

10. Филиппов, А. И. Агрегат комбинированный для обработки профилированной поверхности почвы / А. И. Филиппов, Э. В. Заяц, А. А. Аутко, С. В. Стуканов // *Материалы XXI МНПК «Технология хранения и переработки сельскохозяйственной продукции»*; Гродно.- ГГАУ, 2019. – С. 255–258.

11. Филиппов А. И. Многовекторный узел распыла / А. И. Филиппов, А. А. Аутко, Э. В. Заяц, С. В. Стуканов // *Материалам XXII МНПК «Современные технологии сельскохозяйственного производства»*; Гродно.- ГГАУ, 2019. – С. 258–260.

УДК 631.35

Поступила в редакцию 17.10.2019

Received 17.10.2019

**А. А. Жедик, А. С. Шантыко, Д. Н. Иванов, Д. В. Джасов**

*Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,  
г. Гомель, Республика Беларусь*

### **СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ КОМБАЙНОСТРОЕНИИ**

В работе представлен обзор современных методов исследования и оптимизации технологического потока, применимых для использования в сельскохозяйственном комбайностроении.

Ключевые слова: метод динамики частиц, метод молекулярной динамики, метод дискретных элементов, имитационное моделирование, технологический процесс.

**A. A. Zhedzik, A. S. Shantyko, D. N. Ivanou, D. V. Jasov**

*Scientific and Technical Harvester Centre OJSC “Gomselmash”,  
Gomel, Republic of Belarus  
e-mail: kioldpan@gomselmash.by*

### **MODERN METHODS FOR SIMULATING MODELING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AS A TOOL FOR RESEARCH AND OPTIMIZATION OF STRUCTURE IN AGRICULTURAL COMBINE BUILDING**

The work presents an overview of modern research methods and optimization of the process flow, applicable for use in agricultural combine harvesting.

*Keywords:* particle dynamics method, molecular dynamics method, discrete element method, simulation, technological process.

В сельскохозяйственном комбайностроении важным является понимание технологических процессов, происходящих в рабочих органах сельскохозяйственной техники. Исследование технологических процессов экспериментальным путём трудно реализуемо из-за необходимости использования дорогостоящего оборудования и проведения дополнительных доработок конструкции комбайна. Применение же методов имитационного моделирования технологического потока позволяет проводить всесторонние исследования процессов происходящих в сельскохозяйственной машине [1].

Среди наиболее распространенных и современных методов имитационного моделирования физических и технологических процессов особый интерес представляют методы, базирующиеся на концепции дискретного представления вещества, – метод динамики частиц (молекулярной динамики) и метод дискретных элементов. Технологический процесс представляет собой некий скоростной поток, состоящий из совокупности взаимодействующих между собой твердых частиц. Некоторые примеры моделирования потока сыпучих сред: зерно, перемещаемое через перерабатывающее оборудование; руду, пропускаемую через горнодобывающее оборудование; песок, падающий через песочные часы. Движущийся поток может быть довольно сложным, поскольку потоки проявляют твердоподобное, жидкоподобное или комбинацию обоих типов поведения.

Метод молекулярной динамики является методом компьютерного моделирования, основанного на представлении материала совокупностью взаимодействующих частиц (материальных точек), для которых записываются классические уравнения динамики. Перед началом моделирования задается некоторое начальное распределение частиц в пространстве (исходная структура материала) и начальное распределение скоростей частиц (механическое и тепловое движение системы в исходном состоянии). Частицам разрешено взаимодействовать в течение фиксированного периода времени, что дает представление о динамическом развитии системы. Траектории частиц определяются путем численного решения уравнений движения Ньютона для системы взаимодействующих частиц, описываемых посредством потенциалов взаимодействия, основным свойством которых является отталкивание при сближении и притяжение при удалении. Далее задача сводится к решению задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Метод был первоначально разработан в области теоретической физики в конце 1950-х годов, но сегодня применяется в основном в химической физике, материаловедении и моделировании биомолекул.

Наиболее известными программными продуктами, для расчета с помощью метода молекулярной динамики являются: ADF, Ascalaph Designer, CHARMM, AMBER, GROMACS, LAMMPS, Materials Studio.

Метод молекулярной динамики является одной из разновидностей метода динамики частиц, когда в качестве частиц выступают атомы или молекулы. Однако в случае, когда частицы представляют собой более крупные образования (зерна, камни или другие материалы) и имеют более сложную геометрическую структуру, применяют метод дискретных элементов (DEM). В методе дискретных элементов в отличие от метода молекулярной динамики дополнительно используется вращательная степень свободы частиц.

Метод дискретных элементов – это численный метод прогнозирования поведения объемных твердых тел и он является обобщением метода конечных элементов (FEM) [2]. Здесь множество взаимодействующих между собой тел представляются как дискретные элементы, имеющие форму максимально приближенную к реальной частице. Примеры такого дискретного представления различных частиц методом дискретных элементов представлены на рис. 1.

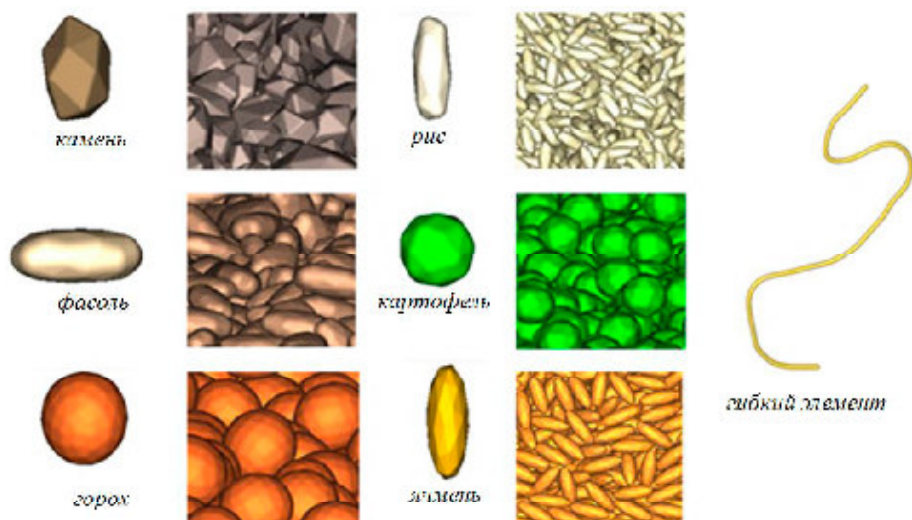


Рис. 1. Пример дискретного представления вещества методом дискретных элементов

При моделировании технологического процесса этим методом задаются начальные положения и скорости частиц, а так же различные законы взаимодействия между парами частица-частица и частица-геометрия. Для этого достаточно, чтобы при описании взаимодействия существовали разрешимые уравнения. Затем, исходя из этих начальных условий и задаваемых физических законов взаимодействия частиц, вычисляются силы, действующие на каждую частицу по формуле:

$$\sum F_{net} = \sum F_{body} + \sum F_{surface} = m \frac{dv}{dt},$$

где  $F$  – силы, действующие на частицу;

$m$  – масса частицы;

$v$  – скорость движения.

При этом расчет сил и моментов выполняется не для всего кол-ва частиц, имеющихся в расчётной модели, а только для тех из них, с которыми она может вступать в контакт в заданном диапазоне. Информация о текущем положении частицы, скорости и временном шаге используется, чтобы переместить частицу в ее следующее местоположение в симуляции:

$$v_{new} = v_{old} + \int_t^{t+\Delta t} \frac{\sum F_{net}}{m} dt,$$

$$x_{new} = x_{old} + \int_t^{t+\Delta t} v_{new} dt,$$

где  $x$  – перемещение частицы.

В результате получаются начальные данные для следующего шага.

Наиболее известными программными продуктами, реализующими метод дискретных элементов, являются: Bulk Flow Analyst, PFC2D и PFC3D, Rocky DEM, EDEM (DEM Solutions Ltd.), GROMOS 96, ELFEN, MIMES, PASSAGE®/DEM.

Благодаря достижениям в области увеличения вычислительных компьютерных мощностей и использованию в программных продуктах современных численных алгоритмов расчета стало возможным моделировать поведение миллионов частиц. Сегодня DEM становится широко признанным в качестве эффективного метода решения инженерных задач при исследовании технологических процессов. Недавно этот метод был расширен с учетом термодинамики и связью с вычислительной гидродинамикой (CFD) и FEM.

Можно выделить следующие преимущества применения DEM:

- DEM может использоваться для имитации технологических процессов с потоком разнородных частиц. Несколько исследовательских групп независимо разработали программное обеспечение для моделирования, которое хорошо согласуется с экспериментальными результатами в широком спектре инженерных задач: перемешивание адгезивных порошков, гранулированных смесей, дробление скальных пород и пр.

- DEM позволяет более детально изучить микродинамику технологического потока, что часто невозможно сделать с помощью физических экспериментов. Например, матрица сил, сформированная в сплошной среде, может быть визуализирована с использованием матрицы высот.

Так же стоит отметить и недостатки применения DEM, имеющиеся на данный момент:

- DEM требователен к вычислительным ресурсам. Использование максимального количества частиц в расчетной модели и продолжительность расчета имитационной модели ограничены вычислительной мощностью аппаратного обеспечения. Так как реальные технологические потоки содержат миллионы частиц, то для проведения моделирования необходимо использовать современные вычислительные кластеры, что доступно не каждой компании.

Для создания адекватных моделей необходимо проведение большого количества экспериментов для определения свойств, характеризующих взаимодействующие частицы между собой и рабочими органами.

На сегодняшний день фактическое время выполнения программы может быть значительно уменьшено, если в качестве вычислительной мощности для имитационного моделирования использовать графические процессоры (GPU), из-за использования большого количества вычислительных ядер. Кроме того, графические процессоры, как правило, значительно более энергоэффективны, чем обычные вычислительные кластеры на центральных процессорах (CPU).

Безусловно, при вычислении траекторий движения каждой частицы описанными методами возникают необратимые погрешности, а задача вычисления индивидуальных траекторий прин-

ципально нелинейна и неустойчива. Однако, можно ожидать, что эти обстоятельства не повлияют на макроскопическую усредненную картину процесса, а проведение натурных испытаний позволит верифицировать имитационные модели и снизить погрешность до минимально необходимого уровня.

Как показали первые опыты имитационного моделирования технологического процесса выгрузки зерна в зерноуборочном комбайне с помощью метода дискретных элементов, проведенные в НТЦК ОАО «Гомсельмаш», визуализированный технологический процесс позволяет выработать конструктивные решения по совершенствованию рабочих органов комбайна для оптимизации технологического процесса [1]. Визуализация результатов имитационного моделирования в виде полей скоростей представлена на рис. 2.

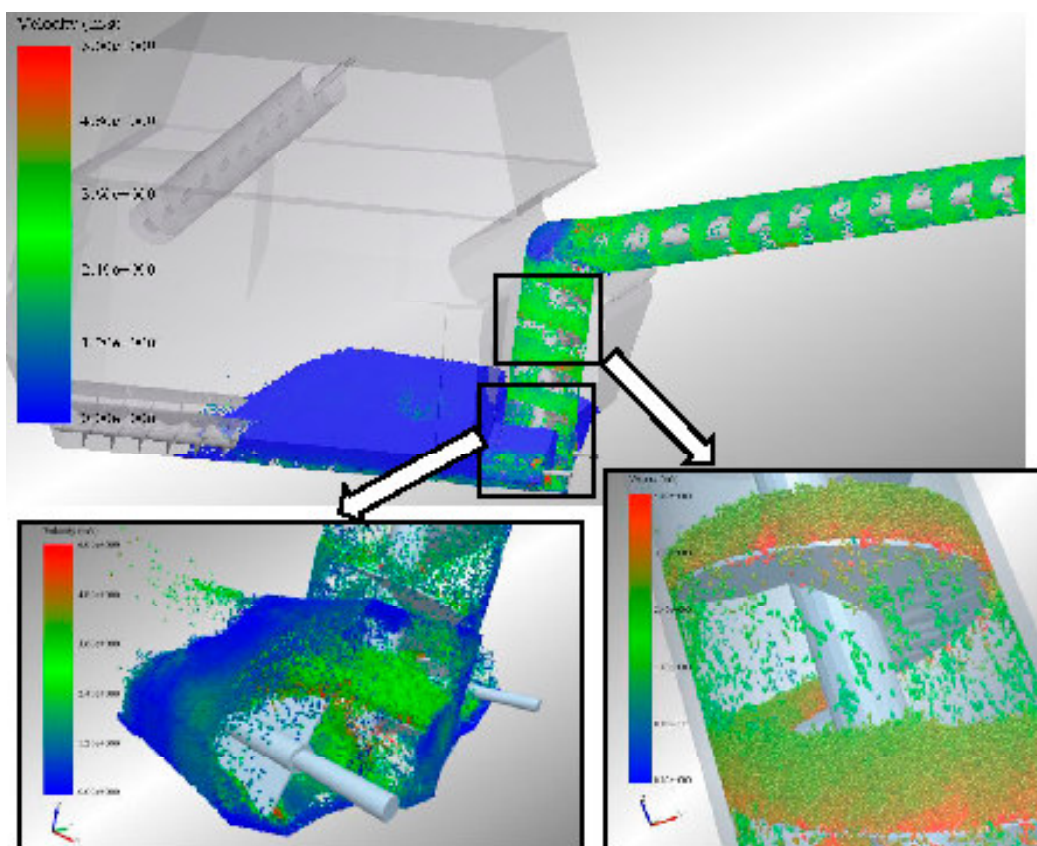


Рис. 2. – Визуализация результатов моделирования в виде полей скоростей

Эти результаты свидетельствуют о перспективности исследования технологических процессов в сельскохозяйственных машинах методом дискретных элементов.

Применение метода дискретных элементов для создания имитационных моделей в сельскохозяйственном комбайностроении позволяет предсказать силу, крутящий момент и потребляемую мощность рабочих органов комбайна и определить нагруженность конструкции в целом. Это в свою очередь позволяет оптимизировать технологический процесс с учетом геометрических параметров конструкции, повысить производительность, увеличить срок службы рабочих органов, добиться уменьшения микрповреждений технологической массы, минимизировать мертвые зоны и сегрегацию.

#### Список использованных источников

1. Иванов, Д. Н. Применение имитационного моделирования для анализа технологического процесса выгрузки зерна / Д. Н. Иванов // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра: сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции. – Гомель: Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», 2017. – С. 68–69.

2. Иванов, Д. Н. Метод дискретных элементов как инструмент исследования и оптимизации технологического процесса в зерноуборочном комбайне / Д. Н. Иванов, Д. В. Джасов // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра: сборник тезисов докладов третьей международной научно-практической конференции. – Гомель: Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», 2019. – С. 54–56.

УДК 631.355.06

Поступила в редакцию 17.10.2019

Received 17.10.2019

**А. С. Шантыко, А. Д. Конявский, Д. В. Джасов, Ю. В. Чупрынин**

*Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,  
г. Гомель, Республика Беларусь*

### **ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЗМА ПОПЕРЕЧНОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ ТРАВЯНОЙ ЖАТКИ**

В работе представлена функциональная математическая модель, позволяющая проводить анализ и подбор параметров механизма поперечного уравнивания травяной жатки.

*Ключевые слова:* механизм уравнивания, рычажный механизм, травяная жатка, векторный способ.

**A. S. Shantyko, A. D. Konyavskiy, D. V. Jasov, Yu. V. Chuprynin**

*Scientific and Technical Harvester Centre OJSC “Gomselmash”,  
Gomel, Republic of Belarus*

### **FUNCTIONAL MATHEMATICAL MODEL OF MECHANISM OF TRANSVERSE BALANCING OF GRASS HEADER**

The work presents functional mathematical model, analysis and selection of parameters of the mechanism of transverse balancing of grass header.

*Keywords:* mechanism of balancing, linkage, grass header, vector method.

Современные мощные высокопроизводительные кормоуборочные комбайны агрегируются широкозахватными жатками и работают на высоких скоростях движения (до 8...12 км/ч). Для адаптеров с шириной захвата более 4 м необходимо отслеживать неровности в поперечном направлении, иначе будут наблюдаться потери по высоте среза. Поэтому помимо механизмов продольного копирования рельефа поля используются механизмы поперечного копирования (качания) адаптера [1]. Однако, в связи с тем, что в большинстве случаев центр тяжести адаптера находится несимметрично относительно оси качания, происходит завал адаптера в одну из сторон, и как следствие нагрузка на опорную поверхность между левым и правым башмаками распределяется неравномерно.

Для исключения завала адаптера в одну из сторон, обеспечения копирования и равномерного распределения нагрузки на почву между левым и правым башмаком в зерноуборочных, а также кормоуборочных адаптерах применяют механизм поперечного уравнивания (МПУ).

По способу уравнивания адаптера МПУ можно условно разделить на три группы: рычажно-пружинные, гидравлические и смешанные. В НТЦК ОАО «Гомсельмаш» широкое применение нашли рычажно-пружинные МПУ.

#### **Постановка задачи**

При постоянно изменяющемся рельефе поля, необходимо непрерывно обеспечивать следующие условия: копирование жаткой рельефа поля; установку и поддержание предварительно выбранной высоты среза на адаптере; максимально возможное постоянство давления на почву опорных башмаков адаптера. При этом для гарантированного срабатывания МПУ, нагрузка на почву от башмака не должна превышать нагрузку на башмак от механизма продольного копирования во всем диапазоне копирования.