

## КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ДИНАМИКУ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ В ПРОЦЕССЕ РАССЕИВАНИЯ

**В. Шарко**, канд. техн. наук,  
e-mail: vadim.vegov@almadavir.com, <https://orcid.org/0000-0002-4497-4945>,  
НЦ «Альмадавир»,  
**А. Шуляя**, канд. физ.-мат. наук, с.н.с.,  
e-mail: anavats51@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3943-1831>,  
ГНУ «УкрНИИПИТ им. Л. Погорелого»,

### Аннотация

**Целью работы** является построение комплексной модели динамики гранулированных частиц, позволяющей более адекватно реальности исследовать технологию их перемещения и рассеивания в рамках конструктивных ограничений и внешних воздействий. Модель должна учитывать влияние на динамику конструктивных ограничений устройства рассеивания и вибрацию элементов конструкции, влияние воздушного потока на скорость перемещения и воздействие на частицы гравитационного поля.

Достаточная адекватность модели реальному процессу дополняет возможность проверки влияния технических параметров рассеивающих устройств и внешних факторов на распределение частиц по поверхности без необходимости проведения физического эксперимента, что должно в целом упростить имитационное моделирование при создании специальных машин, например, для посева семян сидератов или для разбрасывания удобрений.

**Методы исследования:** теория моделирования, физика гетерогенных явлений, пространственно-часовая динамика.

**Результаты исследований.** На основе адекватных частных моделей разработана методика комплексного аналитического моделирования динамики процесса рассеивания гранулированных частиц, учитывающая их столкновение с элементами конструкции устройства рассеивания, вибрацию конструкции и воздействие на частицы воздушного потока и гравитационного поля.

**Выводы.** Предложенная в работе методика комплексного аналитического моделирования динамики процесса рассеивания гранулированных частиц на основе адекватных частных моделей, учитывающих конструктивные ограничения и внешние факторы влияния на этот процесс, позволяет разработать алгоритм численного расчета для определения закономерности распределения частиц при их падении на целевую поверхность.

**Ключевые слова:** комплексное моделирование, динамика процесса, гранулированные частицы, частные модели.

**Постановка проблемы.** В работе [1] была предложена модель процесса рассеивания гранулированных частиц, находящихся при движении в свободном взаимодействии, с целью использования её при разработке комплексной модели, более адекватной реальному технологическому процессу.

Там же отмечалось, что важными для

комплексной модели являются вопросы моделирования влияния на динамику гранулированных частиц конструктивных и внешних факторов, а именно, влияния конструктивных ограничений устройства рассеивания, воздействия воздушного потока на скорость перемещения частиц, а также влияния на динамику частиц гравитационного поля и вибрации эле-

ментов конструції.

**Области применения** комплексной аналитической модели, как и в [1], сельхозмашиностроение, создание новых материалов, строительство.

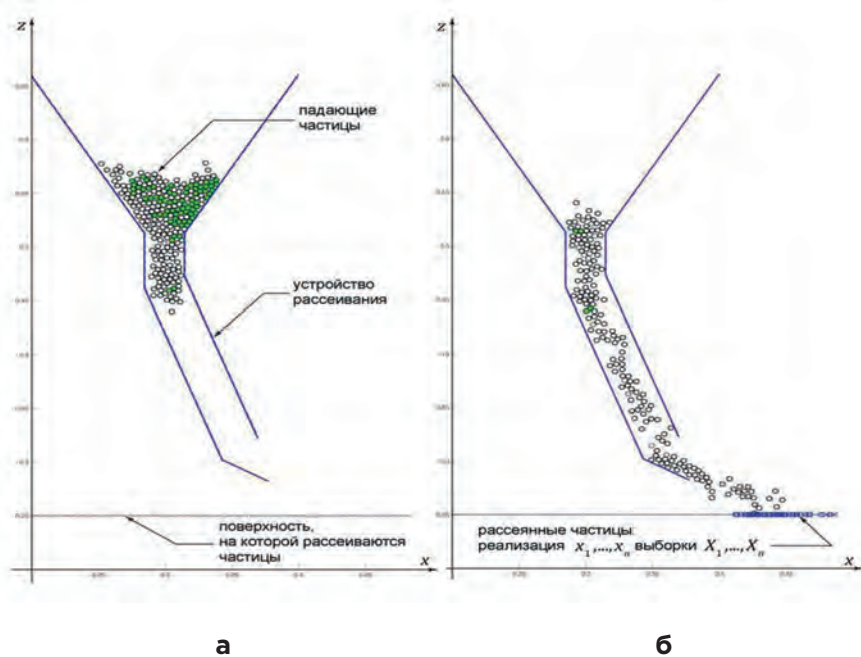
**Целью работы** является разработка комплексной модели технологического процесса рассеивания гранулированных частиц, реально учитывающей не только их свободное взаимодействие, но и соударение в процессе движения с элементами конструкций рассеивания, а также влияния на динамику частиц воздушного потока, в котором они перемещаются, гравитационного поля и вибрационных явлений в конструкциях.

**Основной материал исследования.** Процесс по аналогии с [1] происходит в 3-мерном евклидовом пространстве  $E^3$  с такой системой координат, что плоскость  $XOY$  совпадает с плоскостью поверхности, на которую падают частицы, а положительное направление оси  $OZ$  будет направлением «вверх». На пространстве  $E^3$  также вводится векторное поле действующих на частицы сил, такое, что все вектора этого поля равны по модулю и имеют одинаковое отрицательное направление вдоль оси  $OZ$ .

Однако для упрощения выкладок рассматриваем течение процесса в двумерном представлении, то есть в сечении: по оси  $OX$  – распределение по горизонтали, по оси  $OY$  – движение по вертикали.

Кроме этого, будем использовать введенные в [1] – абсолютную систему координат ( $АСК$ ), связанную с поверхностью рассеивания, и относительную систему координат ( $ОСК$ ), которая связана с движущейся анализируемой частицей в некоторый рассматриваемый момент времени  $t$ .

**1. Моделирование взаимодействия частиц с элементами конструкции устройства рассеивания**



**Рисунок 1** – Вариант конструкции устройства и процесса рассеивания мелких гранулированных частиц

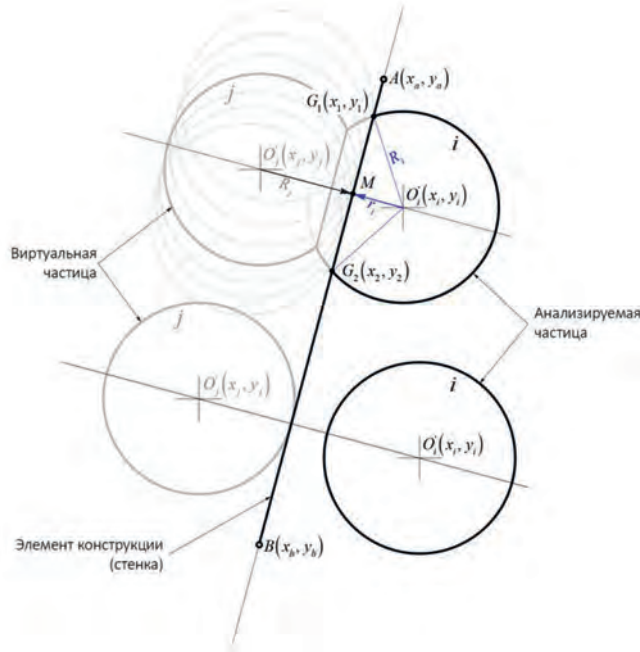
На рисунке 1 приведен в вертикальном сечении один из возможных примеров конструкции устройства для рассеивания гранулированных частиц, в частности, мелких удобрений или семян сидеральных культур типа горчицы [2].

В этой модели принимаем, что конструктивные ограничения устройства рассеивания в вертикальном сечении задаются следующим образом:

1. Геометрически границей элемента конструкции есть отрезок  $[A, B]$  с заданными координатами его концов  $A = (x_a, y_a)$ ,  $B = (x_b, y_b)$ ;

2. Материал и поверхность элемента конструкции имеет точно такие же свойства, как и у частицы, и поэтому при столкновении частицы и элемента конструкции возникающая сила деформации будет эквивалентна силе, которая возникла бы при столкновении анализируемой частицы и некоторой виртуальной неподвижной частицы, находящейся в точке  $O'$  (рис.2) и имеющей такую же форму и размер (что упростит моделирование такого взаимодействия).

Рассмотрим действия, определяющие пересечение частицей элемента конструкции. Уравнение окружности с центром в точке  $O'$  и радиусом  $R$  имеет вид [3]:



**Рисунок 2** – Взаимодействие частицы с элементом конструкции

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = R_i^2. \quad (1)$$

Запишем уравнения прямой [6], проходящей через две точки  $A$  и  $B$ :

$$\frac{x - x_a}{y_b - y_a} = \frac{y - y_a}{y_b - y_a}, \text{ если } x_b - x_a \neq 0, y_b - y_a \neq 0, \quad (2)$$

$$\frac{y - y_a}{y_b - y_a} = 0, \text{ если } x_b - x_a = 0, y_b - y_a \neq 0, \quad (3)$$

$$\frac{x - x_a}{x_b - x_a} = 0, \text{ если } y_b - y_a = 0, x_b - x_a \neq 0. \quad (4)$$

Обозначим для упрощения записи:  $x_b - x_a = \Delta x$ ,  $y_b - y_a = \Delta y$ , и преобразуем выражения в (2):

$$\frac{x - x_a}{\Delta x} = \frac{y - y_a}{\Delta y}, \text{ откуда } y = \frac{x - x_a}{\Delta x} \Delta y + y_a,$$

То есть, окончательно имеем:  
 $y = ax + b$ , где  $a = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ ,  $b = -x_a \frac{\Delta y}{\Delta x} + y_a$ .

Подставляя это выражение в уравнение окружности (1), получаем:

$$(x - x_i)^2 + (ax + b - y_i)^2 = R_i^2.$$

$$\text{Или } (x - x_i)^2 + (ax + c)^2 = R_i^2,$$

$$\text{где } c = b - y_i.$$

Из чего после некоторых преобразований получаем:

$$A_1 x^2 + B_1 x + C_1 = 0, \quad (5)$$

$$\text{где } A_1 \equiv 1 + a^2, B_1 \equiv 2(ac - x_i),$$

$$C_1 \equiv x_i^2 + c^2 - R_i^2.$$

Из выражения (3) получаем:  $y = y_a$ . Подставляем  $y_a$  в (1) и получаем выраже-

ние  $(x - x_i)^2 + (y_a - y_i)^2 = R_i^2$ , из которого, проводя преобразования, имеем:

$$A_2 x^2 + B_2 x + C_2 = 0, \quad (6)$$

$$\text{где } A_2 \equiv 1, B_2 \equiv -2x_i,$$

$$C_2 \equiv x_i^2 + (y_a - y_i)^2 - R_i^2.$$

Аналогично, используя (4), получаем уравнение окружности в виде:

$$A_3 y^2 + B_3 y + C_3 = 0, \quad (7)$$

$$\text{где } A_3 \equiv 1, B_3 \equiv -2y_i,$$

$$C_3 \equiv y_i^2 + (x_a - x_i)^2 - R_i^2.$$

Анализируемая частица не пересекает линию, на которой лежит отрезок  $[A, B]$ , если решения уравнений (5), (6) и (7) мнимые или комплексные (рис.2, нижняя часть). Если решения этих уравнений вещественные числа, не равные друг другу, то частица пересекает линию отрезка  $[A, B]$  в двух точках (рис.2, верхняя часть).

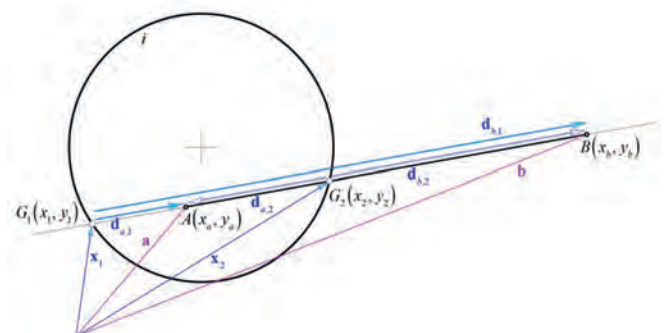
Определим теперь, принадлежат ли точки, в которых частица пересекает прямую, на которой лежит отрезок  $[A, B]$ , этому отрезку или не принадлежат.

Введём радиус-векторы  $x_1$  и  $x_2$  в АСК, соответствующие точкам пересечения окружности частицы с линией, на которой лежит отрезок элемента конструкции, т.е. точкам  $G_1(x_1, y_1)$  и  $G_2(x_2, y_2)$  (рис. 3). Также введём радиус-векторы  $a$  и  $b$ , соответствующие концам отрезка  $A(x_a, y_a)$  и  $B(x_b, y_b)$ . Определим векторы  $d_{a,1}$ ,  $d_{a,2}$ ,  $d_{b,1}$  и  $d_{b,2}$  так, что

$$d_{a,1} = a - x_1, d_{a,2} = a - x_2, \quad (8)$$

$$d_{b,1} = b - x_1, d_{b,2} = b - x_2. \quad (9)$$

Векторы (8) и (9) лежат на одной линии и могут быть либо одинаково, либо противоположно направлены, что опре-



**Рисунок 3** – Пересечение частицы и элемента конструкции

деляет знак скалярного произведения рассматриваемой пары векторов [6]. Поэтому правило определения принадлежности точек  $G_1$  и  $G_2$  отрезку элемента конструкции сформулируем так: если скалярное произведение  $d_{a,1}^T \cdot d_{b,1} < 0$ , то точка  $G_1$  принадлежит отрезку  $[A, B]$ , а в противном случае – нет.

Аналогично, если  $d_{a,2}^T \cdot d_{b,2} < 0$ , то точка  $G_2$  принадлежит отрезку  $[A, B]$ . В противном случае не принадлежит.

Пусть обе точки  $G_1$  и  $G_2$  принадлежат отрезку  $[A, B]$  (рис.2). Для расчёта силы деформации, действующей на анализируемую частицу  $i$  (выражение (10) из [1]), нужно определить расстояние  $r_{ij} \equiv |O_i' O_j'|$  между центром анализируемой частицы  $O_i'$  и центром виртуальной частицы  $O_j'$  (рис.2).

Используя координаты точек  $G_1$  и  $G_2$ , рассчитанные выше, длину отрезка  $|MG_1|$  вычисляем по формуле:

$$|MG_1| = |G_1 G_2| / 2 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} / 2$$

Из соотношений для прямоугольного треугольника  $O_i' MG_1$  имеем  $r_i^2 = R_i^2 |MG_1|^2$ . Следовательно,

$$r_i = \sqrt{R_i^2 - \frac{1}{4}[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2]}.$$

И, предполагая равенство радиусов анализируемой и виртуальной частицы, расстояние между их центрами равно

$$r_{ij} = |O_i' O_j'| = R_j + \sqrt{R_i^2 - \frac{1}{4}[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2]} \quad (10)$$

Для определения нормальной  $V_x'$  и тангенциальной  $V_y'$  составляющих относительной скорости (выражение (5) из [1]), нужно найти угол  $\gamma$ , на который повернута ОСК относительно АСК.

Как показано в [1], при взаимодействии двух частиц этот угол мы находили по координатам двух частиц в АСК. Сейчас координата второй, виртуальной, частицы нам неизвестна. Однако мы можем найти угол  $\gamma$ , используя координаты  $i$ -й частицы и точки  $M$  (рис.2), которые очевидно равны  $x_M = (x_2 + x_1)/2$ ,  $y_M = (y_2 + y_1)/2$ .

Принимая теперь, что  $\Delta x = x_M - x_i$ ,  $\Delta y = y_M - y_i$ , по таблице 1 вычисляем угол  $\gamma$ .

**Таблица 1** - Правила определения угла поворота ОСК относительно АСК

$\Delta x = x_M - x_i$	$\Delta y = y_M - y_i$	$\gamma$
$> 0$	$0$	$0$
$> 0$	$> 0$	$\arctan \left  \frac{\Delta y}{\Delta x} \right $
$0$	$> 0$	$\pi/2$
$< 0$	$> 0$	$\pi - \arctan \left  \frac{\Delta y}{\Delta x} \right $
$< 0$	$0$	$\pi$
$< 0$	$< 0$	$\pi + \arctan \left  \frac{\Delta y}{\Delta x} \right $
$0$	$< 0$	$3\pi/2$
$> 0$	$< 0$	$2\pi - \arctan \left  \frac{\Delta y}{\Delta x} \right $

Рассмотрим теперь частный случай, когда лишь одна точка, например,  $G_1$  принадлежит отрезку элемента конструкции (рис. 4).



**Рисунок 4** - Частица пересекает отрезок в одной точке

Центр виртуальной частицы поместим на прямую, соединяющую точку  $O_i'$  и точку  $M$ , которая лежит на середине отрезка  $[G_1 B]$ :  $|G_1 M| = |MB|$ .

Такой выбор расположения точки  $M$  обоснован следующими нестрогими рассуждениями: если точку  $B$  мысленно передвинуть вправо вдоль линии отрезка так, чтобы она оказалась на окружности анализируемой частицы, то прямая, соединяющая точку  $O_i'$  и точку  $M$ , станет перпендикулярной линии отрезка и сила деформации будет направлена вдоль ли-



нии  $O_i'M$ , что, очевидно, соответствует действительности.

Если же точку  $B$  передвинуть влево так, чтобы она совпала с точкой  $G_p$ , то точка пересечения (касания) анализируемой и виртуальной частицы будет принадлежать линии  $O_i'O'_j$ , а сила деформации будет направлена вдоль этой линии, что тоже соответствует действительности.

Координаты точки  $M$ , которые нужны для вычисления угла  $\gamma$  поворота ОСК, в этом случае определяются так:

$$x_M = (x_1 + x_B)/2, \quad y_M = (y_1 + y_B)/2.$$

Расстояние между центрами анализируемой и виртуальной частиц равно

$$|O_i'O'_j| = R_j + |MO'_i|, \quad (11)$$

$$|MO'_i| = \sqrt{(x_i - x_M)^2 + (y_i - y_M)^2}.$$

## 2. Моделирование вибрации элементов конструкции

Рассмотрим вопрос, связанный с моделированием вибрации элементов конструкции устройства рассеивания. Вибрация в предложенном варианте модели часто используется для увеличения значений, характеризующих степень рассеивания частиц на поверхности (значений стандартной девиации).

Для моделирования вибрации координаты элемента конструкции, который подвергается вибрации, в каждый последующий момент времени изменяются [4] на некоторое значение  $\Delta a_{k+1}$ , рассчитываемое по формуле:

$$\Delta a_{k+1} = A_v \cos[2\pi f_v \cdot k \cdot (t_{k+1} - t_k)], \quad (12)$$

где  $A_v$  - амплитуда вибрации;  $f_v$  - частота вибрации. Считаем, что значение амплитуды вибрации можно задавать сравнимым с размером частицы, а значение частоты вибрации от 20 до 100 Гц.

## 3. Моделирование воздействия внешних факторов на частицы в процессе рассеивания

### 3.1 Моделирование воздушного потока

В рассматриваемой модели для упрощения будем принимать, что поток воз-

духа характеризуется вектором скорости  $\mathbf{V}_a = V_{x_a} e_x - V_{y_a} e_y$ , направление и модуль которого не зависят от координат точек заданной области пространства одинаковы в любой момент времени. Действие воздушного потока характеризуется силой сопротивления воздуха  $F_a$ , которая всегда направлена противоположно вектору скорости движения частицы  $V_{ai}$  относительно потока воздуха:  $V_{ai} = V_a - V_i$ , где  $V_i$  - вектор движения анализируемой частицы в АСК.

Принимая, что  $\mathbf{V}_{ai} = V_{x_{ai}} e_x - V_{y_{ai}} e_y$ , и  $\mathbf{F}_a = F_{x_a} e_x - F_{y_a} e_y$ , каждая из составляющих указанных векторов может быть рассчитана по формулам [5]:

$$F_{x_a} = \text{sgn}(V_{x_{ai}}) \frac{1}{2} C \rho_a V_{x_{ai}}^2 S, \quad F_{y_a} = \text{sgn}(V_{y_{ai}}) \frac{1}{2} C \rho_a V_{y_{ai}}^2 S, \quad (13)$$

где  $C = 0.47$  - аэродинамический коэффициент сопротивления для сферы;  $\rho_a = 1.265 \text{ kg/m}^3$  - плотность воздуха;  $S = \pi \cdot R_i^2$  - площадь поперечного сечения анализируемой частицы. Поправки к составляющим скорости анализируемой частицы определяются выражениями [5]:

$$V_{x_i}(t_{k+1}) = V_{x_i}(t_k) + \frac{F_{x_a}}{m_i} \cdot (t_{k+1} - t_k),$$

$$V_{y_i}(t_{k+1}) = V_{y_i}(t_k) + \frac{F_{y_a}}{m_i} \cdot (t_{k+1} - t_k). \quad (14)$$

Заметим, что для некоторого упрощения модели оставлены без внимания переходные процессы, возникающие при попадании частицы из потока с одними параметрами в поток с другими параметрами, и допускается, что скорость частицы изменяется мгновенно.

### 3.2 Моделирование гравитационного поля

Все частицы в любой момент времени и в любой точке пространства находятся в гравитационном поле [5], которое характеризуется вектором силы гравитации, не зависящим от координат в пространстве и моментов времени,  $\mathbf{F}_g = 0e_x - F_{y_g}e_y$  - вектор силы гравитации всегда направлен вдоль оси  $OY$  вниз. Поправки к составляющим скорости анализируемой частицы, вызванные силой гравитации, равны [4]:

$$\begin{aligned} V_{x_i}(t_{k+1}) &= V_{x_i}(t_k), \\ V_{y_i}(t_{k+1}) &= V_{y_i}(t_k) + \frac{g}{m_i} \cdot (t_{k+1} - t_k), \end{aligned} \quad (15)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

### Формулировка основного результата.

На основе результатов из [1] и приведенных в основном материале исследований этой работы (п.п. 1, 2 и 3), адекватных технологическим элементам процесса рассеивания частных моделей динамики гранулированных частиц, определяем методику комплексного аналитического моделирования динамики процесса – определения скорости и положения в произвольный момент времени  $t_{k+1}$  каждой  $i$ -й частицы из  $N$  загруженных в устройство рассеивания, которая состоит из последовательности следующих действий:

– для момента времени  $t_k$  рассчитываются нормальная и тангенциальная составляющие  $V'_x$  и  $V'_y$  (выражение (5) из [1]);

– рассчитывается суммарная сила всех взаимодействующих частиц и сила воздействия элементов конструкции на все частицы, сталкивающиеся с ними, с учётом возможной вибрации по формуле (12);

– рассчитываются сила деформации  $F'_x$  и приращение  $\Delta V'_x$  нормальной составляющей  $V'_x$  (формулы (10) и (9) из [1]);

– рассчитываются сила  $F'_y$  и относительная скорость  $V_R$  поверхностей частиц в точке соприкосновения по выражению (выражения (11) и (13) из [1]);

– рассчитывается приращение тангенциальной составляющей  $V'_y$  (выражение (14) из [1]);

– рассчитываются составляющие  $\Delta V'_x$  и  $\Delta V'_y$  (выражение (6) из [1]);

– рассчитываются новые значения составляющих вектора скорости по (выражение (7) из [1]) с поправками к составляющим вектора скорости из-за действия воздушного потока (формула (14)) и из-за действия силы гравитации (выражения (15));

– рассчитываются новые координаты в АСК (выражение (8) из [1]) для момента времени  $t_{k+1}$ ;

– процедура повторяется для всех  $N$

частиц с последовательным увеличением времени на  $\Delta t$  до попадания всех частиц на поверхность.

**Выводы.** В работе на основе частных моделей динамики, адекватных элементам технологического процесса перемещения и рассеивания гранулированных частиц, разработана комплексная аналитическая модель, учитывающая конструктивные ограничения на движение частиц элементов устройства рассеивания и влияние внешних факторов на их динамику.

Все это, вместе с моделью динамики свободно взаимодействующих между собой частиц при движении, приведенной в [1], представляет систему математических формул и выражений, более полно и адекватно моделирующих технологический процесс рассеивания гранулированных частиц и позволяющих на следующем этапе исследований разработать алгоритм для проведения численных расчетов и анализа закономерностей рассеивания частиц.

Адекватность модели реальному технологическому процессу дополняет возможности численной проверки влияния технических параметров рассеивающих устройств и внешних факторов на распределение частиц по поверхности, что должно существенно уменьшить число натуральных испытаний и необходимые для их проведения материальные ресурсы.

### Литература

1. Шарко В. Моделирование процесса взаимодействия частиц гранулированной среды при рассеивании / В. Шарко, А. Цулая, Д. Читаев // Техничко-технологические аспекты развития и испытания новой техники и технологий для сельского хозяйства Украины. Сб. науч. тр. УкрНИИПИТ им. Л. Погорелого, Дослідницьке, 2018. Вып.23 (37), С.102-111
2. Гайдай Т. Визначення оптимальних параметрів елементів насінневого бункера та блока розсіювання ґрунтоо-

бробно-посівного агрегата / Т. Гайдай // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. Зб. наук. пр. УкрНДІПВТ ім. Л.Погорілого, Дослідницьке, 2018. Вип.22 (36), С.66-74

3. Ильин В. А., Позняк Э. Г. Линейная алгебра. - М.: Наука. 1999. -280 с.

4. Вайсберг Л. А. Механика сыпучих сред при вибрационных воздействиях: методы описания и математического моделирования / Вайсберг Л. А., Демидов И. В., Иванов К. С.// -Ст-П.: Обогащение руд, № 4, 2015. С.21-34

5. Савельев И. В. Курс общей физики. Том 1. -М.: Наука. 1970. -517 с.

### Literature

1. Sharko V. Modeling of the Process of Interaction Particles of Granulated environment during scattering/ V. Sharko, A. Tsulaia, D. Chitaev // Technical and technological aspects of development and testing of new machinery and technologies for agriculture of Ukraine. Collection of scientific works of the Leonid Pogorilyy UkrNDIPVT, Doslidnytske, 2018. Issue 23 (37). P. 102-111.

2. Gaidai T. Determination of optimal parameters elements of the seed hopper and block dispersion unit of soil-cultivating aggregate / T. Gaidai // Technical and technological aspects of development and testing of new machinery and technologies for agriculture of Ukraine. Collection of scientific works of the Leonid Pogorilyy UkrNDIPVT, Doslidnytske, 2018. Issue 22 (36). P. 66-74.

3. Ilyin V. A., Poznyak E. G. Linear algebra. -M.: Science. 1999. -280 p.

4. Weisberg L. A. Mechanics of flowing media under vibration effects: methods of description and mathematical modeling / Weisberg L. A., Demidov I. V., Ivanov K. S.// -St-P.: Ore dressing, № 4, 2015. P.21-34

5. Saveliev I. V. The course of general physics. Vol.1.-M.: Nauka.1970.-517 p.

### Literatura

1. Sharko V. Modelirovanie processa vzaimodejstviya chastic granulirovannoj sredy pri rasseivanii / V. Sharko, A. Tsulaia, D. Chitaev // Tehniko-tehnologicheskie aspekty razvitija i ispytaniya novoi tehniki i tehnologij dlja sel'skogo hoziaystva Ukrainy. Sb. nauch. tr. UkrNIIPIT im.L.Pogorilogo, Doslidnickoe, 2018. Vyp.23 (37), S.102-111

2. Gaidai T. Vyznachennja optimal'nih parametriv elementiv nasinnevogo bunkera ta bloka rozzijuvannja gruntoobrobno-posivnogo agregata / T. Gaidai // Tehniko-tehnologichni aspekty rozvitku ta viprobuvannja novoi tehniki i tehnologij dlja sil's'kogo gospodarstva Ukrainy. Zb. nauk. pr. UkrNDIPVT im. L.Pogorilogo, Doslidnic'ke, 2018. Vyp.22 (36), S.66-74.

3. Il'in V. A., Poznyak E. G. Lineynaya algebra. -M.: Nauka. 1999. -280 s.

4. Vaysberg L. A. Mehanika syipuchih sred pri vibratsionnyih vozdeystviyah: metody opisanija i matematicheskogo modelirovaniya/ Vaysberg L. A., Demidov I. V., Ivanov K. S.// -St-P.: Obogaschenie rud, # 4, 2015. S.21-34

5. Savelev I. V. Kurs obschey fiziki. Tom 1. -M.: Nauka. 1970. -517 s.

UDC 519.876.5: 004.942

## COMPLEX MODELING OF THE INFLUENCE OF STRUCTURAL AND EXTERNAL FACTORS ON THE DYNAMICS OF GRANULAR PARTICLES IN THE DISPERSION PROCESS

**V. Sharko**, PhD,

e-mail: vadim.vegov@almadavir.com, <https://orcid.org/0000-0002-4497-4945>,

SC «Almadavir»,

**A. Tsulaia**, PhD, Sc.Senior Scientist,

e-mail: anavats51@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3943-1831>,

SSO « L. Pogorilyy UkrNDIPVT»

### **Summary**

**Goal.** *The purpose of work is to develop an integrated model of the dynamics of granular particles dispersion. This model allows to adequately explore the reality of their displacement and dispersion technology in the framework of structural constraints and external influences. The model must take into account the impact on the dynamics of structural limitations of dispersion device and vibration design elements. As well as take into account the effects of airflow on the travel speed and impact on particle of the gravitational field.*

*Sufficient adequacy of models of real process complements the capabilities of test the influence of the technical parameters of polarization devices and external factors on distribution of particles at the surface. There is no need to conduct a physical experiment. This should simplify the simulation when creating special machines, for example, for planting seeds of green manure or fertilizer spreaders.*

**Research methods:** *theory of modeling, the physics of heterogeneous phenomena, spatial-hour dynamics.*

**Research results.** *On the basis of the appropriate private models' methodology for complex analytical modeling of dynamics of granular particles dispersion. The methodology takes into account the collision of particles with structure dispersion devices, vibration design and impact on airflow and particle of the gravitational field.*

**Findings.** *In the work the technique of integrated analytical modeling of dynamics of granular particles dispersion on the basis of the appropriate private models. These models take into account the constructive constraints and external factors affect the process. Integrated model allows you to develop an algorithm of numerical calculation to determine the patterns of distribution of particles when they fall on the target surface.*

**Keywords:** *integrated modelling, process dynamics, granulated particles, private model.*



УДК 519.876.5: 004.942

## КОМПЛЕКСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ І ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ДИНАМІКУ ГРАНУЛЬОВАНИХ ЧАСТИНОК В ПРОЦЕСІ РОЗСІЮВАННЯ

**В. Шарко**, канд. техн. наук,  
e-mail: vadim.vegov@almadavir.com, <https://orcid.org/0000-0002-4497-4945>,  
НЦ «Альмадавір»,  
**А. Цулая**, канд. фіз.-мат. наук,  
e-mail: anavats51@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3943-1831>,  
ДНУ «УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого»

### Анотація

**Метою роботи** є побудова моделі розсіювання частинок гранульованого середовища, що дозволяє більш адекватно до реальності дослідити цей технологічний процес. А саме – крім вільної взаємодії частинок між собою модель повинна враховувати і їхню взаємодію з елементами конструкції пристрою для розсіювання, вплив повітряного потоку на швидкість переміщення частинок, а також вплив на частинки гравітаційного поля та вібрації елементів конструкції.

Достатня повнота і адекватність моделі реальному процесу доповнюють можливості перевірки впливу технічних параметрів пристроїв та зовнішніх факторів на розподілення частинок по поверхні без необхідності проведення фізичного експерименту, що повинно значно спростити імітаційне моделювання під час створення різних машин для розсіювання, наприклад, висів насіння сидератів, розкидання добрив.

**Методи досліджень:** теоретична механіка, загальна фізика, лінійна алгебра та геометрія, матеріалознавство.

**Результати досліджень.** У роботі запропоновано ускладнення моделі процесу розсіювання частинок гранульованого середовища, яке, крім вільної взаємодії частинок між собою під час руху, враховує їхню взаємодію з елементами конструкції пристрою для розсіювання, вплив повітряного потоку на швидкість переміщення частинок, а також вплив на частинки гравітаційного поля та вібрації елементів конструкції.

**Висновки.** Ускладнення моделі процесу розсіювання частинок гранульованого середовища веде до адекватності представлення процесу розсіювання реальному технологічному процесу та дає можливість визначити закономірності відповідних розподілів, які падають на поверхню частинок під час обробки числових результатів методами математичної статистики.

**Ключові слова:** моделювання, процес розсіювання, частинка, гранульоване середовище, повітряний потік, вібрація, гравітаційне поле.