

УДК 631.331.62-66

UDC 631.331.62-66

**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ
ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ И
РЕЖИМА РАБОТЫ ВИБРАЦИОННОГО
ВЫСЕВАЮЩЕГО АППАРАТА¹**

**SIMULATION MODEL FOR OPTIMIZATION
CONSTRUCTION AND WORK REGIME OF
VIBRATING SOWING DEVICE**

Богульский Игорь Олегович
д.ф.-м.н., профессор

Bogulskii Igor Olegovich
Dr. Sci. Phys.-Math., professor

*Институт вычислительного моделирования
Сибирского отделения Российской академии наук,
Красноярск, Россия*

*Institute of Computational Modeling of Siberian
Branch of Russia Academy, Krasnoyarsk, Russia*

Вишняков Андрей Анатольевич
д.т.н., доцент

Vishnyakov Andrey Anatolievich
Dr.Sci.Tech., associate professor

*Красноярский государственный аграрный
университет, Красноярск, Россия*

*Krasnojarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk,
Russia*

Богульская Нина Александровна
доцент

Bogulskaya Nina Alexandrovna,
associate professor

*Сибирский федеральный университет, Красноярск,
Россия*

Siberian Federal University, Krasnojarsk, Russia

В статье предложена имитационная модель
процесса работы вибрационного высевающего
аппарата. Представлены результаты проведенных
расчетов с использованием этой модели.

The simulation model of a vibrating sowing device
work process is suggested in this paper. Results of
worked out calculations with the use of this model
are given.

Ключевые слова: ИМИТАЦИОННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ,
ГРАНУЛИРОВАННАЯ СРЕДА,
ВИБРАЦИОННЫЕ ВЫСЕВАЮЩИЕ
УСТРОЙСТВА.

Keywords: SIMULATION MODELLING,
NUMERICAL METHODS, GRANULAR
MEDIUM, VIBRATING SOWING DEVICES.

В работе рассматриваются высевающие аппараты вибрационного типа, представляющие собой бункер, из которого семена высыпаются свободно и лоток в виде параллелепипеда. Лоток приводится в горизонтальное колебательное движение, характеризуемое некоторой частотой и амплитудой, приводом от вала отбора мощности трактора. В дне лотка расположены отверстия с присоединенными к ним семяводами.

Целью работы является определение оптимального для данного типа семян режима движения лотка (частоты и амплитуды колебаний) и

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №06-08-00920-а

оптимального распределения семяводов в днище, обеспечивающих наибольшую равномерность высева.

Лоток представляет собой параллелепипед длиной a и высотой b , который в неподвижном состоянии заполнен семенами на высоту h . На рисунке 1 изображен лоток с тремя отверстиями, в реальном высевающем устройстве их десять. Работа высевающего устройства определяется рядом параметров: геометрическими размерами лотка; высотой заполнения лотка семенами; частотой и амплитудой горизонтальных колебаний; размером, плотностью и формой семян; диаметром и расположением отверстий в дне лотка; коэффициентами трения между соседними семенами и семенами и внутренней поверхностью лотка и другими параметрами.

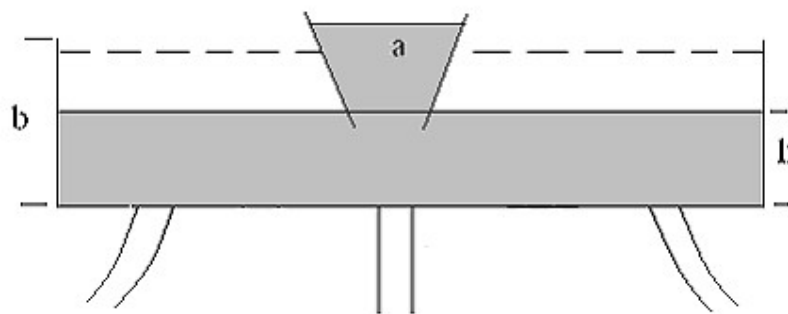


Рисунок 1. Схема лотка

Оптимизация режима работы. Нами предложен вычислительный эксперимент, позволяющий определить оптимальные значения двух основных параметров работы вибрационного высевающего аппарата – амплитуды и частоты колебаний при заданных остальных. Рассмотрим случай с тремя высевающими отверстиями, расположенными в центре и у вертикальных стенок лотка. Качество работы конструкции характеризуется равномерностью высева и должно соответствовать агротребованиям ($\pm 3\%$). Задача сводится к минимизации некоторого целевого функционала, обеспечивающей эту равномерность.

В качестве такого функционала используется функционал I . Если в днище лотка расположено k отверстий, а s_1, s_2, \dots, s_k – количества выпавших

в них семян, то

$$I = \text{abs}\left(\frac{\max_{i=1, \dots, k} s_i}{\min_{i=1, \dots, k} s_i} - 1\right).$$

В нашем случае, очевидно, что в силу симметрии задачи выпадение в первое и третье отверстие будет заведомо одинаковым. Поэтому в качестве I рассмотрим

$$I = \text{abs}\left(\frac{s_1}{s_2} - 1\right).$$

Здесь s_1, s_2 – среднее количество семян, высыпавшихся через первое и второе отверстие, соответственно, в течение некоторого отрезка времени.

Для определения s_1, s_2 используется модель движения сыпучей среды в плоском случае, в основе которой заложено упругое взаимодействие семян [1]. При этом предполагается, что каждое семя представляет собой абсолютно твердое тело (круг), массой m , и радиусом r , окруженное достаточно тонкой упругой оболочкой. Коэффициент жесткости этой оболочки нам неизвестен, но его связь со сжатием e определяется из условия, что в случае, когда частица неподвижно лежит на поверхности, сила упругости F_y полностью компенсирует вес \vec{P} .

В процессе движения таких элементарных частиц, взаимодействие их друг с другом приводит к тому, что расстояние между центрами становится меньше диаметра d , и возникают упругие силы отталкивания, тем большие, чем ближе находятся центры гранул. Задача является существенно нелинейной. Когда расстояние между центрами гранул меньше диаметра – существует линейное упругое взаимодействие, когда больше – взаимодействие отсутствует.

Учитывается трение, возникающее в процессе движения частиц. Направление сил трения зависит от направления относительных скоростей движения точек контакта взаимодействующих тел.

Модель использует следующий алгоритм решения сформулированной задачи. Рассматриваем каждую из частиц и выясняем, какие из всех остальных являются «ближайшими соседями» в данный момент времени. Вычисляем силы и моменты сил, возникающие при взаимодействии с соседними частицами. Записываем законы упругого взаимодействия между частицами [1].

Закон Ньютона для i -того элемента записывается в виде системы

$$\begin{cases} \dot{x}_i = u_i \\ \dot{x}_i = F_x - m u_i \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{y}_i = v_i \\ \dot{y}_i = F_y - m v_i \end{cases} \quad \dot{J} = M_i.$$

Здесь точка над функциями означает производную по времени, F_x и F_y – действующие на i -й элемент суммарные силы в направлениях x и y , x_i, y_i – координаты центра масс частицы, u_i, v_i – компоненты скорости центра масс в направлениях x и y соответственно, диссипативные (вязкие) члены $m u_i$ и $m v_i$, где $m > 0$ – коэффициент вязкости, введены искусственным образом для повышения устойчивости решения, J – главный момент инерции элемента относительно оси, перпендикулярной рассматриваемой плоскости, M_i – проекция момента сил трения на ось, перпендикулярную к плоскости (x, y) . В начальный момент времени формулируются начальные условия достаточно произвольного вида, так как в дальнейшем процесс движения развивается вне зависимости от их выбора.

В итоге приходим к задаче Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений большой размерности $5 \cdot N$, где N – количество гранул в лотке, которую, естественно, необходимо решать численно.

Как всякая система, описывающая колебательное движение, она является достаточно жесткой. Ее устойчивое численное решение сопряжено со значительными трудностями. Использование неявных методов численного решения в этом случае неэффективно, так как матрица Якоби в данном случае не имеет диагонального преобладания [2]. Кроме того, специфика задачи требует рассмотрения процесса движения гранул через достаточно малые интервалы времени. Таким образом, численное решение задачи большой размерности на основе явного метода связано с большими вычислительными затратами.

Для численного решения задачи используем метод Рунге-Кутты второго порядка [3].

На каждом шаге по времени Δt , на первой стадии вычисляются промежуточные величины на шаге $\frac{\Delta t}{2}$

$$\begin{aligned} x_i^{n+1} &= x_i^n + \frac{\Delta t}{2} u_i^n, \\ u_i^{n+1} &= u_i^n + \frac{\Delta t}{2} (F_x^n - m u_i^n), \\ y_i^{n+1} &= y_i^n + \frac{\Delta t}{2} V_i^n, \\ V_i^{n+1} &= V_i^n + \frac{\Delta t}{2} (F_y^n - m V_i^n). \end{aligned}$$

На второй стадии совершается переход на следующий шаг по времени Δt :

$$\begin{aligned} x_i^{n+1} &= x_i^n + \Delta t u_i^{n+1/2}, \\ u_i^{n+1} &= u_i^n + \Delta t (F_x^{n+1/2} - m u_i^{n+1/2}), \\ y_i^{n+1} &= y_i^n + \Delta t V_i^{n+1/2}, \\ V_i^{n+1} &= V_i^n + \Delta t (F_y^{n+1/2} - m V_i^{n+1/2}). \end{aligned}$$

Здесь $F_x^{n+1/2}$ и $F_y^{n+1/2}$ – силы, вычисленные для значений $x_i^{n+1/2}$ и $y_j^{n+1/2}$.

Начальные условия можно выбрать произвольно. Удобнее всего взять ровные вертикальные «столбцы» из элементов, где верхний ряд «вдавлен» во второй на величину e , второй в третий - на $2e$ и т.д. Это дает возможность легко вычислить вертикальные координаты гранул в начальный момент времени. Если лоток неподвижен, такая система теоретически должна находиться в равновесии все время, и это является подтверждением устойчивости численного решения динамической задачи.

Решение позволяет определить значения скоростей и перемещений каждой частицы и является основой создания имитационной модели процесса работы высевающего устройства в среде Delphi. На рисунке 2 – результат применения имитационной модели.

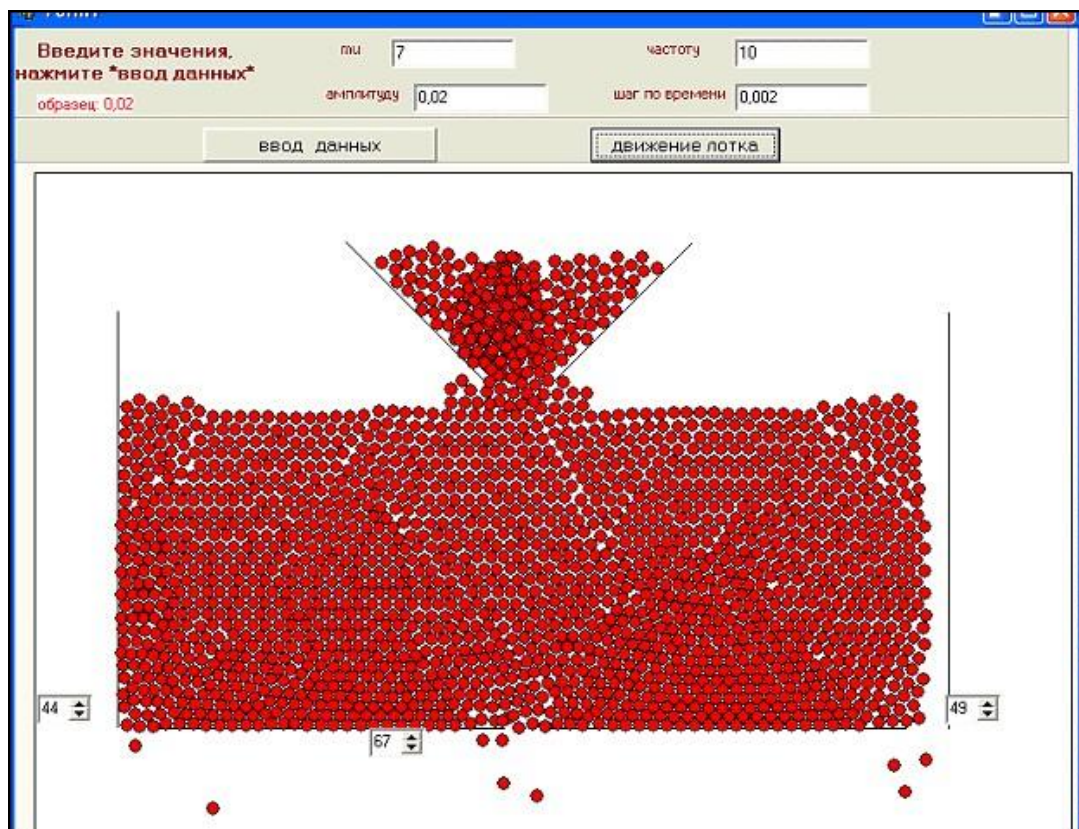


Рис. 2. Модель работы лотка с тремя отверстиями

Одним из методов минимизации функций многих переменных является метод покоординатного спуска. Пусть имеется приближение (x_1^0, \dots, x_m^0) к точке экстремума функции $F(x_1, \dots, x_m)$. Рассмотрим функцию

$F(x_1, x_2^0, \dots, x_m^0)$ как функцию переменной x_1 и найдем точку x_1^1 ее минимума. Затем, исходя из приближения $(x_1^1, x_2^0, \dots, x_m^0)$ путем минимизации функции $F(x_1^1, x_2, x_3^0, \dots, x_m^0)$, находим следующее приближение $(x_1^1, x_2^1, x_3^0, \dots, x_m^0)$. Процесс циклически повторяется. При уточнении компоненты x_k происходит смещение по прямой, параллельной оси x_k до точки с наименьшим на этой прямой значением $F(x)=c$. Очевидно, эта точка будет точкой касания рассматриваемой прямой и линии уровня $F(x)=c$. В двумерном случае картина приближений показана на рисунке 3.

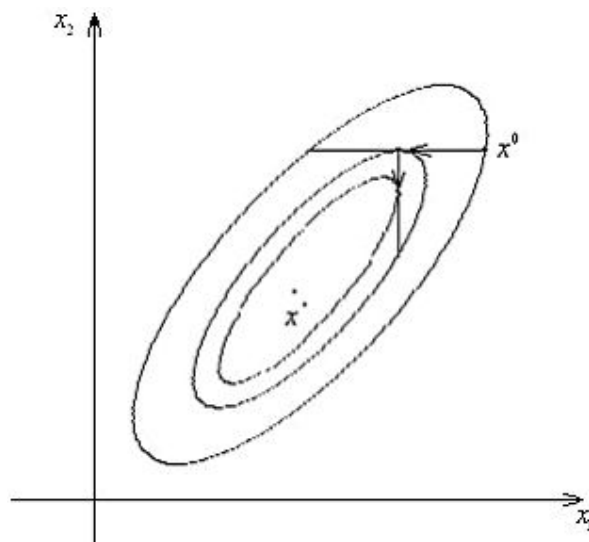


Рис. 3. Картина приближений в двумерном случае

Применяем метод покоординатного спуска для минимизации функционала I . В качестве начальных условий взяты значения частоты колебаний – 5 Гц, амплитуды – 1 мм. Шаг по времени для пересчета скоростей – 0,001 сек. Для вычисления средних значений s_1, s_2 , входящих в целевой функционал, используется отрезок времени 60 сек. Как видно из результатов, представленных на рисунке 4, оптимальным значением частоты является 14 Гц, амплитуды – 4 мм.

На рисунке 4 – результат работы программы.

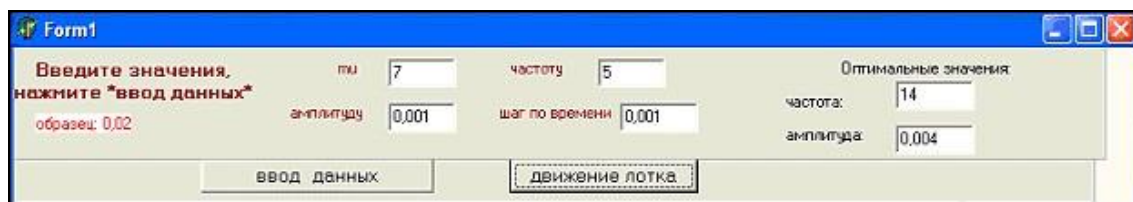


Рис. 4. Результат работы программы

Размещение семяводов. В лотковых высевальных аппаратах предусматривается вибрация лишь той части посевного материала, которая непосредственно примыкает и контактирует с колеблющимися рабочими элементами. Эта часть посевного материала не отделена и не изолирована от общего объема семян в бункере. Давление всего слоя семян на нижерасположенные слои, в том числе и непосредственно примыкающие к вибрирующим элементам, будет препятствовать созданию однородного разрыхленного слоя, а, следовательно, и равномерному его истечению через высевальные отверстия.

В настоящей работе вычислительный эксперимент проводится для того, чтобы выбрать оптимальный вариант расположения отверстий в днище высевального устройства, обеспечивающий равномерность истечения семян через высевные отверстия. Будем считать часть сыпучей среды уплотненной, если частицы касаются всех «соседей» и разрыхленной в противном случае. Для равномерности посева желательно, чтобы отверстия находились в зоне разрыхления.

Применяем созданную авторами имитационную модель процесса работы высевального устройства для определения зон разрыхления и уплотнения [1]. На рисунке 2 – модель конструкции с тремя отверстиями в днище высевального устройства. По показаниям счётчиков, расположенных рядом с отверстиями – 44, 67, 49 – можно судить о том, что через левое и правое отверстия истечение частиц материала затруднено. Это объясняется тем, что они расположены рядом со

стенками. При вибрации стенки начинают колебаться и создают зоны уплотнения. Свободное истечение частиц в зонах уплотнения нарушается.

На рисунке 5 светлыми изображены частицы, расположенные в зоне уплотнения материала, тёмными – в зоне разрыхления.

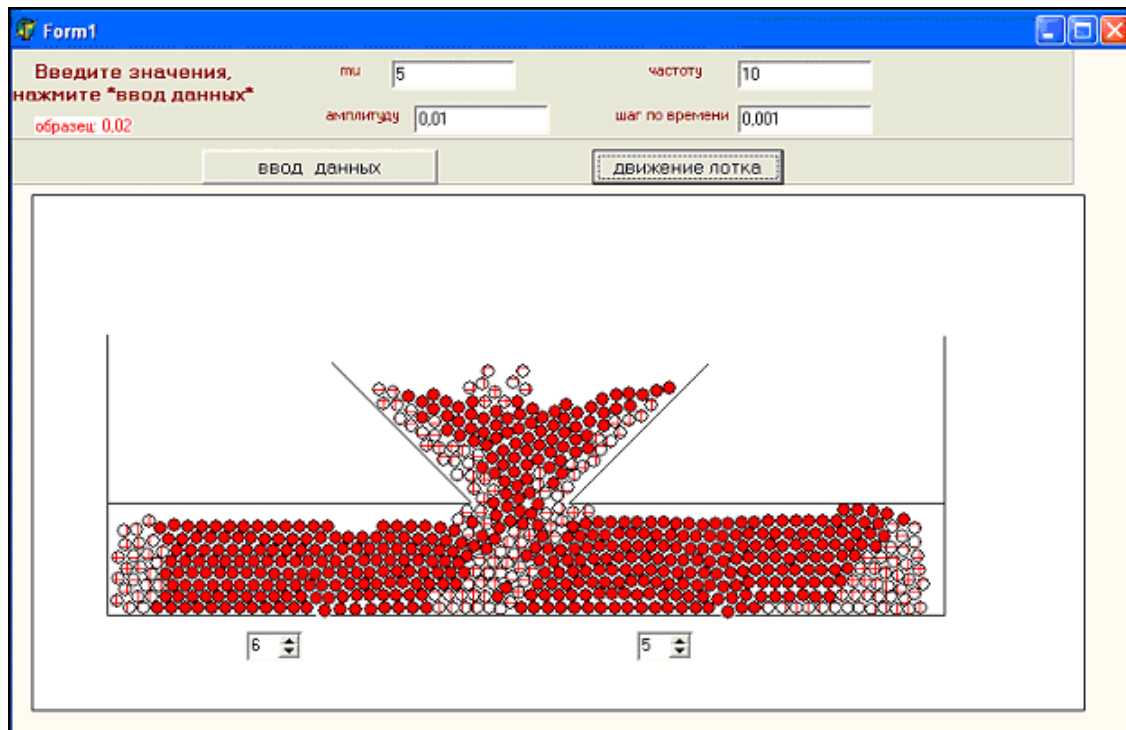


Рис. 5. Расположение зон разрыхления

Уплотнение материала в данном случае вызвано: у левой и правой стенок лотка – колебаниями, у горловины бункера – давлением столба материала, находящегося в бункере. Отверстия в днище для данной конструкции расположены в зоне разрыхления. В этом случае свободное истечение частиц через отверстия не нарушается.

Достоверность полученных результатов подтверждена натурными испытаниями на стендах.

1. Богульская Н.А., Богульский И.О., Вишняков А.А. Имитационный подход к моделированию движения гранулированных сред // Вестник Краснояр. гос. агр. ун-т. Красноярск, 2005. № 9. С. 214-218.
2. Новиков Е.А. Численное решение жёстких систем. Новосибирск: Наука, 1997. 195 с.
3. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 359 с.