

УДК 004.946:631.311

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ ДИСКОВЫМ КУЛЬТИВАТОРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Лысыч М.Н.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»,
Воронеж, e-mail: miklynea@yandex.ru

Приводится классификация и анализ возможностей применения численных континуальных методов (FEM – метод конечных элементов; CFD – вычислительная гидродинамика) и дискретных методов (DEM – метод дискретных элементов; SPH – гидродинамика сглаженных частиц). Результаты анализа существующих исследований показали, что наибольшей универсальностью и достоверностью обладают дискретные методы. Так, метод дискретных элементов DEM (динамики частиц) позволяет достоверно оценить как силовые, так и качественные характеристики процесса обработки почвы. Для демонстрации возможностей дискретных методов приводятся результаты моделирования рабочего процесса дисковой культиваторной батареи лесного культиватора КЛБ 1,7, полученные с использованием разработанной математической модели и решающей программы. В имитационных исследованиях применен виртуальный почвенный канал размером 5x1,4 м и 3D-модель дисковой культиваторной батареи, созданная в среде САПР SolidWorks. Радиус почвенных частиц принимался равным 18 мм, скорость рабочего органа 1 м/с, а общее время моделирования 5 с. Глубина обработки составляла 10 см при углах атаки α равных 10, 15, 20, 25, 30°. Контроль силовых параметров процесса производился по трем составляющим вектора тягового сопротивления: F_x – продольная, F_y – боковая и F_z – вертикальная. Полученные силовые параметры хорошо согласуются с экспериментальными данными и данными классической почвенной механики. Результаты исследований могут быть использованы научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими организациями для разработки и совершенствования конструкций почвообрабатывающих орудий, а также оценки их энергоэффективности.

Ключевые слова: почвообрабатывающие орудия, лесной культиватор, метод дискретных элементов, 3D-САПР, имитационное моделирование, силовые характеристики

RESEARCH OF PROCESS TREATING SOIL BY DISK CULTIVATOR USING THE METHOD OF DISCRETE ELEMENTS

Lysych M.N.

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, e-mail: miklynea@yandex.ru

The classification and analysis of the possibilities of applying numerical continuum methods (FEM – finite element method; CFD – computational fluid dynamics) and discrete methods (DEM – discrete element method; SPH – smoothed particle hydrodynamics) are presented. The results of the analysis of studies have shown that discrete methods have the greatest versatility and reliability. So the method of discrete elements DEM (particle dynamics) allows you to reliably evaluate both the power and quality characteristics of the tillage process. To demonstrate the capabilities of discrete methods, the results of modeling the working process of a disk cultivator tool forest cultivator KLB 1,7 are presented. For this, a previously developed mathematical model and a solving program are used. For simulation studies, a virtual soil bin was used, having a length of 5 m, a width of 1,4 m and a 3D model of a disk cultivator tool created in the CAD SolidWorks. The radius of soil particles was taken equal to 18 mm, the speed of the tillage tool was 1 m/s, and the total simulation time was 5 s. Processing depth 10 cm at angles of attack of 10, 15, 20, 25, 30°. The power parameters of the process were controlled by three components of the traction resistance vector: F_x – longitudinal, F_y – lateral and F_z – vertical. The obtained force parameters are in good agreement with experimental data and the data of classical soil mechanics. The research results can be used by research and design organizations to develop and improve the design of tillage tools, as well as to evaluate their energy efficiency.

Keywords: tillage implements, forest cultivator, DEM, 3D-CAD, simulation modeling, power characteristics

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, чтобы адекватно описывать перемещение почвы под воздействием ра-

бочих органов 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 ору-

дий [1]. Наиболее распространенной схемой взаимодействия клина с почвой в настоящее время является схема процесса деформации пласта клином, предложенная Горячкиным, Пановым и Синеоковым [2, 3].

Другой подход, получивший интенсивное развитие в связи с ростом вычислительных возможностей компьютерной техники и развитием САПР, заключается в применении методов численного моделирования. 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 исследовании процессов обработки почвы [4–6]. Анализ исследований показывает, что достоверность сил, полученных этим методом, 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 [7–9].

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

Наиболее эффективно преодолевает недостатки непрерывных численных методов метод дискретных элементов (DEM – discrete element method). Он позволяет описывать разрушение почвы, деформацию и смещение почвенных агрегатов, а также получать различные силовые характеристики [10–12].

Схожими возможностями с методом дискретных элементов обладает метод динамики частиц. Он состоит в представлении среды в виде совокупности взаимодействующих частиц – материальных точек или твердых тел.

Проведенный анализ методов моделирования показал, что наиболее перспективным является метод дискретных элементов (DEM) и родственный с ним метод динамики частиц. Они позволяют достоверно оценить как силовые, так и качественные характеристики процесса обработки почвы.

Цель исследования: имитационное моделирование процесса взаимодействия батарейного дискового рабочего органа с почвенной средой методом дискретных элементов.

Материалы и методы исследования

Опишем принципы механического движения элементов почвы дискретной модели, использованной в исследовании.

При контакте элементов почвы друг с другом и с рабочими поверхностями орудия возникают упругие силы F^Y , а также силы сухого F^C и вязкого трения F^B (рис. 1).

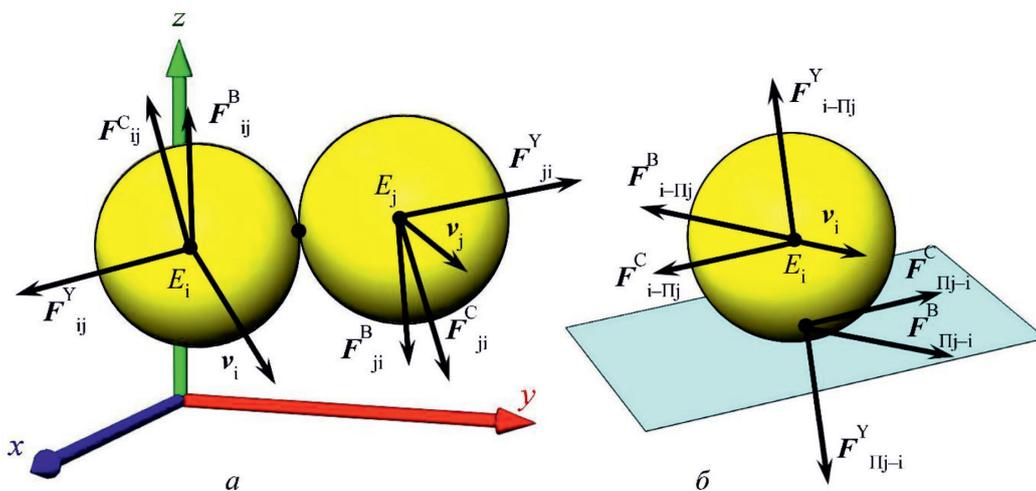


Рис. 1. Схемы силового контакта элементов почвы: а) силы, возникающие при контакте двух элементов почвы; б) силы, возникающие при контакте элемента почвы и поверхности рабочего органа

Движение элементов почвы под действием указанных сил рассчитывается по законам классической динамики. При моделировании воспроизводится изменение состояния системы элементов почвы (процесс обработки почвы) и определяется суммарное механическое воздействие элементов на движущиеся рабочие органы орудия, что позволяет рассчитать потребляемую мощность.

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}) .

Для проведения имитационных исследований была создана детализированная 3D-модель дискового батареинового рабочего органа в среде САПР

SolidWorks (рис. 2, а). С целью оптимизации процесса моделирования геометрия модели была упрощена (рис. 2, б). Далее упрощенная модель экспортировалась из САПР в формат STL (модель представляется совокупностью треугольных граней, которые описывают поверхность, и нормали) (рис. 2, в).

Использованный в исследовании виртуальный почвенный канал имеет длину 5 м и ширину 1,4 м (рис. 3).

Участок почвенного канала, на котором осуществлялся сбор данных, был выбран длиной в 3 м и расположен в центральной части канала (рис. 4). 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.

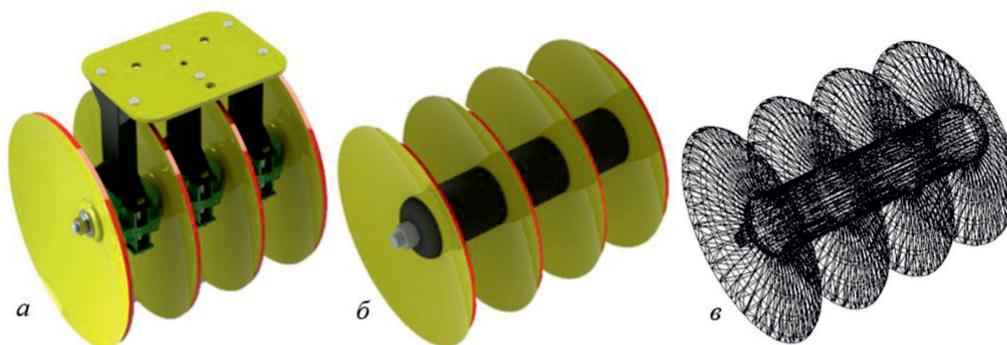


Рис. 2. Модель рабочего органа: а) исходная модель; б) упрощенная модель; в) расчетная модель

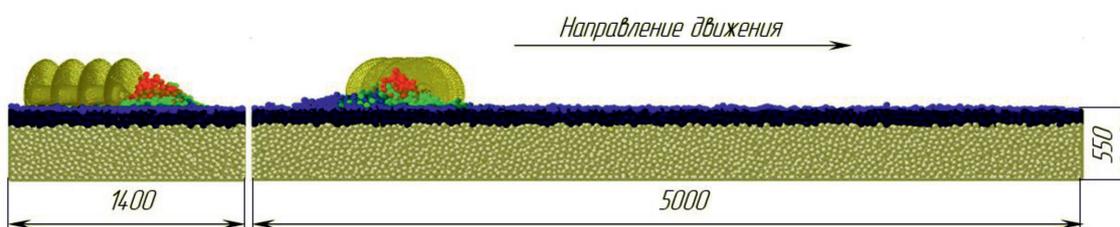


Рис. 3. Виртуальный почвенный канал, использованный при моделировании

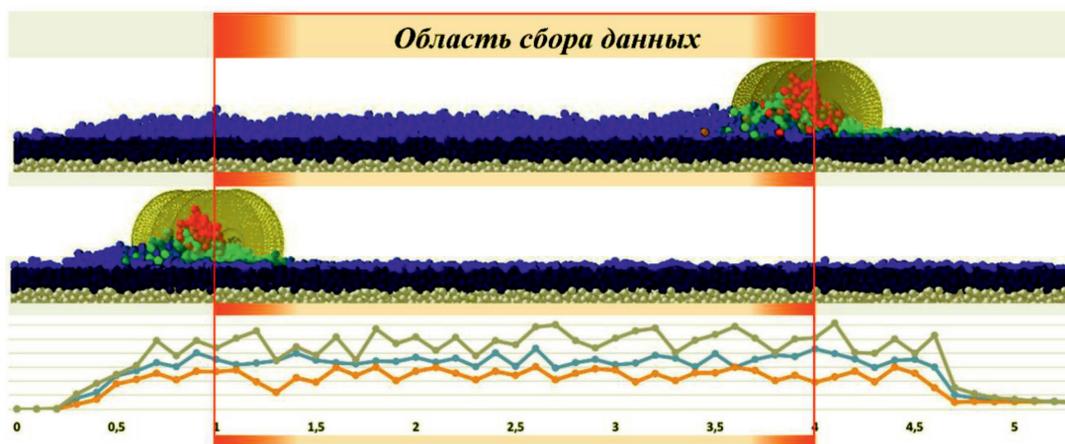


Рис. 4. Область сбора данных

Радиус почвенных частиц во всех сериях экспериментов составлял 18 мм, при этом использовалась исключительно сферическая форма. Плотность почвенных частиц принималась равной плотности твердой фазы почвы 2500 кг/м^3 . При засыпке почвенных частиц образовавшийся почвенный пласт обладал зна-

чительно меньшей плотностью порядка 1600 кг/м^3 , что соответствует плотности естественных лесных почв.

Для визуального контроля результатов моделирования и оценки смещения почвенных частиц использовались цветные эпюры скоростей движения частиц (рис. 5).

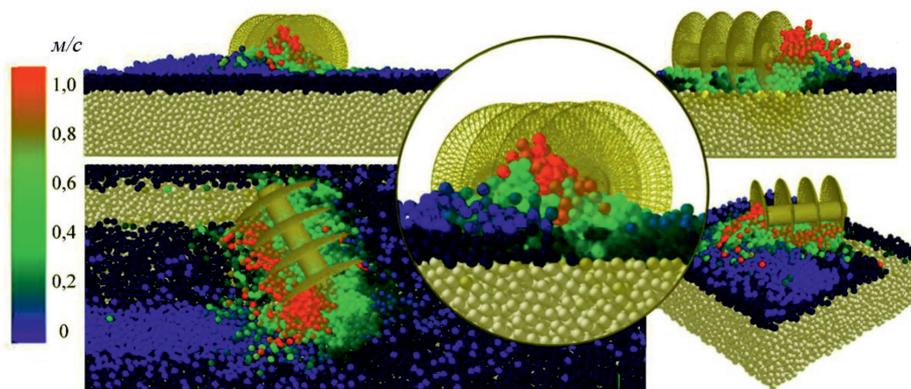


Рис. 5. Процесс моделирования

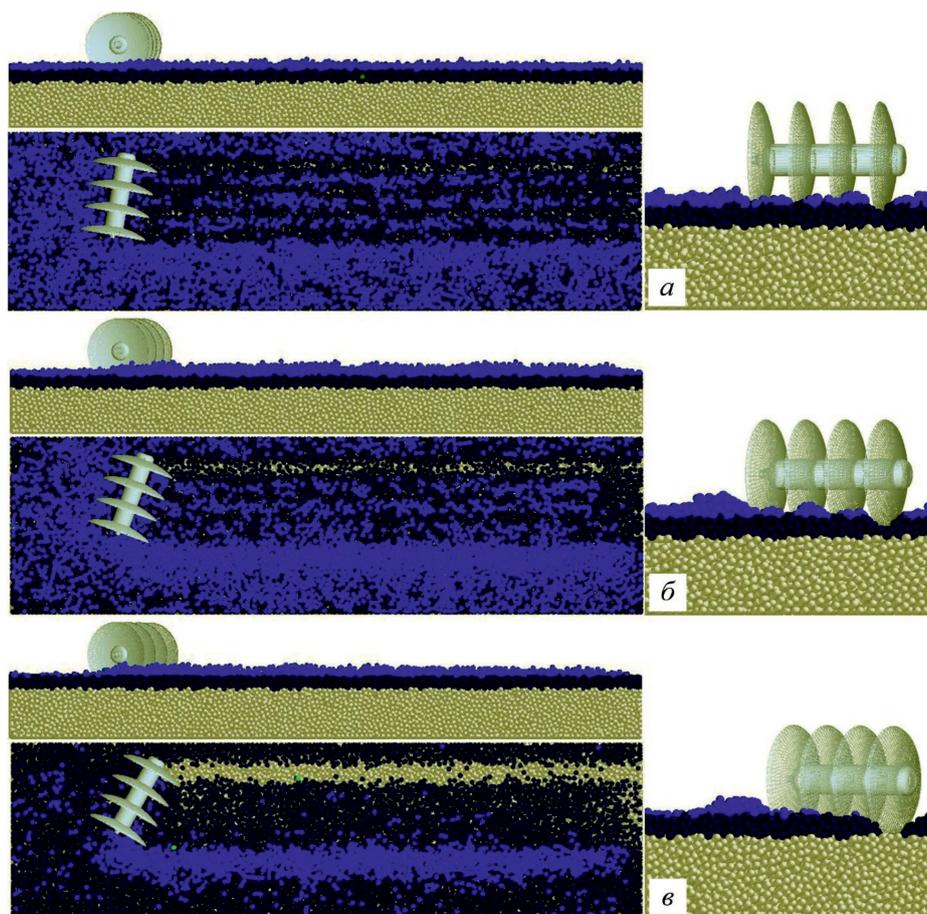


Рис. 6. Моделирование рабочего процесса дискового культиваторного рабочего органа:
а) угол атаки $\alpha = 10^\circ$; б) $\alpha = 20^\circ$; в) $\alpha = 30^\circ$

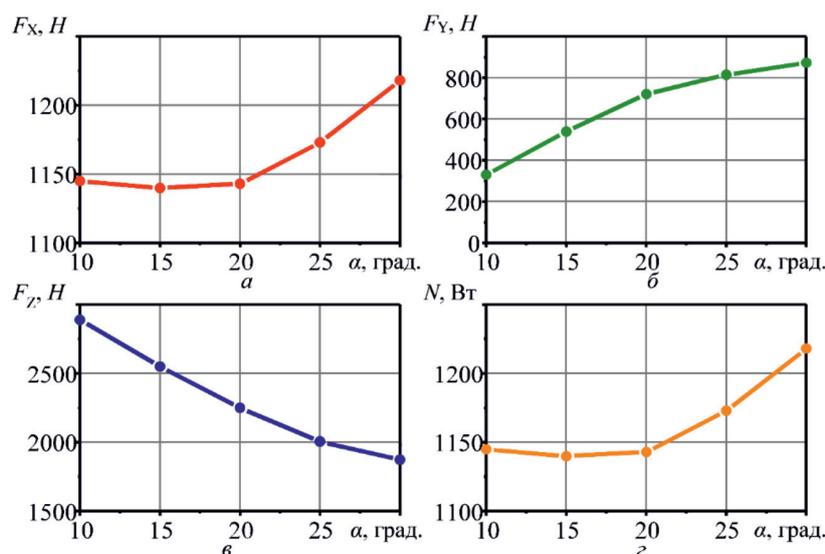


Рис. 7. Влияние угла атаки дисковой батареи α на силовые характеристики, испытываемые рабочим органом: силу тяги F_x (а), силу бокового увода F_y (б), выталкивающую силу F_z (в), тяговую мощность N (г)

Контроль силовых параметров процесса производился по трем составляющим вектора тягового сопротивления: проекция силы на ось X (F_x – продольная составляющая), проекция силы на ось Y (F_y – боковая сила) и проекция силы на ось Z (F_z – вертикальная составляющая), а также по потребляемой мощности (N) (рис. 6).

Результаты исследования и их обсуждение

Для демонстрации возможностей использованного метода приводятся результаты моделирования рабочего процесса дискового батарейного рабочего органа, при постоянной глубине обработки 10 см, углах атаки 10, 15, 20, 25 и 30°.

На рис. 6 представлен почвенный канал после проведения виртуального эксперимента по взаимодействию дискового батарейного рабочего органа с почвенной средой (a – угол атаки $\alpha = 10^\circ$; $b - \alpha = 20^\circ$; $v - \alpha = 30^\circ$). Визуализация процесса почвообработки позволяет как оценить некоторые технологические параметры процесса, так и осуществлять контроль моделирования, выявляя грубые ошибки.

Также виртуальный эксперимент позволяет исследовать силовые нагрузки, испытываемые рабочим органом. Так при углах атаки 10...20° сила тяги F_x и, соответственно, потребляемая мощность N малы и практически не зависят от α (рис. 7). Однако при увеличении угла атаки α более 20° сила тяги и потребляемая мощность существен-

но возрастают. Это объясняется переходом дисковой батареи в режим хорошей заглубляемости и интенсивной фрагментации почвы. С увеличением угла атаки возрастает также и сила бокового увода батареи F_y , что требует принятия компенсационных мер, а в случае двух противоположно ориентированных дисковых батарей – согласованного заглубления батарей для исключения бокового смещения. В то же время выталкивающая сила F_z снижается с увеличением α из-за улучшения заглубления дисковой батареи.

Таким образом, увеличение угла атаки дисковой батареи приводит к росту силы тяги, потребляемой мощности и повышает требования к фиксации батареи от бокового увода, однако приводит к уменьшению выталкивающей силы.

Заключение

Проведенные исследования показали, что метод конечных элементов FEM может применяться для моделирования связных почв, позволяя получать как силовые характеристики, так и данные о процессе разрушения и смещения почвенного массива. Метод вычислительной гидродинамики CFD может эффективно применяться только для исследования силовых характеристик перувлажненных почв. Попытки распространить данный подход на более широкий спектр почв ведут к возникновению значительных ошибок. Наибольшей универсаль-

ностью и достоверностью данных обладают дискретные методы. Так дискретный метод динамики частиц позволяет достоверно оценить как силовые, так и качественные характеристики процесса обработки почвы. Например, форму поперечного профиля, степень разрыхления (уплотнения) почвы, характер перемешивания почвенных слоев. При этом могут исследоваться рабочие органы сложной геометрической формы и рабочие органы с активным приводом.

Список литературы

1. Свечников П.Г. Модернизация почвообрабатывающих рабочих органов на основе исследования процесса их взаимодействия с почвой: дис. ... докт. техн. наук. Челябинск, 2013. 284 с.
2. Горячкин В.П. Теория разрушения почв. М.: Колос, 1965. С. 369–381.
3. Горячкин В.П. Теория клина. М.: Колос, 1965. С. 382–389.
4. 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.
5. Ibrahim 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.
6. Ibrahim 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.
7. Bentaher H., Ibrahim A., Hamza E., Hbaieb M., Kantchev G., Maalej A. Finite element simulation of moldboard-soil interaction. *Soil and Tillage Research*. 2013. Vol. 134. P. 11–16.
8. 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.
9. Karmakar S., Kushwaha R.L. Simulation of soil deformation around a tillage tool using computational fluid dynamics. *Transactions of the ASAE*. 2005. vol. 48. P. 923–932.
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. vol. 169. P. 199–208.
11. 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.
12. 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.