

## РАСЧЁТ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ МЕЖДУ ДВУМЯ ЭКВИДИСТАНТНЫМИ ПЛОСКОСТЯМИ ПРИ СОВЕРШЕНИИ ИМИ СИНХРОННЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ МЕТОДОМ ПРОГОНКИ

Никифоров А. А., ст. преп., Лукьяненко В. М., к.т.н., доц.,  
Кись В. Н., к.т.н., доц.

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства  
имени Петра Василенко*

*В данной статье представлен способ расчёта поля скоростей воздушной среды между двумя эквидистантными плоскостями при совершении ими синхронных гармонических колебаний, основанный на методе прогонки для системы квазилинейных дифференциальных уравнений газовой динамики для трёхмерного случая.*

**Постановка проблемы.** Проблеме оценки влияния движения воздуха на кинематические параметры движения частиц зерновых и семенных смесей посвящено достаточно большое количество работ. П. М. Василенко [1], А. В. Гольдиным [2], А. В. Козаченко [3], М. М. Абдуевым, М. В. Бакумом, Ю. О. Манчинським, В. В. Сычовым, В. П. Леоновым [4], А. И. Завгородним [5] отмечалось значительное влияние движущегося воздуха на кинематические параметры движения частиц семенных (зерновых) смесей. Особенно это влияние заметно для мелкосеменных смесей, когда семена имеют выраженные аэродинамические свойства.

**Анализ последних исследований.** Существующие теоретические модели и методы в основном посвящены описанию процесса взаимодействия семян (зёрен) с воздушной массой, позволяют проводить оценку характеристик эффективности процессов очистки (сепарации) с учётом сопротивления вибрационному движению частиц со стороны воздушной среды. Однако в недостаточной мере исследованы вопросы влияния конструкции рабочих органов вибромашины (расстояние между плоскостями, способ их крепления, наличие козырьков или других приспособлений по краям) на параметры движения воздушной массы относительно рабочих поверхностей.

В [6] была предложена модель и методика для определения поля скоростей в области воздушного пространства, заключённого между двумя эквидистантными синхронно колеблющимися плоскостями. Модель использует уравнения механики сплошной среды для идеального газа [7]. Расчёт поля скоростей предложено осуществлять как решение краевой задачи. В статье были описаны краевые условия, а также запись этих условий и дифференциальных уравнений движения воздуха в конечно-разностной форме.

**Цель данной статьи** – изложить метод решения краевой задачи, сформулированной в [8]. Для решения подобных систем квазилинейных

дифференциальных уравнений с частными производными наиболее подходит метод прогонки [9]. Трудностью реализации этого метода в данном случае является то, что рассматривается трёхмерный случай, а также не одно дифференциальное уравнение, а система уравнений.

### Основная часть.

Решаемая система дифференциальных уравнений, записанная в координатной форме, имеет вид:

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

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

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

$$\left[ \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z} \right] \frac{1}{\rho c^2} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

где  $u, v, w$  – проекции вектора скорости движения воздушной среды,  $V$ , соответственно, на оси  $X, Y$  и  $Z$  выбранной системы координат;  
 $g_x, g_y, g_z$  – проекции ускорения свободного падения на оси выбранной системы координат.

В матричной форме система уравнений (1) – (4) может быть записана как:

$$\mathbf{I} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \mathbf{B} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial x} + \mathbf{C} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial y} + \mathbf{D} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial z} = \mathbf{F}, \quad (5)$$

$$\mathbf{I} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{vmatrix} u & 0 & 0 & c^2 \\ 0 & u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u & 0 \\ 1 & 0 & 0 & u \end{vmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{vmatrix} v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v & 0 & c^2 \\ 0 & 0 & v & 0 \\ 0 & 1 & 0 & v \end{vmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{vmatrix} w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w & c^2 \\ 0 & 0 & 1 & w \end{vmatrix},$$

$$\mathbf{Q} = \begin{vmatrix} u \\ v \\ w \\ p/\rho c^2 \end{vmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{vmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \\ 0 \end{vmatrix}.$$

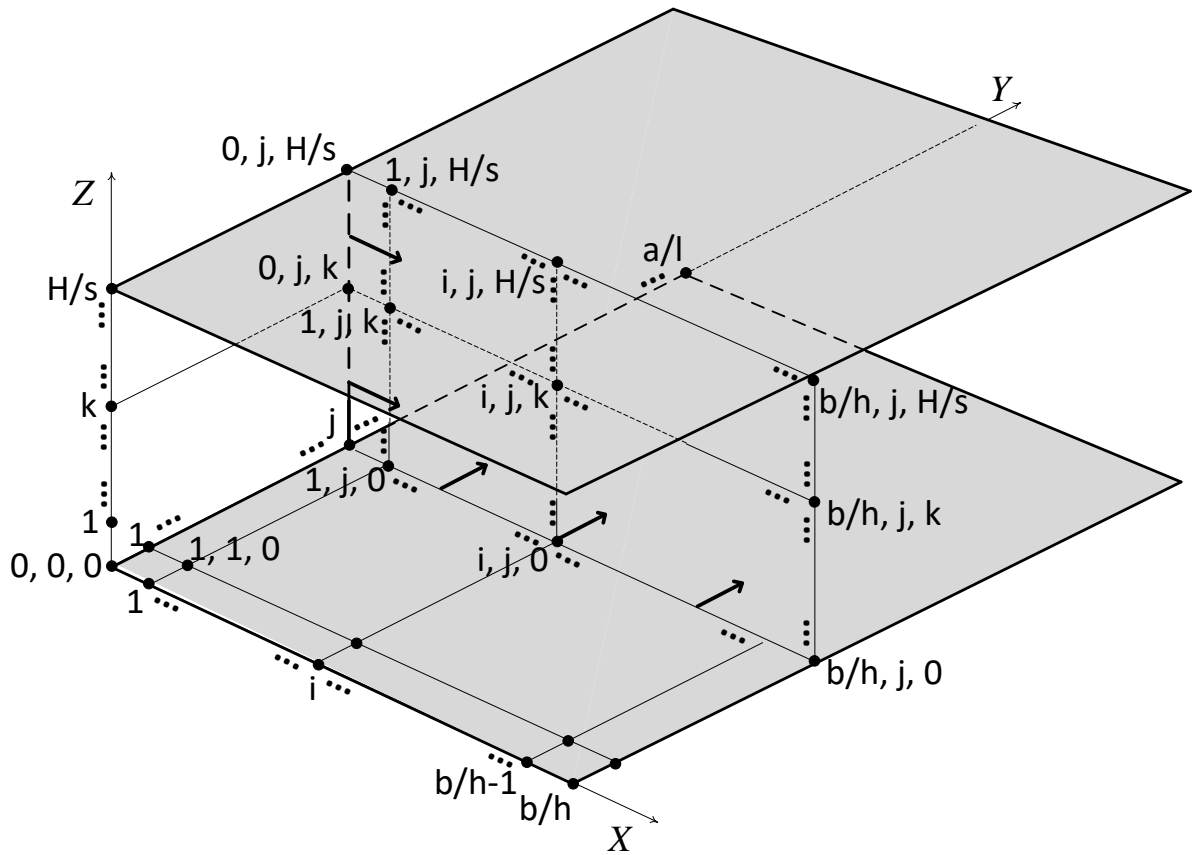


Рис. 1 – Схема прогонки

Прогонка будет осуществляться вдоль двух осей: оси X и оси Y. Так для прямой прогонки вдоль оси X каждому j-му узлу, принадлежащему оси Y, ставится в соответствие множество узлов, лежащих на вертикальной оси, которая проходит через j-ый узел. Образованная левая граница исследуемой области по j-му сечению перегоняется до правой границы путём её перемещения от плоскости ZOY вдоль оси OX. Образующееся при этом множество узлов  $(i, j, k)$ ,  $i = 0, \dots, b/h$ ,  $k = 0, \dots, H/s$  также ставится в соответствие j-му узлу оси Y. Далее осуществляется прогонка образованного сечения до узла  $j = a/l$  (до торца исследуемой области). Направления прямой прогонки вдоль оси X и оси Y показаны стрелками (рис. 1). Обратная прогонка осуществляется в обратном порядке.

Для получения расчётных выражений система уравнений (5) записывается в конечно-разностной форме:

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2h} \mathbf{B}_{(i+1),j,k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{(i+1),j,k,\tau} + \frac{1}{2l} \mathbf{C}_{i,(j+1),k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,(j+1),k,\tau} + \\
 & \quad + \frac{1}{2z} \mathbf{D}_{i,j,(k+1),(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,j,(k+1),\tau} + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} \mathbf{Q}_{i,j,k,\tau} - \\
 & - \frac{1}{2h} \mathbf{B}_{(i-1),j,k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{(i-1),j,k,\tau} - \frac{1}{2l} \mathbf{C}_{i,(j-1),k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,(j-1),k,\tau} - \\
 & \quad - \frac{1}{2z} \mathbf{D}_{i,j,(k-1),(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,j,(k-1),\tau} = \mathbf{F} + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} \mathbf{Q}_{i,j,k,(\tau-1)},
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{B}_{i,j,k,\tau} &= \begin{vmatrix} u_{i,j,k,\tau} & 0 & 0 & c^2 \\ 0 & u_{i,j,k,\tau} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u_{i,j,k,\tau} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & u_{i,j,k,\tau} \end{vmatrix}, \\
\mathbf{C}_{i,j,k,\tau} &= \begin{vmatrix} v_{i,j,k,\tau} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_{i,j,k,\tau} & 0 & c^2 \\ 0 & 0 & v_{i,j,k,\tau} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & v_{i,j,k,\tau} \end{vmatrix}, \\
\mathbf{D}_{i,j,k,\tau} &= \begin{vmatrix} w_{i,j,k,\tau} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_{i,j,k,\tau} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w_{i,j,k,\tau} & c^2 \\ 0 & 0 & 1 & w_{i,j,k,\tau} \end{vmatrix}, \quad \mathbf{Q}_{i,j,k,\tau} = \begin{vmatrix} u_{i,j,k,\tau} \\ v_{i,j,k,\tau} \\ w_{i,j,k,\tau} \\ p_{i,j,k,\tau}/\rho c^2 \end{vmatrix},
\end{aligned}$$

Далее выражение (6) удобно представить таким образом, чтобы были отдельно выделены члены, относящиеся к  $(j+1)$ ,  $j$  и  $(j-1)$ . Это необходимо для того, чтобы построить алгоритм прогонки в направлении вдоль оси ОУ. После перегруппировки:

$$\begin{aligned}
&\frac{1}{2l} \mathbf{C}_{i,(j+1),k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,(j+1),k,\tau} + \frac{1}{2h} \mathbf{B}_{(i+1),j,k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{(i+1),j,k,\tau} + \\
&\quad + \frac{1}{2z} \mathbf{D}_{i,j,(k+1),(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,j,(k+1),\tau} + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} \mathbf{Q}_{i,j,k,\tau} - \\
&-\frac{1}{2z} \mathbf{D}_{i,j,(k-1),(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,j,(k-1),\tau} - \frac{1}{2h} \mathbf{B}_{(i-1),j,k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{(i-1),j,k,\tau} - \\
&\quad - \frac{1}{2l} \mathbf{C}_{i,(j-1),k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,(j-1),k,\tau} = \mathbf{F} + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} \mathbf{Q}_{i,j,k,(\tau-1)}.
\end{aligned} \tag{7}$$

Введя в рассмотрение вектор узлов сетки разбиения исследуемой области, принадлежащих вертикальной линии сетки, которая проходит через  $i, j$ -ый узел сетки разбиения в плоскости ОХУ исследуемой области:

$$\boldsymbol{\Psi}_{i,j,\tau} = \begin{vmatrix} \mathbf{Q}_{i,j,0,\tau} \\ \mathbf{Q}_{i,j,1,\tau} \\ \dots \\ \mathbf{Q}_{i,j,H/s,\tau} \end{vmatrix}, \tag{8}$$

выражение (7) может быть записано в виде:

$$\begin{aligned}
&\mathbf{A} \mathbf{A}_{i,(j+1),(\tau-1)}^+ \boldsymbol{\Psi}_{i,(j+1),\tau} + \mathbf{A}_{(i+1),j,(\tau-1)}^+ \boldsymbol{\Psi}_{(i+1),j,\tau} + \\
&\quad \mathbf{A}_{i,j,(\tau-1)}^0 \boldsymbol{\Psi}_{i,j,\tau} - \mathbf{A}_{(i-1),j,(\tau-1)}^- \boldsymbol{\Psi}_{(i-1),j,\tau} - \\
&\quad - \mathbf{A} \mathbf{A}_{i,(j-1),(\tau-1)}^- \boldsymbol{\Psi}_{i,(j-1),\tau} = \tilde{\mathbf{F}}_{i,j,(\tau-1)},
\end{aligned} \tag{9}$$

$$AA_{i,j,\tau}^+ = \left\| \begin{array}{c} 0 \\ 1/2l C_{i,j,1,\tau} \\ \dots \\ 1/2l C_{i,j,H/s,\tau} \end{array} \right\|, AA_{i,j,\tau}^- = \left\| \begin{array}{c} 1/2l C_{i,j,0,\tau} \\ 1/2l C_{i,j,1,\tau} \\ \dots \\ 0 \end{array} \right\|,$$

$$A_{i,j,\tau}^+ = \left\| \begin{array}{c} 0 \\ 1/2h B_{i,j,1,\tau} \\ \dots \\ 1/2h B_{i,j,H/s,\tau} \end{array} \right\|, A_{i,j,\tau}^- = \left\| \begin{array}{c} 1/2h B_{i,j,0,\tau} \\ 1/2h B_{i,j,1,\tau} \\ \dots \\ 0 \end{array} \right\|,$$

$$A_{i,j,\tau}^0 = \left\| \begin{array}{ccccccc} \frac{-1}{2s} \mathbf{D}_{i,j,0,\tau} & \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} & \frac{1}{2s} \mathbf{D}_{i,j,2,\tau} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{-1}{2s} \mathbf{D}_{i,j,1,(\tau-1)} & \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} & \frac{1}{2s} \mathbf{D}_{i,j,3,\tau} & 0 & \dots & 0 \\ & & \dots & & & \dots & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{2s} \mathbf{D}_{i,j,H/s,\tau} \end{array} \right\|,$$

$$\check{F}_{i,j,\tau} = \left\| \begin{array}{c} F + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} Q_{i,j,0,\tau} \\ F + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} Q_{i,j,1,\tau} \\ \dots \\ F + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} Q_{i,j,H/s,\tau} \end{array} \right\|.$$

Далее, введя в рассмотрение секущую плоскость  $\Xi_{j,\tau} = \left\| \begin{array}{c} \Psi_{0,j,\tau} \\ \Psi_{1,j,\tau} \\ \dots \\ \Psi_{b/h,j,\tau} \end{array} \right\|$ ,

выражение (9) может быть приведено к виду:

$$AAA_{(j+1),(\tau-1)}^+ \Xi_{(j+1),\tau} + AA_{j,(\tau-1)}^0 \Xi_{j,\tau} - AAA_{(j-1),(\tau-1)}^- \Xi_{(j-1),\tau} = \check{F}_{j,(\tau-1)}, \quad (10)$$

$$AAA_{j,\tau}^+ = \left\| \begin{array}{c} 0 \\ AA_{1,j,\tau}^+ \\ \dots \\ AA_{b/h,j,\tau}^+ \end{array} \right\|, AAA_{j,\tau}^- = \left\| \begin{array}{c} AA_{0,j,\tau}^+ \\ AA_{1,j,\tau}^+ \\ \dots \\ 0 \end{array} \right\|, \check{F}_{j,\tau} = \left\| \begin{array}{c} \check{F}_{0,j,\tau} \\ \check{F}_{1,j,\tau} \\ \dots \\ \check{F}_{b/h,j,\tau} \end{array} \right\|,$$

$$AA_{j,\tau}^0 = \left\| \begin{array}{ccccccc} -\mathbf{A}_{0,j,\tau}^- & \mathbf{A}_{1,j,\tau}^0 & \mathbf{A}_{2,j,\tau}^+ & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\mathbf{A}_{1,j,\tau}^- & \mathbf{A}_{2,j,\tau}^0 & \mathbf{A}_{3,j,\tau}^+ & 0 & \dots & 0 \\ & & \dots & & & \dots & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \mathbf{A}_{\frac{b}{h},j,\tau}^+ \end{array} \right\|.$$

Задача прогонки будет решаться для крайнего левого, при  $j = (0 - 1)$ , и крайнего правого, при  $j = (a/l + 1)$ , положений секущей плоскости  $\bar{\Xi}_{j,\tau}$ .

Граничные условия для крайнего левого положения секущей плоскости имеют вид:

$$\mathbf{C}_{0,(\tau-1)}^{XZ} \bar{\Xi}_{-1,\tau} = \left[ \mathbf{C}_{0,(\tau-1)}^{XZ} + \frac{l}{\Delta t} \mathbf{I}^{XZ} \right] \bar{\Xi}_{0,\tau} + l \cdot \check{\check{\mathbf{F}}}_{0,\tau}, \quad (11)$$

$$\mathbf{C}_{0,(\tau-1)}^{XZ} = \left\| \begin{array}{c} \mathbf{C}_{0,0,0,(\tau-1)} \\ \mathbf{C}_{0,0,1,(\tau-1)} \\ \vdots \\ \mathbf{C}_{0,0,k,(\tau-1)} \\ \vdots \\ \mathbf{C}_{0,0,H/s,(\tau-1)} \\ \mathbf{C}_{1,0,0,(\tau-1)} \\ \vdots \\ \mathbf{C}_{b/h,0,H/s,(\tau-1)} \end{array} \right\|.$$

Граничные условия для крайнего правого положения:

$$\mathbf{C}_{a/l,(\tau-1)}^{XZ} \bar{\Xi}_{(a/l-1),\tau} = \left[ \mathbf{C}_{a/l,(\tau-1)}^{XZ} + \frac{l}{\Delta t} \mathbf{I}^{XZ} \right] \bar{\Xi}_{a/l,\tau} + l \cdot \check{\check{\mathbf{F}}}_{a/l,\tau}. \quad (12)$$

Полученная система уравнений:

$$\bar{\Xi}_{-1,\tau} = \mathbf{X}_{0,\tau} \bar{\Xi}_{0,\tau} + \mathbf{y}_{0,\tau}, \quad (13)$$

$$\mathbf{X}_{0,\tau} = \left[ \mathbf{C}_{0,(\tau-1)}^{XZ} + \frac{l}{\Delta t} \mathbf{I}^{XZ} \right] (\mathbf{C}_{0,(\tau-1)}^{XZ})^{-1}, \quad \mathbf{y}_{0,\tau} = l (\mathbf{C}_{0,(\tau-1)}^{XZ})^{-1} \check{\check{\mathbf{F}}}_{0,\tau}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \bar{\Xi}_{(j+1),\tau} = & -AA_{j,(\tau-1)}^0 (AAA_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \bar{\Xi}_{j,\tau} + \\ & + AAA_{(j-1),(\tau-1)}^- (AAA_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \bar{\Xi}_{(j-1),\tau} + \\ & + \check{\check{\mathbf{F}}}_{j,(\tau-1)} (AAA_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\bar{\Xi}_{(a/l-1),\tau} = \mathbf{X}_{a/l,\tau} \bar{\Xi}_{a/l,\tau} + \mathbf{y}_{a/l,\tau}, \quad (16)$$

$$\mathbf{X}_{a/l,\tau} = \left[ \mathbf{C}_{a/l,(\tau-1)}^{XZ} + \frac{l}{\Delta t} \mathbf{I}^{XZ} \right] (\mathbf{C}_{a/l,(\tau-1)}^{XZ})^{-1}, \quad (17)$$

$$\mathbf{y}_{a/l,\tau} = l(\mathbf{C}_{a/l,(\tau-1)}^{XZ})^{-1} \tilde{\mathbf{F}}_{a/l,\tau}, \quad (18)$$

решается методом прогонки.

Прямая прогонка будет совершена в том случае, когда будут найдены  $\mathbf{X}_{j,\tau}$  и  $\mathbf{y}_{j,\tau}$ ,  $j = 0, \dots, a/l$ , такие, чтобы выполнялось равенство:

$$\tilde{\Xi}_{(j-1),\tau} = \mathbf{X}_{j,\tau} \tilde{\Xi}_{j,\tau} + \mathbf{y}_{j,\tau}. \quad (19)$$

Для отыскания  $\mathbf{X}_{j,\tau}$  и  $\mathbf{y}_{j,\tau}$  в (18) подставляется  $\tilde{\Xi}_{(j-1),\tau}$  из (19):

$$\begin{aligned} \tilde{\Xi}_{(j+1),\tau} = & -\mathbf{A}\mathbf{A}_{j,(\tau-1)}^0 (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \tilde{\Xi}_{j,\tau} + \\ & + \mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j-1),(\tau-1)}^- (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} (\mathbf{X}_{j,\tau} \tilde{\Xi}_{j,\tau} + \mathbf{y}_{j,\tau}) + \\ & + \tilde{\mathbf{F}}_{j,(\tau-1)} (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1}, \end{aligned} \quad (20)$$

После записи (20) в форме, аналогичной (13), получено выражение:

$$\begin{aligned} \tilde{\Xi}_{j,\tau} = & \\ = & \left\{ -\mathbf{A}\mathbf{A}_{j,(\tau-1)}^0 (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} + \right. \\ & + \mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j-1),(\tau-1)}^- (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \mathbf{X}_{j,\tau} \left. \right\}^{-1} \tilde{\Xi}_{(j+1),\tau} - \\ & - \mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j-1),(\tau-1)}^- (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \times \\ & \times \left\{ -\mathbf{A}\mathbf{A}_{j,(\tau-1)}^0 (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} + \right. \\ & + \mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j-1),(\tau-1)}^- (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \mathbf{X}_{j,\tau} \left. \right\}^{-1} \mathbf{y}_{j,\tau} - \\ & - \tilde{\mathbf{F}}_{j,(\tau-1)} (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \times \\ & \times \left\{ -\mathbf{A}\mathbf{A}_{j,(\tau-1)}^0 (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} + \right. \\ & + \mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j-1),(\tau-1)}^- (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \mathbf{X}_{j,\tau} \left. \right\}^{-1}, \end{aligned} \quad (21)$$

из которого следует:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{(j+1),\tau} = & \left\{ -\mathbf{A}\mathbf{A}_{j,(\tau-1)}^0 (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} + \right. \\ & + \mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j-1),(\tau-1)}^- (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \mathbf{X}_{j,\tau} \left. \right\}^{-1}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{(j+1),\tau} = & -\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j-1),(\tau-1)}^- (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \mathbf{X}_{(j+1),\tau} \mathbf{y}_{j,\tau} - \\ & - \tilde{\mathbf{F}}_{j,(\tau-1)} (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \mathbf{X}_{(j+1),\tau}. \end{aligned} \quad (23)$$

Так как  $\mathbf{X}_{0,\tau}$  и  $\mathbf{y}_{0,\tau}$  известны из краевых условий для крайнего левого торца, левой боковой и нижней граней исследуемой области, то с помощью

рекуррентных соотношений (17), (18) могут быть определены  $X_{j,\tau}$  и  $Y_{j,\tau}$  для всех  $j = 0, \dots, a/l$ .

На основании (16) определяется  $\Xi_{a/l,\tau}$ .

Для известных значений элементов матрицы-вектора  $\Xi_{a/l,\tau}$ , на основании найденных значений  $X_{j,\tau}$  и  $Y_{j,\tau}$ ,  $j = 0, \dots, a/l$ , с помощью рекуррентного соотношения (13), рассчитываются  $\Xi_{j,\tau}$ ,  $j = a/l - 1, a/l - 2, \dots, 1$ . Выполняется обратная прогонка.

## Выводы

В статье предложен метод решения системы квазилинейных дифференциальных уравнений газовой динамики, описывающих поле скоростей и давлений в объёме воздушной среды, находящейся между двумя эквидистантными синхронно-колеблющимися плоскостями вибромашины при заданных краевых условиях для исследуемого объёма воздуха. Предлагаемый способ расчёта поля скоростей и давлений основывается на методе прогонки для трёхмерного случая для системы дифференциальных уравнений.

Построенный на основе предложенного подхода алгоритм расчёта является инвариантным в отношении к формулируемым краевым условиям для исследуемой воздушной массы. То есть какие-либо изменения конструкции крепления рабочих плоскостей, видоизменение их кромок и тому подобное, не приведут к необходимости изменения алгоритма расчёта. Метод позволяет проводить достаточно широкие исследования влияния конструкции вибромашины на параметры воздушного потока, создаваемого между колеблющимися плоскостями.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки алгоритмов расчёта параметров воздушного потока между эквидистантными синхронно-колеблющимися плоскостями вибромашин, реализованные на ЭВМ.

## 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. Березин И. С. Методы вычислений. Том 2 / И.С. Березин, Н.П. Жидков. – М.: Изд. физ. мат. литературы. – 1959. – 620 с.
4. Абдуев М. М. Теоретические исследования характеристик движения частиц в наклоненном воздушном канале при изменении характеристик эпюры скорости воздуха по высоте канала М. М. Абдуев, М. В. Бакум, Ю. О. Манчинский, В. В. Сичов, В. П. Леонов // Механизация сельського хозяйства: Вестник ХНТУСХ.– Харьков, 2003.– Вып.21.– С. 88-94.



5. Завгородний А. И., Синяева О. В. Движение шара в воздушном потоке между вибрирующими плоскостями / А. И. Завгородний, О. В. Синяева // Вибрация в технике и технологиях: Всеукраинський научно-технічний журнал, №3(67).– Винница: ВНАУ, 2012.– С. 20-27.
6. Седов Л. И. Механика сплошной среды. Т. 1. – М.: Наука, 1970. – 492 с.
7. Лукьяненко В. М. Метод расчета поля скоростей воздушного среды между двумя эквидистантными плоскостями при осуществлении ими синхронных гармонических колебаний / А. А. Никифоров, А. П. Петрик // Вестник ХНТУСХ им. П. Василенка. – Харьков. 2017, Вып 180, стр. 100-106.
8. Лукьяненко В. М. Постановка задачи расчета поля скоростей воздушного среды между двумя эквидистантными плоскостями при осуществлении ими синхронных гармонических колебаний / А.А. Никифоров // Инженерия Природопользования №2 (8) 2017, стр. 33-38.
9. Гольдин А. В. О влиянии воздушной среды на процесс вибрационного перемещения сыпучего материала. В кн.: Динамика, прочность и надёжность тракторов и сельскохозяйственных машин, Сб.н.тр. МИИСП, М., 1976, с. 78-63.

#### Анотація

### **РОЗРАХУНОК ПОЛЯ ШВИДКОСТЕЙ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА МІЖ ДВОМА ЕКВІДИСТАНТНИМИ ПЛОЩИНАМИ ПРИ ЗДІЙСНЕННІ НИМИ СИНХРОННИХ ГАРМОНІЙНИХ КОЛИВАНЬ МЕТОДОМ ПРОГОНУ**

Лук'яненко В. М., Кісь В. М., Никифоров А. О.

*У даній статті представлений спосіб розрахунку поля швидкостей повітряного середовища між двома еквідистантними площинами при здійсненні ними синхронних гармонічних коливань, заснований на методі прогонки для системи квазілінійних диференціальних рівнянь газової динаміки для тривимірного випадку.*

#### Abstract

### **CALCULATION OF THE FIELDS OF THE AIR SPEED SPEEDS BETWEEN TWO EQUIDISTANT PLANES WHEN THEIR SYNCHRONOUS HARMONIC VIBRATIONS ARE PERFORMED BY THE METHOD OF PROPAGATION**

V. Lukianenko, V. Kis, A. Nikiforov

*This paper presents a method for calculating the air velocity field between two equidistant planes when they perform synchronous harmonic oscillations, based on the sweep method for a system of quasilinear differential equations of gas dynamics for a three-dimensional case.*