

8. Установка для сушки лубяного сырья: пат. 2518797 РФ, МПК F 26 В 17/04 С1 / В. В. Коновалов, Р. В. Коновалов, Э. В. Новиков, М. М. Ковалев, И. И. Круглий, А. В. Безбабченко; заявитель ГНУ ВНИИМЛ Россельхозакадемии. – № 201249304/06; заявл. 19.11.2012; опубл. 10.06.2014. // Изобретения. Полезные модели / Официальный бюллетень ФГУ ФИПС. – 2014. – № 16. – 6 с. : ил.

9. Изучение перспективного способа сушки льносырья / Э. В. Новиков [и др.] // Инновации в сельском хозяйстве: теоретический и научно-практический журнал. По итогам 10-й Междунар. науч.-техн. конф. «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве», посвященной 115-летию со дня рождения видного ученого в области электрификации и механизации животноводства лауреата Государственной премии СССР и премии Совета Министров СССР, члена-корреспондента ВАСХНИЛ В. С. Краснова. – Москва: ФГБНУ ВИЭСХ, 2016. – № 3 (18). – С. 334–340.

10. Новиков, Э. В. Исследование перспективного способа сушки льнотресты с целью разработки сушильной машины для льнозаводов / Э. В. Новиков, И. Н. Алтухова, А. В. Безбабченко // Инновационные разработки для производства и переработки лубяных культур: материалы. Междунар. науч.-практ. конф., г. Тверь, 18 мая 2017 г. / ФГБНУ ВНИИМЛ. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2017. – С. 298–309.

11. Масличный лен как глобальный сырьевой ресурс для производства волокна / Э. В. Новиков [и др.] // Молочнохозяйственный вестник [Электронный ресурс]. – 2017. – № 3 (27). – С. 187–203. – Режим доступа: <http://molochnoe.ru/journal>. – Дата доступа: 12.06.2018.

УДК 631.3, 519.876.5:631/635

Поступила в редакцию 22.08.2018  
Received 22.08.2018

**С. А. Антошук**

*ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»  
г. Минск, Республика Беларусь  
e-mail: santoshuk@rambler.ru*

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИСКРЕТНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ СЫПУЧИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В статье дан краткий обзор возможностей метода дискретных элементов – численного метода моделирования поведения сыпучих, твердых, жидких сред. Метод может применяться для обоснования параметров проектируемых сельскохозяйственных машин, взаимодействующих с различными сыпучими сельскохозяйственными материалами.

*Ключевые слова:* метод дискретного элемента, сыпучие сельскохозяйственные материалы, численное моделирование.

**S. A. Antoshuk**

*The State Scientific Institution «The Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus»  
Minsk, Republic of Belarus  
e-mail: santoshuk@rambler.ru*

## **THE DISCRETE ELEMENT METHOD TO MODELLING AGRICULTURAL BULK MATERIAL BEHAVIOR**

The article gives a brief review of the possibilities of discrete element method. The method can be used to determine the parameters of the projected agricultural machines interacting with various bulk agricultural materials.

*Keywords:* discrete element method, bulk agricultural materials, numerical simulation

### **Введение**

Сыпучие материалы в сельском хозяйстве – один из самых распространенных типов рабочего сырья, и описание их поведения является важной задачей при проектировании сельскохозяйственных машин и линий – от конвейеров до зерносушильных комплексов. В настоящее время практически все используемые теории описывают сыпучие материалы методами сплошных

сред, подразумевающих их континуальность, то есть непрерывность и одинаковость распределения всех характеристик в пространстве. При использовании континуального подхода движение слоя рассматривается как движение двух взаимодействующих сплошных деформируемых тел, например движущегося материала и твердой поверхности определенной геометрии. Континуальные модели могут быть довольно точны при описании больших объемов материала, но абсолютно недостоверны в случаях, когда имеют значение отдельные частицы. Так, поведение сыпучего материала в бункере возможно описать методами механики сплошных сред, но практически невыполнимой задачей представляется моделирование множества принципиальных частных случаев, например описание слоя зерна, сравнимого по толщине с размерами частиц, или вытекающего через отверстие потока минеральных удобрений. Так, континуальные методы перестают работать для удобрений, падающих из бункера на диск разбрасывателя, для описания псевдокипящего состояния зерна, для транспортируемых шнековым транспортером материалов, когда коэффициент заполнения 0,5 и менее, и так далее. Для таких случаев применима механика дискретных сред, изучающая движение различных материалов (причем необязательно сыпучих), для которых учитывается дискретность их структуры.

Метод дискретных элементов (МДЭ, или DEM – от англ. Discrete Element Method) является обобщением метода конечных элементов (МКЭ, или FEM), численного метода решения дифференциальных и интегральных уравнений, широко применяемого для решения задач механики твердого тела, гидродинамики, термодинамики и других. Метод дискретных элементов применяют чаще всего для решения разнообразных задач в горнодобывающих отраслях. Однако в последнее время метод используется в других сферах, в том числе для нужд сельскохозяйственной науки. Распространение метода связано в первую очередь с развитием вычислительной техники и появлением соответствующего программного обеспечения. Метод позволяет моделировать поведение большого количества частиц сыпучего вещества в процессе выполнения различных операций. Дискретный подход непосредственным образом связан с реальным движением отдельных частиц, поэтому его можно считать физически более естественным, чем континуальный.

### **Основные теоретические предпосылки метода дискретного элемента**

Задачи о движении сыпучей среды (зерна, удобрений, комбикормов, песка, корнеплодов) под действием собственного веса, за счет движения рабочей поверхности винтового или ленточного конвейера, на вибростоле и в других случаях в настоящее время решаются на основе механики сплошной среды и других теорий, подразумевающих однородность материала и неизменность его основных свойств в пространстве. На практике частицы сыпучей среды вступают во взаимодействие с соседними частицами и поверхностями машин, хаотически меняют свою скорость и направление движения, импульс. Метод дискретного элемента позволяет учитывать положение и направление движения каждой частицы и производить перерасчет ее кинематических и динамических параметров через определенный момент времени, учитывая взаимодействие с другими частицами.

Перед началом моделирования задаются некоторое начальное расположение частиц в пространстве (исходная структура материала) и начальное распределение их скоростей (кинематическое движение системы в исходном состоянии). Далее задача сводится к решению задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

Метод дискретных элементов (МДЭ) впервые был предложен в конце 70-х гг. XX в. [1] как некое сообщество взаимодействующих сфер на плоскости. С развитием мощностей вычислительной техники появилась возможность моделировать материалы не только на плоскости, но и в пространстве. Методом дискретных элементов моделируют не только сыпучие материалы, но также твердые тела сложной формы [2], в этом случае каждое тело состоит из множества жестко связанных между собой сфер.

В основе МДЭ лежат общеизвестные выражения баланса механического движения частицы [3, 4]:

$$\begin{cases} m_i \frac{dV_i}{dt} = \sum_{i=1, j \neq i}^k F_{ij} + m_i g; \\ I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{i=1, j \neq i}^k (T_{ij} + M_{ij}), \end{cases} \quad (1)$$

где  $m_i$  – масса частицы;  $V_i$  – вектор линейной скорости центра масс;  $I_i$  – момент инерции;  $\omega_i$  – вектор угловой скорости;  $F_{ij}$  – внешняя сила, действующая на частицу  $i$  через контакт с частицей  $j$ ;  $k$  – число частиц в контакте с частицей  $i$ ;  $T_{ij}$  – внешний крутящий момент, связанный с контактным взаимодействием частиц  $i$  и  $j$ ;  $M_{ij}$  – момент сопротивления качению.

В МДЭ применяется допущение, что каждая частица представляет собой сферу радиусом  $R_i$ . Для описания контактного взаимодействия между частицами в МДЭ наиболее часто используют модель Герца [5], в которой предполагается, что частицы при контакте не деформируются, а перекрывают друг друга на некоторую величину, образуя пятно контакта.

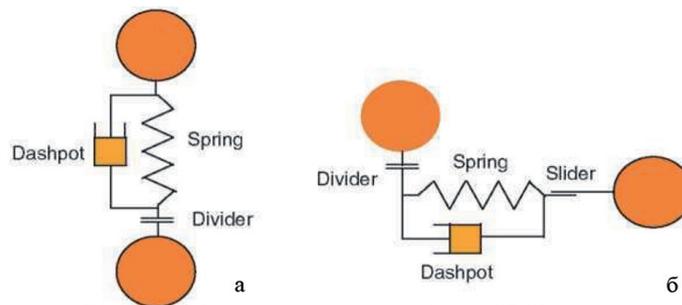
Поверхностные силы  $F_{ij}$  состоят из сил отталкивания  $F_{n,ij}$  и сил трения  $F_{t,ij}$ . Сила отталкивания возникает между частицами при условии их перекрытия и направлена по нормали  $n_{ij}$  в направлении центра  $i$ -й частицы.

Для вязкоупругой модели соударения [4]:

$$F_{n,ij} = F_{ne,ij} + F_{nv,ij}, \quad (2)$$

где  $F_{ne,ij}$  – упругая,  $F_{nv,ij}$  – вязкая составляющие. Значения указанных составляющих определяются по известным зависимостям, которые могут быть найдены в литературе, например, в [5, 6].

Визуальная модель взаимодействия частиц друг с другом изображена на рисунке 1.



а) взаимодействие по нормали; б) взаимодействие в тангенциальном направлении

Рисунок 1. – Модель взаимодействия частиц друг с другом

Численное решение системы дифференциальных уравнений (1) для каждой  $i$ -й частицы за время  $t + \Delta t$  (где  $\Delta t$  – шаг интегрирования) может быть проведено при помощи ряда разностных схем, отличающихся различной точностью, устойчивостью и порядком сходимости и реализованных в существующем программном обеспечении либо самостоятельно исследователем посредством собственной программы.

В численной модели точность решения зависит главным образом от выбора временного интервала. Существуют различные методики для его определения. Обычно он находится в пределах  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  с. Очевидно, что чем меньше заданный временной интервал, тем больше времени потребуют вычисления. Отсюда вытекает один из главных недостатков МДЭ – высокая требуемая вычислительная мощность компьютеров и значительное время расчетов (от нескольких часов до нескольких недель – в зависимости от количества частиц, шага интегрирования по времени, мощности компьютера), что тем не менее гораздо дешевле и быстрее изготовления натурного образца, проведения экспериментов и обработки данных.

Для использования МДЭ на практике существует целый ряд программного обеспечения, как коммерческого, так и бесплатного (например, Newton DEM Software, EDEM, Chute Maven – закрытые коммерческие продукты; YADE, LIGGGHTS – свободно доступные и бесплатные).

## Применение МДЭ для нужд сельского хозяйства

Метод дискретных элементов преимущественно используется для изучения механики грунтов, движения кусковых материалов в горнодобывающей промышленности, истечения сыпучих материалов из бункеров и кузовов автотранспорта, а также целого ряда других задач. Для решения вопросов аграрной науки применяется сравнительно недавно, преимущественно западными учеными.

В работе [6] изучается движение сыпучего материала при его истечении из бункера. Существующие теории говорят о симметричном характере истечения материала из симметричной емкости. Однако экспериментальные исследования показали, что при определенных условиях режим течения становится неустойчивым – при достаточно больших смещениях образуются линии скольжения, разбивающие материал на дискретные блоки, которые движутся практически как жесткие целые. Отсюда возникают неточности при расчете бункеров, наличие которых заставляют тратить время на изготовление экспериментальных установок и проведение дополнительных испытаний. Моделирование дискретным методом позволяет избежать этих этапов. Моделирование процесса методом МДЭ позволяет подтвердить экспериментальные данные и получить новые, которые будут использованы при проектировании бункерных устройств.

В работах [7, 8] МДЭ применен для описания истечения минеральных удобрений из бункера и разбрасывания их центробежным диском (рисунок 2).

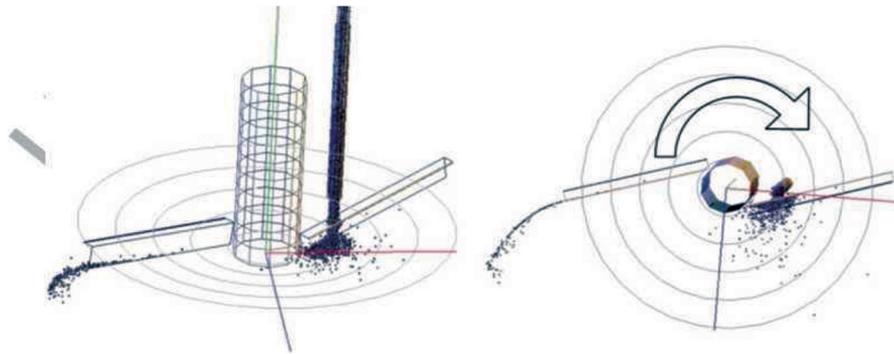
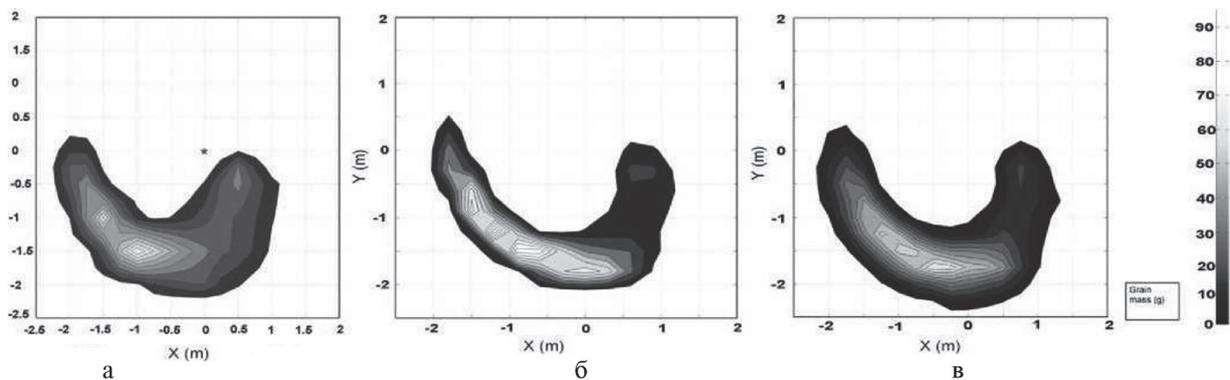


Рисунок 2. – Визуализация модели истечения минеральных удобрений из бункера на диск

Смоделирован весь цикл работы разбрасывателя, начиная от загрузки удобрений в бункер, их истечение из бункера, движение частиц по диску, полет и распределение по полю. Исследовано возможное распределение удобрений в зависимости от координат пятна высыпаемых удобрений на диске, рассчитано распределение удобрений по поверхности поля в зависимости от размера и массы гранул (рисунок 3).



а – экспериментальные значения; б, в – результаты моделирования

Рисунок 3. – Распределение гранул минеральных удобрений в зависимости от их массы и расстояния от разбрасывателя

В работах [9, 10] метод применен для оценки повреждаемости фруктов (яблок) во время их транспортировки (рисунок 4).



Рисунок 4. – Исследование повреждаемости яблок при транспортировке в ящике, слева – фото эксперимента, справа – модель, рассчитанная методом МДЭ

В работах моделировались процессы падения яблок при их уборке и их поведение при дальнейшей перевозке.

### Заключение

Метод дискретного элемента при проектировании сельскохозяйственных машин является перспективным инструментом, применимым, прежде всего, для решения задач, связанных с исследованием поведения сыпучих сред, когда невозможно применить имеющиеся теории, разработанные с использованием континуального подхода. К ним относятся: истечение материалов из бункеров и других емкостей, анализ процессов дозирования и смешивания, сепарации, очистки, сушки и целый ряд других задач. Метод применим не только для сыпучих сред, его используют для анализа прочности металлоконструкций и фундаментов, исследования движения жидкостей и газов, а также других сред как в динамике, так и в статике.

### Литература

1. Cundall, P. A discrete numerical model for granular assemblies / P. Cundall, O. Stark // *Geotechnique*. – 1979. – Vol. 29.к1. – P. 47–65. – DOI: 10.1680/geot.1979.29.1.47.
2. Luding, S. Introduction to discrete element methods: basic of contact force models and how to perform the micro-macro transition to continuum theory / S. Luding // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2008. – Vol. 12. к7\_8. – P. 785–826. – DOI: 10.1080/19648189.2008.9693050.
3. K. Kesava Rao. *An Introduction to Granular Flow* / K. Kesava Rao., Prabhu R. Nott. – New York: Cambridge University Press, 2008. – 512 p.
4. Каменецкий, Е. С. Тестирование модели виброкипящего слоя, использующей метод дискретного элемента / Е. С. Каменецкий, Н. С. Орлова, М. В. Волик, Д. Г. Минасян // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. – 2017. – № 4–1. – С. 18–23.
5. Makse, H. A. Granular packings: Nonlinear elasticity, sound propagation, and collective relaxation dynamics / H. A. Makse, N. Gland, D. L. Johnson, L. Schwartz // *Phys. Rev. E*. – 2004. – Vol. 70.
6. Клишин, С. В. Применение метода дискретных элементов при анализе гравитационного движения гранулированного материала в сходящемся канале / С. В. Клишин // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2009. – № 12. – С. 273–277.
7. Van Liedekerke, P. Discrete element simulations of the influence of fertiliser physical properties on the spread pattern from spinning disc spreaders / P. Van Liedekerke, E. Tijskens, H. Ramon // *Biosystems engineering*. – 2009. – P. 1–14.
8. Van Liedekerke, P. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader / P. Van Liedekerke, E. Tijskens, E. Dintwa, F. Rioual, J. Vangeyte, H. Ramon // *Powder Technology*. – 2008. – V. 190 (3). – P. 348–360.
9. Van Zeebroeck, M. Determination of the dynamical behaviour of biological materials during impact using a pendulum device / M. Van Zeebroeck, E. Tijskens, P. Van Liedekerke, V. Deli, J. De Baerdemaeker, H. Ramon // *Journal of sound and vibration*. – 2003. – V. 266. – P. 465–480.
10. Van Zeebroeck, M. The Discrete Element Method (DEM) to simulate fruit mechanical damage during transport: effect of vibrations during transport on bruise damage / M. Van Zeebroeck, E. Tijskens, E. Dintwa, J. Loodts, J. De Baerdemaeker, H. Ramon // *Acta horticulturae Proceedings of Model-it, May 29- June 03, 2005*. – Leuven, Belgium, 2005.