УДК 631.362

МЕТОД РАСЧЁТА ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ МЕЖДУ ДВУМЯ ЭКВИДИСТАНТНЫМИ ПЛОСКОСТЯМИ ПРИ СОВЕРШЕНИИ ИМИ СИНХРОННЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Лукьяненко В.М., к.т.н., доц, Никифоров А.А., ст. викл., Петрик А.П. ст. лаб.

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко

В данной статье представлена постановка задачи по расчёту характеристик движения воздуха под воздействием движущихся рабочих поверхностей. Получена система алгебраических уравнений, которую можно решить любым из известных численных методов.

Введение. Сепарация семян по комплексу физико-механических свойств (форме, шероховатости и упругости) на вибрирующих фрикционных неперфорированных поверхностях отличается высоким качеством разделения. Этот способ сепарации особенно подходит для очистки мелкосемянных культур. Для мелкосемянных легковесных культур, подверженных влиянию воздушного потока, он является единственным эффективным способом механизированной сепарации.

Однако, при использовании для сепарации таких культур многоплоскостных вибрационных машин, где семенная смесь разделяется в наклонном вибрирующем канале, образованном эквидистантно расположенными плоскостями, высокие аэродинамические характеристики таких семян усложняют процесс разделения и снижают его эффективность.

Это вызывает необходимость изучения технологического процесса сепарирования на базе математической модели движения частиц в воздушном потоке между вибрирующими плоскостями.

Анализ последних исследований. Влиянию воздушного потока на перемещение компонентов семенных смесей посвящено много работ исследователей.

Прежде всего, это П.М. Василенко, который в работе [1] исследовал движение частиц семенных смесей в воздушной среде с учётом аэродинамического сопротивления. Ним было изучено как линейное, так и квадратичное аэродинамическое сопротивление движения частиц по отношению к скорости воздушного потока. Однако, при этом параметры потока, возникающего в воздушных каналах и рабочих пространствах семяочистительных машин, не зависели от режима работы машины и считались постоянными. Такое допущение в случае его использования для изучения процесса сепарации мелкосемянных легковесных культур на многоплоскостных вибрационных машинах является неприемлемым. Оно не позволяет построить математическую модель процесса, которая позволяла бы получать адекватные результаты.

Впоследствии подобными исследованиями занимались Козаченко А.В., Абдуєв М.М., Бакум М.В., Манчинский Ю.О., Сычов В.В., Завгородний А.И.

Так Козаченко А.В. в работе [2] обосновал параметры технологического процесса очистки и сортирования на вибрационной семяочистительных машине семян табака и махорки.

Изучением движения частиц в условиях переменной скорости воздушного потока в наклонных воздушных каналах занимались авторы работы [3].

Математическому описанию движения абсолютно упругого шара в постоянном воздушном потоке между вибрирующими плоскостями посвящена работа Завгороднего А.И. [4].

Цель исследования. Построение математической модели воздушного потока между колеблющимися рабочими поверхностями виброочистительной машины для оценки эффективности конструктивных мероприятий повышающих эффективность процесса виброочистки семенных смесей чувствительных к воздействию воздуха.

Основная часть. В качестве математической модели процесса движения воздуха под воздействием движущихся рабочих поверхностей использована модель идеального газа. Процесс воздействия колеблющихся рабочих поверхностей на воздушную массу, которая находится между параллельными плоскостями, описывается с помощью уравнения Эйлера и уравнения неразрывности. В координатной форме данные векторные уравнения позволяют составить систему дифференциальных уравнений из четырёх уравнений. Число неизвестных, которые должны быть определены для каждой точки воздушного объёма между рабочими поверхностями, также равно четырём. Это проекции вектора скорости элемента воздушного континуума на оси системы координат, связанной с рабочими поверхностями, и величина давления воздуха в рассматриваемой точке. Преобразованная система уравнений имеет следующий вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} = g_x \ , \qquad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} = g_y \ , \qquad (2)$$

$$-\frac{\partial u + \partial v}{\partial t} - u\frac{\partial u + \partial v}{\partial x} - v\frac{\partial u + \partial v}{\partial y} - w\frac{\partial u + \partial v}{\partial z} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} = g_z \ , \qquad (3)$$

$$\partial w = -\partial u - \partial v \, , \qquad (4)$$

$$g_x = g \sin\beta \, , \qquad (5)$$

$$g_y = g \operatorname{tg}\alpha \cos\beta \cos\delta \, , \qquad (6)$$

$$g_z = -g \cos\delta \, , \qquad (7)$$

$$\cos\delta = \frac{\cos\alpha\cos\beta}{\sqrt{\cos^2\alpha + \sin^2\alpha\cos^2\alpha}}\ , \tag{8}$$

где α, β – углы, характеризующие наклон, соответственно, продольной и поперечной осей рабочей поверхности к Земной поверхности (рис. 1);
δ – угол наибольшего наклона рабочей поверхности.

В результате решения (1) - (8) для установленных моментов времени t для любой точки пространства между рассматриваемыми рабочими поверхностями с координатами $(\mathrm{x}, \mathrm{y}, \mathrm{z})$ будут получены значения проекций вектора скорости воздушного потока, u, v и w, а также давления воздуха, p, в рассматриваемой точке в заданный момент времени.

Приведенная система дифференциальных уравнений может быть решена путём приведения её к краевой задаче. Для численного решения системы уравнений (1) - (8) вводится сетка по осям координат X, Y, Z и по оси времени t. Сетка разбивки области Ξ на дискретные узлы имеет вид, приведенный на Рис. 1.

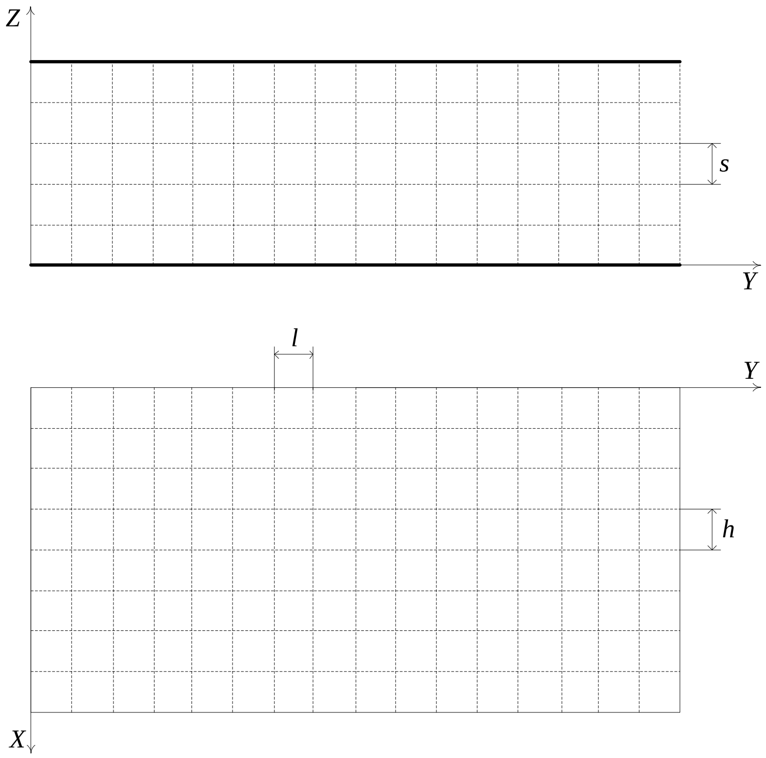

Рис. 1 – Сеточная область, используема для решения задачи

Узлы данной сетки имеют нумерацию (i, j, k, τ). Узлу с приведенным номером соответствует точка области Ξ с координатами: $x = i \cdot h$, $y = j \cdot l$, $z = k \cdot s$ и момент времени $t = \tau \cdot \Delta t$.

Для приведенной сетки уравнения (1) - (8) могут быть записаны в конечно разностной форме:

$$\frac{u_{i,j,k,\tau+1} - u_{i,j,k,\tau-1}}{2\Delta t} + u_{i,j,k,\tau}\frac{u_{i+1,j,k,\tau} - u_{i-1,j,k,\tau}}{2h} + \tag{9}$$

$$+v_{i,j,k,\tau}\frac{u_{i,j+1,k,\tau}-u_{i,j-1,k,\tau}}{2l}+w_{i,j,k,\tau}\frac{u_{i,j,k+1,\tau}-u_{i,j,k-1,\tau}}{2s}+$$
$$+\frac{1}{\rho}\frac{p_{i+1,j,k,\tau}-p_{i-1,j,k,\tau}}{2h}-g_x=0\ ,$$

$$\frac{v_{i,j,k,\tau+1}-v_{i,j,k,\tau-1}}{2\Delta t}+u_{i,j,k,\tau}\frac{v_{i+1,j,k,\tau}-v_{i-1,j,k,\tau}}{2h}+$$
$$+v_{i,j,k,\tau}\frac{v_{i,j+1,k,\tau}-v_{i,j-1,k,\tau}}{2l}+w_{i,j,k,\tau}\frac{v_{i,j,k+1,\tau}-v_{i,j,k-1,\tau}}{2s}+ \tag{10}$$
$$+\frac{1}{\rho}\frac{p_{i,j+1,k,\tau}-p_{i,j-1,k,\tau}}{2l}-g_y=\ 0\ ,$$

$$-\frac{u_{i,j,k,\tau+1}-u_{i,j,k,\tau-1}+v_{i,j,k,\tau+1}-v_{i,j,k,\tau-1}}{2\Delta t}-$$
$$-u_{i,j,k,\tau}\frac{u_{i+1,j,k,\tau}-u_{i-1,j,k,\tau}+v_{i+1,j,k,\tau}-v_{i-1,j,k,\tau}}{2h}-$$
$$-v_{i,j,k,\tau}\frac{u_{i,j+1,k,\tau}-u_{i,j-1,k,\tau}+v_{i,j+1,k,\tau}-v_{i,j-1,k,\tau}}{2l}- \tag{11}$$
$$-w_{i,j,k,\tau}\frac{u_{i,j,k+1,\tau}-u_{i,j,k-1,\tau}+v_{i,j,k+1,\tau}-v_{i,j,k-1,\tau}}{2s}+$$
$$+\frac{1}{\rho}\frac{p_{i,j,k+1,\tau}-p_{i,j,k-1,\tau}}{2s}-g_z=0\ ,$$

$$w_{i,j,k,\tau+1}-w_{i,j,k,\tau-1}=-u_{i,j,k,\tau+1}+u_{i,j,k,\tau-1}-v_{i,j,k,\tau+1}+v_{i,j,k,\tau-1}\ , \tag{12}$$

$$\begin{aligned} u_{i,j,k,\tau}&=u\left(x_i,y_j,z_k,t_\tau\right),\\ v_{i,j,k,\tau}&=v\left(x_i,y_j,z_k,t_\tau\right),\\ w_{i,j,k,\tau}&=w\left(x_i,y_j,z_k,t_\tau\right),\\ p_{i,j,k,\tau}&=p\left(x_i,y_j,z_k,t_\tau\right), \end{aligned} \tag{13}$$

$$i=1,2,\dots,\left(\frac{b}{h}-1\right),\qquad j=1,2,\dots,\left(\frac{a}{l}-1\right),\qquad k=1,2,\dots,\left(\frac{H}{s}-1\right), \tag{14}$$

где b, a – поперечный и продольный размеры рабочей поверхности;
H – расстояние между двумя параллельными рабочими поверхностями.

Граничные условия в конечно разностной форме примут вид:
- для грани А:

$$u_{i,j,k,\tau}=0, v_{i,j,k,\tau}=0, w_{i,j,k,\tau}=0\ , \tag{15}$$

$$p_{i,j,k,\tau}=p^{\text{атм.}}+\rho\frac{[V_x^{\text{к}}(t)]^2+\left[V_y^{\text{к}}(t)\right]^2+[V_z^{\text{к}}(t)]^2}{2}\cdot(-\text{sign}\{V_z^{\text{к}}(t)\}) \tag{16}$$

$$i = 1, 2, \ldots, \left(\frac{b}{h} - 1\right), j = 1, 2, \ldots, \left(\frac{a}{l} - 1\right), k = \frac{H}{s}, t = \tau \cdot \Delta t \tag{17}$$

- для грани B:

$$u_{i,j,k,\tau} = 0, v_{i,j,k,\tau} = 0, w_{i,j,k,\tau} = 0, \tag{18}$$

$$p_{i,j,k,\tau} = p^{\text{атм.}} + \rho \frac{[V_x^{\text{к}}(t)]^2 + \left[V_y^{\text{к}}(t)\right]^2 + [V_z^{\text{к}}(t)]^2}{2} \cdot (\mathrm{sign}\{V_z^{\text{к}}(t)\}) \tag{19}$$

$$i = 1, 2, \ldots, \left(\frac{b}{h} - 1\right), \quad j = 1, 2, \ldots, \left(\frac{a}{l} - 1\right), \quad k = 0, \quad t = \tau \cdot \Delta t \tag{20}$$

- для граней C, D, E и G:

$$u_{i,j,k,\tau} = A \cdot \Omega \cos(\Omega \tau \Delta t) \sin \beta \sin(\varepsilon - \alpha), \tag{21}$$

$$v_{i,j,k,\tau} = A \cdot \Omega \cos(\Omega \tau \Delta t) \left[\tan \alpha \cos \beta \sin(\varepsilon - \alpha) - \frac{\cos \delta}{\cos \beta} \cos(\varepsilon - \alpha)\right], \tag{22}$$

$$w_{i,j,k,\tau} = -A \cdot \Omega \cos(\Omega \tau \Delta t) \cos \delta \frac{\sin \varepsilon}{\cos \alpha}, \tag{23}$$

$$p_{i,j,k,\tau} = p^{\text{атм.}}, \tag{24}$$

$$C: \quad i = 0, 1, \ldots, \frac{b}{h}, \quad j = 0, \quad k = 0, 1, \ldots, \frac{H}{s}, \quad \tau = 0, 1, \ldots, \frac{T}{\Delta t}, \tag{25}$$

$$D: \quad i = 0, 1, \ldots, \frac{b}{h}, \quad j = \frac{a}{l}, \quad k = 0, 1, \ldots, \frac{H}{s}, \quad \tau = 0, 1, \ldots, \frac{T}{\Delta t}, \tag{26}$$

$$E: \quad i = \frac{b}{h}, \quad j = 0, 1, \ldots, \frac{a}{l}, \quad k = 0, 1, \ldots, \frac{H}{s}, \quad \tau = 0, 1, \ldots, \frac{T}{\Delta t}, \tag{27}$$

$$G: \quad i = 0, \quad j = 0, 1, \ldots, \frac{a}{l}, \quad k = 0, 1, \ldots, \frac{H}{s}, \quad \tau = 0, 1, \ldots, \frac{T}{\Delta t}. \tag{28}$$

Полученная система из $\left(\frac{b}{h} + 1\right) \times \left(\frac{a}{l} + 1\right) \times \left(\frac{H}{s} + 1\right)$ алгебраических уравнений содержит аналогичное количество неизвестных. То есть существует однозначное решение рассматриваемой задачи.

Для решения системы уравнений (9) - (14), (15) - (28) может быть использован любой из известных численных методов решения систем алгебраических уравнений.

Выводы. Решение данной системы уравнений позволит нам определять параметры воздушного потока для различных конструктивных схем и режимов работы виброочистительных машин. Полученные результаты могут быть использованы для выбора оптимальных режимов работы машин данного класса при очистки смесей чувствительных к воздействию воздуха.

Список использованной литературы

1. Василенко, П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин [Текст] / П.М. Василенко. – К.: УАСХН, 1960.–284 с.
2. Козаченко А.В. Обоснование параметров технологического процесса очистки и сортирования семян табака и махорки на вибрационной семяочистительной машине: автореф. дис. на соиск. степени канд. техн. наук/ А.В. Козаченко. – Харьков, 1984 – 20 с.
3. Абдуєв, М.М. Теоретичні дослідження характеристик руху часток у нахиленому повітряному каналі при зміні характеристик епюри швидкості повітря по висоті каналу/ М.М. Абдуєв, М.В. Бакум, Ю.О. Манчинський, В.В. Сичов, В.П. Леонов // Механізація сільського господарства: Вісник ХДТУСГ.– Харків, 2003.– Вип.21.– С. 88-94.
4. Завгородний, А.И., Синяева О.В. Движение шара в воздушном потоке между вибрирующими плоскостями / А.И. Завгородний, О.В. Синяева // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукраїнський науково-технічний журнал, №3(67).– Вінниця: ВНАУ, 2012.– С. 20-27.
5. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1. – М.: Наука, 1970. – 492 с.
6. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. Т. 2. – М.: Гос. изд. физ. мат. литературы, 1959.– 620 с.

Анотація

МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПОЛЯ ШВИДКОСТЕЙ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА МІЖ ДВОМА ЭКВИДИСТАНТНЫМИ ПЛОКОСТЯМИ ПРИ ЗДІЙСНЕННІ НИМИ СИНХРОННИХ ГАРМОНІЙНИХ КОЛИВАНЬ

Лук'яненко В.М., Никифоров А.О., Петрик А.П.

У даній статті представлена постановка задачі розрахунку характеристик руху повітря під впливом рухомих робочих поверхонь. Отримано систему алгебраїчних рівнянь, яку можна вирішити будь-яким з відомих чисельних методів.

Abstract

THE METHOD OF CALCULATING THE VELOCITY FIELD OF THE AIR ENVIRONMENT BETWEEN TWO EQUIDISTANT PLOSKOSTYAMI WHEN THEY COMMIT SYNCHRONOUS HARMONIC

V. Lukianenko, A. Nikiforov, A. Petrik

This article presents the formulation for calculating the characteristics of motion of air under the influence of a moving working surfaces. The resulting system of algebraic equations that can be solved by any known numerical methods.