоретических исследований рабочих процессов различных машин и агрегатов на сегодняшний день обладает широкими возможностями при использовании современных компьютерных технологий. Использование программ значительно ускоряет изучение сложных исследуемых систем. Использование методов имитационного моделирования целесообразно при высокой стоимости проведения реальных экспериментальных исследований или в силу определенных обстоятельств делающих проведение исследований на реальной системе невозможным, а расчёт аналитической модели будет допускать множество допущений и приближений что повлияет на всю систему и изменит её. В статье особое внимание уделено подбору наиболее подходящего метода моделирования для исследования процесса, ликвидации лесного пожара потоком почвогрунта, с использованием серийных программных продуктов. Проведён анализ существующих численных методов моделирования взаимодействия рабочих органов землеройных и почвообрабатывающих машин с почвенными средами. Проанализированы исследования, выполненные методом дискретных элементов (DEM), методом конечных элементов (FEM), методом вычислительной гидродинамики (CFD), методом гидродинамики сглаженных частиц (SPH). Сделаны выводы по перспективам применимости каждого из методов для моделирования системы процессов обработки и метания почвогрунта.

Ключевые слова: дискретные элементы, конечные элементы, вычислительная гидродинамика, взаимодействие с почвенной средой.

ANALYSIS OF THE EXISTING NUMERICAL METHODS FOR MODELING
THE INTERACTION OF THE WORKING BODIES OF DIGGING AND
SOIL-PROCESSING MACHINES WITH SOIL MEDIA

Gnusov M.A., Lysych M.N.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Voronezh State Forestry University. G.F. Morozova»

Email: mgnusov@yandex.ru, miklynea@yandex.ru

Summary: Carrying out theoretical studies of the working processes of various machines and units today has ample opportunities when using modern computer technologies. The use of programs greatly speeds up the study of complex systems under study. The use of simulation methods is advisable when the cost of carrying out real experimental research is high or, due to certain circumstances, making research on a real system impossible, and the calculation of the analytical model will allow many assumptions and approximations that will affect the entire system and change it. In the article, special attention is paid to the selection of the most suitable modeling method for studying the process, liquidation of a forest fire with a flow of soil, using serial software products. The analysis of existing numerical methods for modeling the interaction of working bodies of earth-moving and tillage machines with soil media is carried out. The studies performed by the discrete element method (DEM), the finite element method (FEM), the computational fluid dynamics (CFD) method, and the smooth particle hydrodynamics (SPH) method are analyzed. Conclusions are drawn on the prospects for the applicability of each of the methods for modeling the system of processes of processing and throwing soil.

Keywords: discrete elements, finite elements, computational hydrodynamics, interaction with the soil environment.

Введение

Имитирование процессов и систем одна из важных ступеней проведения научно исследовательской работы в процессе которой реальная система, технология или предмет заменяется матмоделью или имитационной программой сохраняющей точность при описании исследуемой реальной системы [1]. Процедура подтверждения или опровержения взятой за основу гипотезы осуществляется с помощью имитационной модели, на которой и ставятся [2]. Созданную имитационную модель используют для однофакторного и многофакторного построения системы компьютерных экспериментов. В тоже время получаемые

данные определяются случайным характером процессов, описанных в исследуемой системе, но учитывают начальные характеристики процесса, задаваемые исследователем [3]. Выходные параметры эксперимента позволяют получать устойчивую статистику. В ряде научных работ данный подход отнесён к частным случаям математического моделирования [4]. Он может эффективно использоваться при сложности, невозможности построения или неустойчивости аналитической модели позволяя исследователям создавать достоверный имитатор или имитационную модель системы. Отличие имитационной модели от аналитической находится в конечном результате исследуемой системы [5]. В первом случае при решении системы результатом является набор чисел, непосредственно не связанных с задаваемыми параметрами, а во втором случае при решении системы дифференциальных уравнений на выходе получается формула с указанием конкретных параметров, оказывающих воздействие на систему [6].

Таблица 1 –Типы имитации системы

№	Тип имитации	Описание	Зона применения
1	Имитационная модель	способ анализа, при котором исследуемая система преобразована в модель с высокой точностью заданных параметров	– научные исследования; – компьютерные эксперименты над исследуемой системой; – проектирование; – анализ; – и т.д.
2	Дискретно-событийное моделирование	метод исследования, при котором функционирование системы задано в виде цепочки событий	– логистика; – системы обслуживания; – производственная система; – и т.д.
3	Системная динамика	метод исследования, при котором изучаемая система описывается в виде графических диаграмм причинных связей и глобальных влияний одних параметров на другие во времени, а затем созданная на основе этих диаграмм модель имитируется на компьютере	– социально-экономические системы; – и т.д.
4	Агентное моделирование	метод исследования, при котором изучается поведение децентрализованных агентов и то, как такое поведение определяет поведение всей системы в целом.	– оптимизация сети поставщиков; – моделирование потребительского поведения; – распределённые вычисления; – менеджмент трудовых ресурсов; – управление транспортом.

Для решения имитационной модели необходимо описать алгоритм дифференциальных уравнений [7]. Описание динамических систем имеющих большое количество параметров на входе в модель и для получения множества выходных показателей имитационное моделирование на сегодняшний день остаётся актуальным инструментом научного исследования. Следовательно имитация системы производится в рабочем состоянии [8].

Цель исследования

Целью исследования является анализ существующих методов имитационного моделирования для проведения научных исследований при изучении процессов ликвидации лесных пожаров направленно регулируемым потоком почвогрунта.

Материалы и методы исследования

В исследовании [9] были измерены и смоделированы смещение почвы и силы резания выбранных почвообрабатывающих рабочих органов методом дискретных элементов DEM (рис. 1). Стрельчатые лапы имели различную ширину обработки: 153, 280 и 330 мм. Имитационная модель была построена с использованием программы PFC3D.

Установлено, что может отслеживаться смещение почвы во всех трёх направлениях (вперёд, в боковом и вертикальном направлениях). В большинстве изученных случаев смоделированные перемещения грунта имели сходные тенденции с измеренными в почвенном канале значениями.

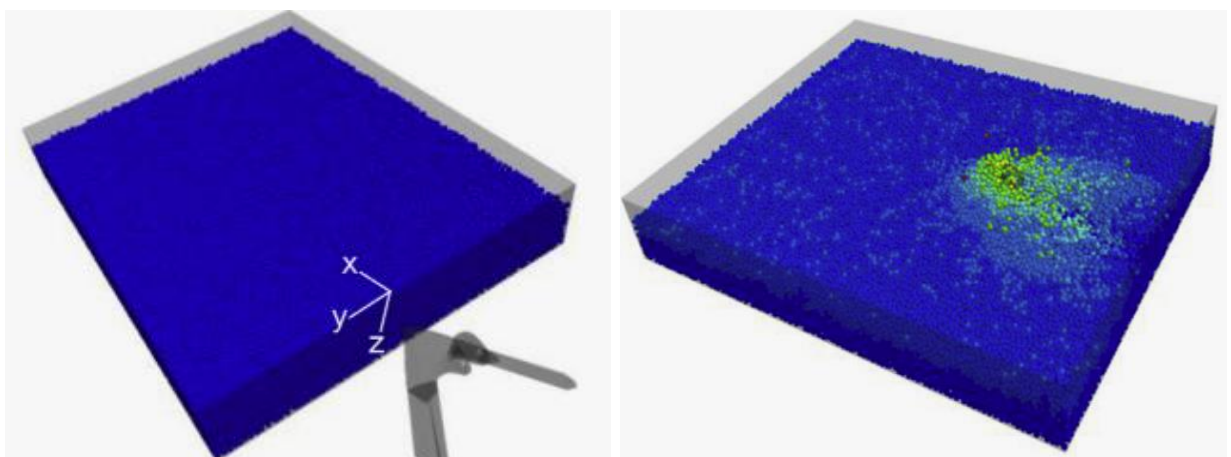


Рисунок 1 – Моделирование взаимодействия с почвой стрельчатой лапы методом дискретных элементов DEM

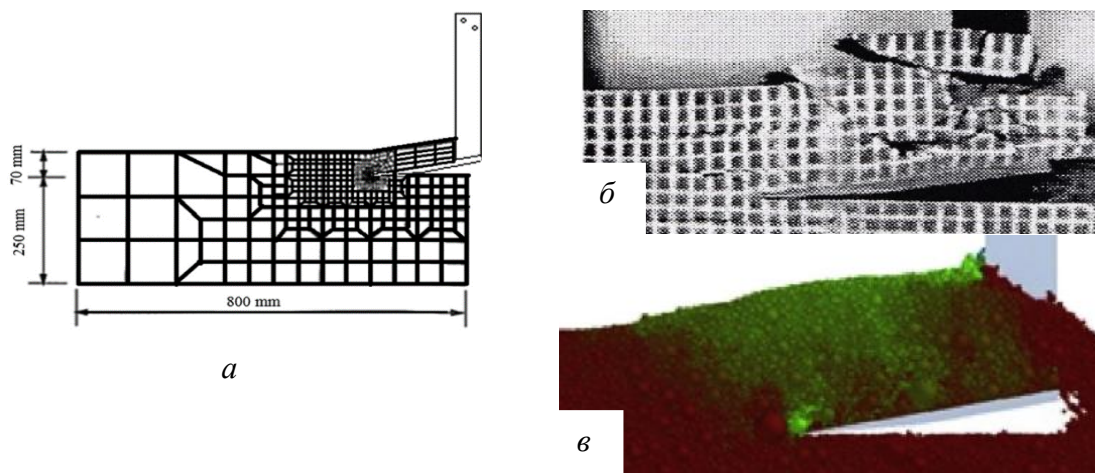
Результаты измерения тягового сопротивления и вертикальной силы показали незначительные расхождения с экспериментальными данными и отсут-

ствие противоречий с классической почвенной механикой. Однако были выявлены некоторые отличающиеся тенденции. Например, тяговое сопротивление возрастало нелинейно с увеличением ширины захвата стрелчатых лап, а вертикальная сила имела в некоторых опытах противоположное направление (фиксировалась выталкивающая сила). Все эти факты могут свидетельствовать с одной стороны о необходимости коррекции параметров модели, а с другой о возможности метода раскрывать новые закономерности поведения почв.

Вторая часть исследования была посвящена исследованию смещения почвенных частиц и образуемого почвенного профиля. Она продемонстрировала, что метод дискретных элементов способен контролировать движение отдельных частиц под действием внешних сил и моделировать их большие перемещения. Это делает метод DEM перспективным инструментом для моделирования взаимодействия почв с рабочими органами. Тем не менее, были большие расхождения в смещениях почвы между моделью и результатами испытаний. Расхождения, наблюдаемые в этом исследовании, могут объясняться несколькими причинами. Одной из возможных причин может быть неправильное использование вязкого демпфирования в модели. Коэффициенты демпфирования, использованные в этом исследовании, могли рассеивать слишком много энергии частиц и контактов, что подавляло движение частиц приводя к меньшим их смещениям. Другой возможной причиной меньших смещений почвы может быть то, что модель контакта или параметры модели были выбраны неправильно. В дальнейшем необходимо проработать калибровку параметров связей и использование различных моделей контактов.

Остановимся также на исследовании [10]. В данной работе экспериментальные данные по обработке почвы и результаты, предсказанные с использованием FEM моделирования [11], были проверены с использованием DEM методов, реализованных в программе EDEM и выполнено сравнение данных полученных тремя способами (рис. 2).

В исследовании применялась контактная модель линейной когезии с интегрированной гистерезисной пружинной, как предложено [12]. Чтобы создать распределение частиц по размерам и минимизировать количество частиц в исследовании создавалось до 250000 частиц, самая маленькая частица была диаметром 3 мм. Всего было получено 221313 частиц. Использование этого распределения частиц по размерам позволило более точно моделировать объёмную плотность грунта.



a – методом конечных элементов; *б* – лабораторные исследования;
в – методом конечных элементов

Рисунок 2 – Моделирование взаимодействия с почвой клина

Несмотря на то, что распространение трещин чётко видно на оцифрованных изображениях, полученных во время испытаний в почвенном канале со стеклянной стенкой, трещины не возникали в DEM имитации. Это можно объяснить тем, что размеры частиц были больше, чем в почвенном канале, поэтому, даже если образовывалась трещина она была невидна т.к. размер трещины меньше, чем размер частицы.

В исследовании [13] приводятся данные о моделировании взаимодействия двугранного клина и лемешно-отвальной поверхности плуга с почвой. Для моделирования использована программа LS-DYNA (рис. 3).

Разработанные компьютерные модели взаимодействия двугранного клина и лемешно-отвальной поверхности плуга с почвой в достаточной степени адекватно описывают реальные процессы обработки почвы, и могут быть использованы для раскрытия общих законов распределения напряжений и деформаций при взаимодействии рабочих органов с грунтами. Однако исследование таких важных силовых показателей процесса как тяговое сопротивление в данном исследовании не проводилось.

В исследовании [14] использовался метод конечных элементов (FEM) для моделирования процесса резания почвы с помощью плужного корпуса (рис. 4). Для почвы использовалась эластопластическая модель. Созданная в программе SolidWorks плужная поверхность была импортирована в программное обеспечение Abaqus в качестве дискретного твёрдого тела с опорной точкой на кончике отвала. В этой точке рассчитывали силу реакции с её тремя ортогональными

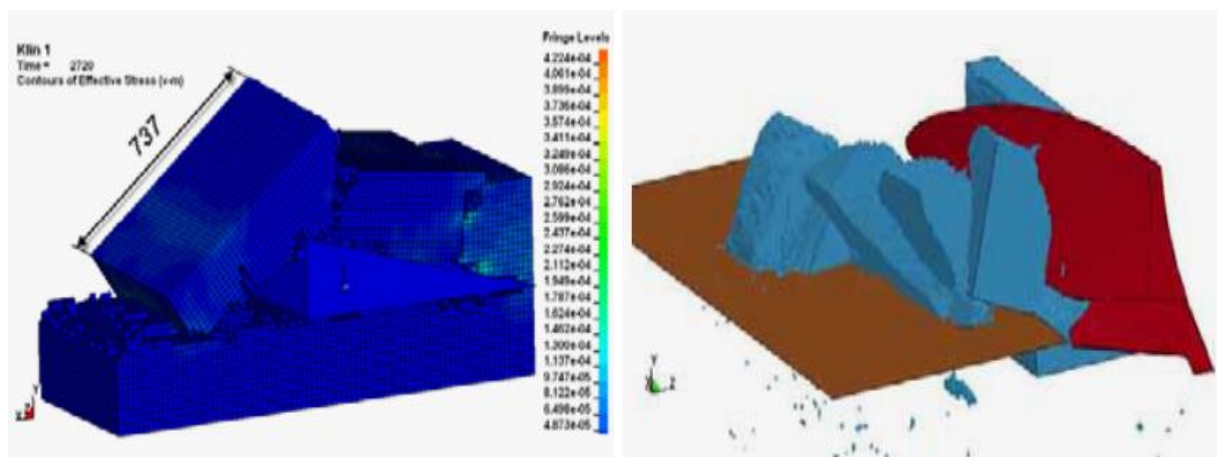


Рисунок 3 – Скалывание элементов грунта клином (а) и оборот пласта почвы лемешно-отвальной поверхностью плуга (б)

компонентами. Было исследовано влияние угла резания (угол между горизонтальной образующей и направлением обработки почвы) и угла подъёма (угол между поверхностью отвала и горизонтальной линией в ортогональном сечении к режущей кромке) на силу тяги.

В результате виртуального эксперимента были получены три составляющие тягового сопротивления, по данным авторов хорошо согласующиеся с другими исследованиями. Однако, как видно из приведённых рисунков форма образуемого поперечного почвенного профиля слабо соответствует получаемым в реальности.

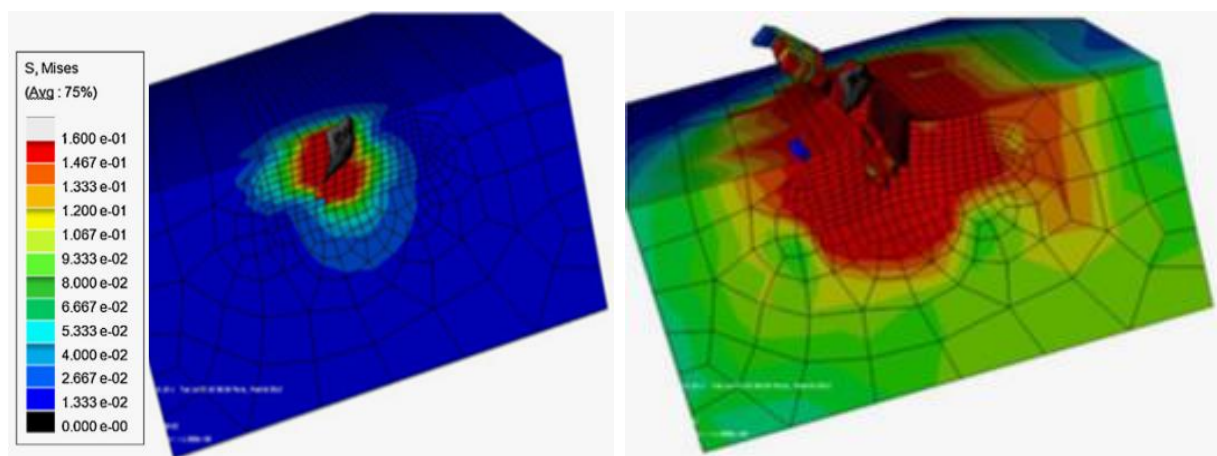


Рисунок 4 – Скалывание почвенного массива лемешно-отвальной поверхностью плуга

В исследованиях [15] использовался метод вычислительной гидродинамики (CFD) для моделирования взаимодействия культиваторного рабочего ор-

гана с почвенной средой реализованный в ANSYS CFX (рис. 5). Данные моделирования сравнивались с результатами экспериментальных испытаний полевого культиватора. По результатам моделирования контролировалось давление в нескольких точках, а также варьировалась глубина и ширина стрельчатой лапы. Кроме того, фиксировалось тяговое сопротивление и вертикальная сила. Свойства почвы были изменены авторами методом случайного подбора. Это было необходимо для получения сил, коррелирующих с данными экспериментальных измерений. Данный факт указывает на то, что свойства реальных связных почв не могут адекватно имитироваться поведением использованной пластической почвы Бингхэма.

Для сил тягового сопротивления в одном эксперименте моделирование неверно было предсказало, какая из стрельчатых лап имела более высокое тяговое усилие. Пять виртуальных экспериментов с различными условиями имели ошибку менее 100 %. Один эксперимент имел ошибку, превышающую 200 %. Для вертикальных сил ошибка также с равной вероятностью была выше или ниже прогнозируемой. Симуляция неверно предсказала, какая стрельчатая лапа имела более высокую вертикальную силу в трех сериях экспериментов. Было только два эксперимента были с ошибкой менее 100 процентов. Три эксперимента имели ошибки, которые превышали 200 процентов.

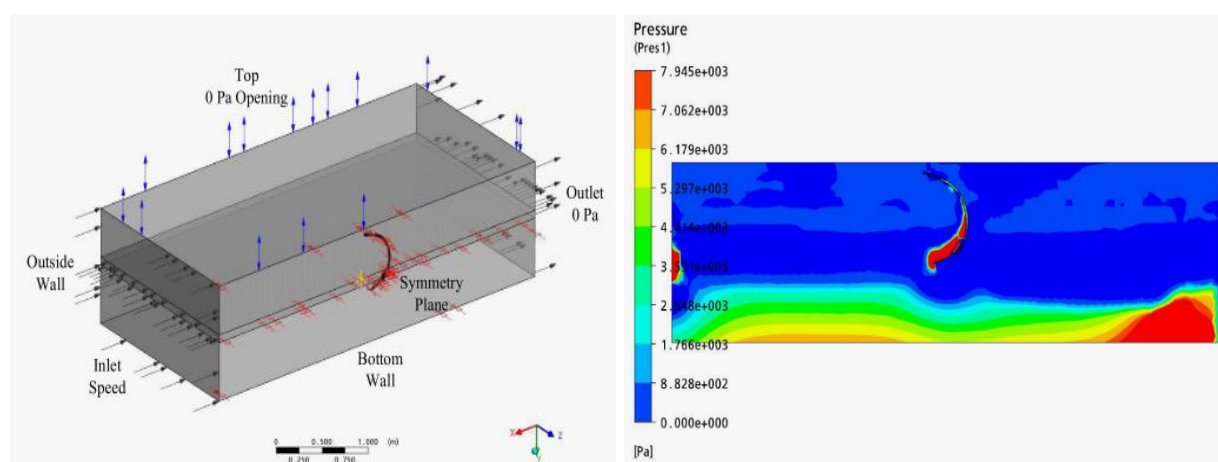


Рисунок 5 – Моделирование взаимодействия с почвой стрельчатой лапы методом CFD

В исследованиях [16] также использовался метод вычислительной гидродинамики (CFD) для моделирования взаимодействия культиваторного рабочего органа с почвенной средой реализованный в программе FLUENT (рис. 6). При

численном моделировании было принято, что почва ведёт себя как вязко-пластичный материал Бингхэма. Моделирование проводилось для трёх типов рабочих органов, имеющих одинаковую геометрическую форму, но с разными углами между режущими кромками.

Было установлено что распределение давления по поверхности стрельчатой лапы зависит от положения режущих поверхностей и характеристик грунта. Моделирование показывает, что максимальное давление зафиксировано непосредственно на режущих кромках. Также оценивалось тяговое сопротивление как сумма двух компонентов давления и вязкости. Однако эти данные не подтверждены экспериментальными исследованиями или данными других авторов. Также остаётся невыясненным вопрос о вертикальной составляющей вектора тягового сопротивления.

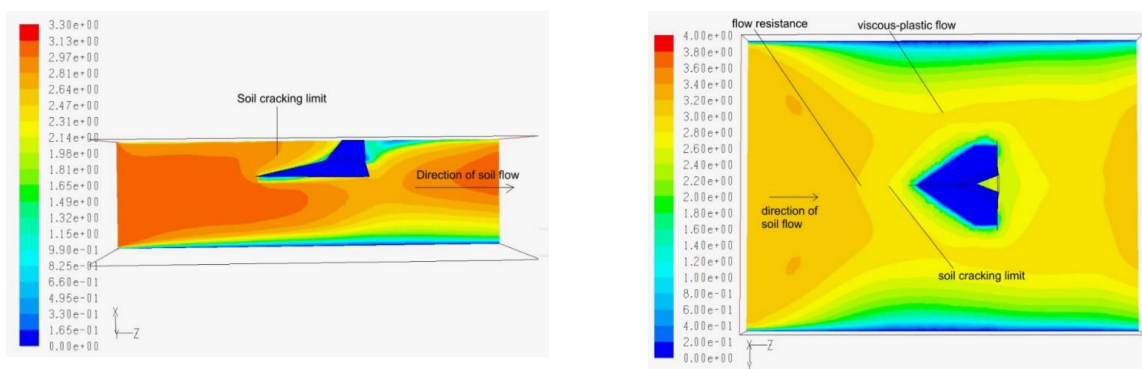


Рисунок 6 – Моделирование взаимодействия с почвой стрельчатой лапы методом CFD

В исследовании [17] моделировалось взаимодействие между почвой и сельскохозяйственными почвообрабатывающими рабочими органами с помощью бессеточного метода называемого динамикой гладких частиц SPH (рис. 7). Это постоянно развивающийся метод, поскольку он не требует больших вычислительных ресурсов, и есть несколько программ, которые могут его эффективно реализовать. Известно об использовании SPH для геологических задач, но практически отсутствуют сведения об использовании его для исследования взаимодействия почвы и рабочих органов. Для проведения виртуальных экспериментов была использована программа ANSYS AUTODYN. Описание почвенных взаимодействий производилось по модифицированной модели Друкера-Прагера.

Полученные результаты тягового сопротивления сравнивались с получаемыми аналитическим методом и с реальными испытаниями в почвенном канале. В

сравнении с работами [18, 19] результаты были на 5-10 % менее точными, чем при использовании DEM, но потребовалось на порядок меньше вычислительных ресурсов и времени. По сравнению с DEM настройка и запуск симуляции занимает гораздо меньше времени благодаря среде ANSYS и алгоритмам SPH, поскольку мы можем использовать хорошо известные встроенные модели материалов. Тем не менее SPH всегда увеличивает реальные силы, что требует необходимости более тщательных исследований и более точной материальной модели.

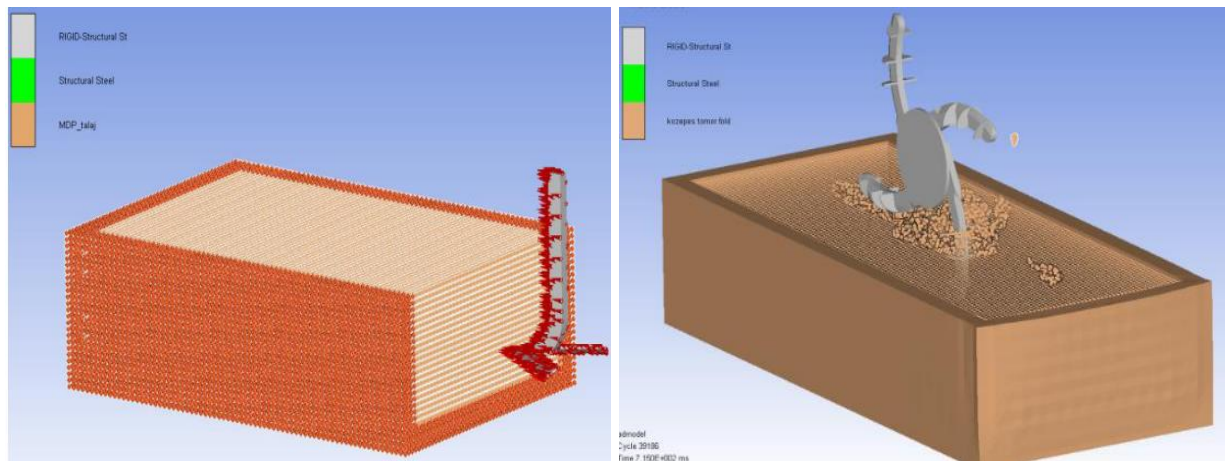


Рисунок 7 – Моделирование почвенных взаимодействий методом SPH

В исследовании [20] был разработан виртуальный прототип наклонно-роторного рыхлителя на основе метода SPH (рис. 8). Приводится сравнение энергопотребления в процессе почвообработки при имитационном моделировании и лабораторных испытаниях.

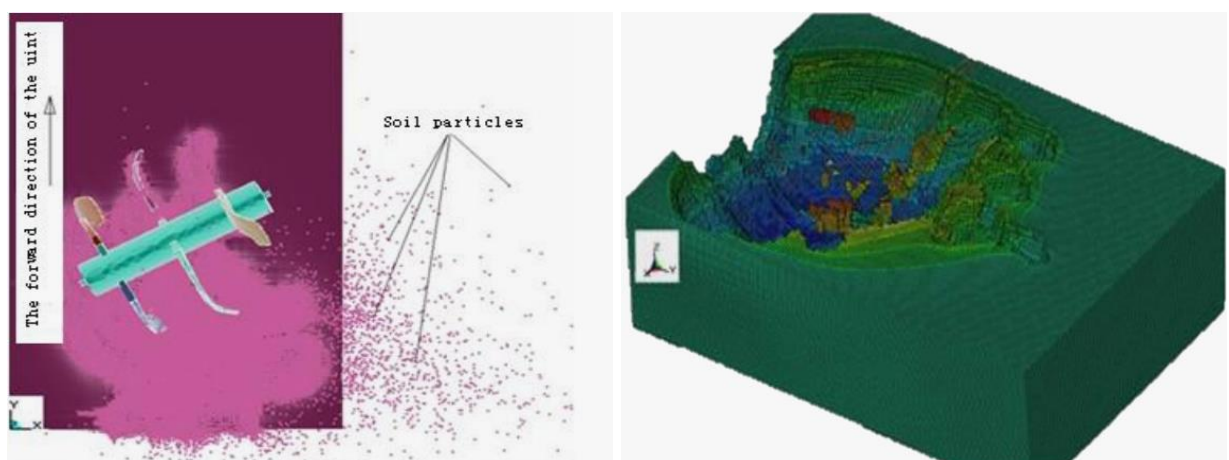


Рисунок 8 – Моделирование взаимодействия с почвой наклонно-роторного рыхлителя методом SPH

Форма дна борозды также определена путём моделирования. Правильность компьютерного моделирования подтверждена сравнением виртуального эксперимента и реальных лабораторных исследований.

Выводы

Результаты анализа выполненных исследований показали, что лучшее предсказание характера метания почвенных частиц может быть получено с использованием метода дискретных элементов (DEM). Это объясняется наиболее высокой схожестью поведения разуплотнённого летящего грунта с поведением отдельных частиц.

Чтобы улучшить результаты при дальнейшем развитии данного направления исследований необходимо будет сосредоточиться на следующих вопросах: использование частиц неправильной формы близких к фактическим размерам почвенных частиц, степень их связности, сопротивление воздушной среды, в которой осуществляется движение почвенных элементов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-60041.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Hoover W. G. Atomistic Nonequilibrium Computer Simulations // Physica A. – 1983. – Vol. 118. – pp. 111-122.
- 2 Belotserkovsky O. M., Davydov Ю. M. The method of large particles in gas dynamics. – М. : Science, 1982. – 392 p.
- 3 Hockney R., Eastwood J. Particle Numerical Modeling. . – М. : World, 1987. – 638 p.
- 4 Grigoryev Y. N., Vshivkov V. A., Fedoruk M. P. Particle-in-cell numerical simulation. – Novosibirsk : Publishing House of the SB RAS, 2004. – 360 с.
- 5 Español P. Hydrodynamics from Dissipative Particle Dynamics. // Phys. Rev. E. – 1995. – Vol. 52. – pp. 1734-1742.
- 6 Jakob C., Konietzky H. Particle Methods. An Overview. – Freiberg, 2012. – 24 p.
- 7 Bolintineanu D. S., Grest G. S., Lechman J. B., Pierce F., Plimpton S. J., Schunk P. R. Particle Dynamics Modeling for Colloid Suspensions // Comp. Part. Mech. – 2014. – Vol. 1. – pp. 321-356.
- 8 Zhen Li, Xin Bian, Yu-Hang Tang, Karniadakis G. E. A Dissipative Particle

Dynamics Method for Arbitrary Complex Geometries // arXiv:1612.08761v1.

9 Chen Y., Li B. Measurement and modelling of soil displacement from sweeps with different cutting widths // Biosystems Engineering. 2017. (161). – pp. 1-13.

10 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. 2018. (169). – pp. 199-208.

11 Fielke J. M. Finite element modelling of the interaction of the cutting edge of tillage implements with soil // Journal of Agricultural Engineering Research. 1999. № 1 (74). – pp. 91-101.

12 Ucgul M., Fielke J.M., Saunders C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage : Accounting for soil cohesion and adhesion // Biosystems Engineering. 2014. (129). – pp. 298-306.

13 Ovsyanko V., Petrovsky A. The computer modeling of interaction between share-mouldboard surface of plough and soil // Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering. 2014. № 1 (59). – pp. 100-103.

14 Bentaher H. [and etc.] Finite element simulation of moldboard-soil interaction // Soil and Tillage Research. 2013. № November (134). – pp. 11-16.

15 Barker M. E. Predicting loads on ground engaging tillage tools using computational fluid dynamics // Digital Repository, Iowa State University. 2008. 195 с.

16 Tenu I. [and etc.] Impact of Agricultural Traffic and Tillage Technologies on the Properties of Soil // World's largest Science, Technology & Medicine Open Access book publisher. 2012. (10). – pp. 263.

17 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. – pp. 1-6.

18 Tamás K. [and etc.] A simulation model for determining the mechanical properties of rapeseed using the discrete element method // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2015. № 4 (59). – pp. 575-582.

19 Tamás K., Kovács Á., Jóri I. J. The evaluation of the parallel bond's properties in DEM modeling of soils // Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. 2016. № 60 (1). – pp. 21-31.

20 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. (370). – pp. 1-11.