

Переробка та зберігання сільськогосподарської продукції
 Processing and storage of agricultural products



УДК 631.362:53

Использование гидродинамической аналогии с применением уравнений Навье-Стокса для решения задач очистки воздушного потока в пылеосадочных камерах зерноочистительных сепараторов

Л.Н.Тищенко, С.А.Харченко¹, Ф.М.Харченко

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
 имени Петра Василенко, (Харьков, Украина), ¹ kharchenko_mtf@ukr.net

Рассмотрены возможности применения уравнений Навье-Стокса для моделирования динамики двухфазных потоков в пылеосадочных камерах зерновых сепараторов

Ключевые слова: засоренность, очистка, воздух, поток, скорость, частица, гидродинамика, разделение, канал.

Постановка проблемы и ее актуальность. Увеличение засоренности и объемов переработки зерна приводит к превышению нормированной запыленности обслуживаемой зоны, требует повышения эффективности процесса очистки воздушного потока пылеосадочными камерами зерновых сепараторов А1-БЦСМ-100, Р8-БЦСМ-25, Р8-БЦСМ-50, СВС-15, СВС-5. Дальнейшее увеличение производительности сепараторов приводит к снижению качества очистки воздушного потока пылеосадочными камерами и загрязнению окружающей среды.

Анализом известных исследований, направленных на усовершенствование пылеулавливающих устройств, установлено, что перспективным направлением повышения их эффективности является интенсификация процесса очистки воздушного потока путем применения регулируемого промежуточного отбора и отвода частиц примесей. Однако, в виду сложного пространственного движения и наличия многофазной среды, моделирование процессов очистки воздушного потока и оптимизация параметров соответствующих устройств затруднено.

Анализ результатов последних исследований и публикаций. Математические модели динамики газового (воздушного) потока бази-

руются на двух основных уравнениях гидродинамики: уравнении неразрывности движения и динамическом уравнении движения несжимаемой жидкости (уравнении Навье-Стокса) [1].

Уравнение неразрывности (сплошности) потока:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

где ρ - плотность среды, кг/м³; τ - продолжительность, с; v - скорость среды (газа, воздуха), м/с; x, y, z - направление осей координат, представляет собой выражение закона сохранения энергии, согласно которому изменение массы определенного элементарного объема газов компенсируется соответствующим изменением его плотности ($\partial \rho / \partial \tau$).

Второе основное уравнение гидродинамики, уравнение Навье-Стокса, определяет систему сил, действующих в газе (жидкости), и по направлениям осей координат для элементарного объема представляют в виде [1]:

$$\begin{cases} \mu A_x - \partial p_x / \partial x = \rho B_x, \\ \mu A_y - \partial p_y / \partial y = \rho B_y, \\ \mu A_z - \rho g - \partial p_z / \partial z = \rho B_z, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$A_i = \frac{\partial^2 v_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial z^2},$$

$$B_i = \frac{\partial v_i}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial v_i}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_i}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_i}{\partial z},$$

(i = x, y, z),

p - давление в рассматриваемой точке потока, Па;
 μ - динамическая вязкость среды, Па·с.

Уравнение (2) учитывает действие четырех сил: тяжести, давления, внутреннего трения (вязкости) и инерции. Сила тяжести (ρg) представляет собой внешний фактор, а остальные силы - результат действия окружающей среды на выделенный элементарный объем.

Дифференциальные уравнения (1) и (2) характеризуют внутренний механизм процесса, устанавливают взаимосвязь между физическими условиями процесса и изменениями этих условий во времени. Однако уравнения не учитывают внешних воздействий на систему, и поэтому должны быть дополнены граничными условиями, характеризующими взаимодействие системы с внешней средой. Наряду с граничными условиями для характеристики состояния системы в начальный момент процесса приводятся начальные условия. Граничные и начальные условия в совокупности представляют собой краевые условия, выделяющие пространственно-временную область, в которой рассматривается процесс, и обеспечивающие единственность решения задачи.

Уравнения (1) и (2) фактически образуют систему с двумя неизвестными v_i и p . Решить подобную систему в общем виде весьма затруднительно. Приближенное решение удастся получить только в отдельных случаях, когда идут по пути упрощений уравнений с учетом конкретно поставленной задачи. Принято считать [2], что частицы остаются твердыми телами и не меняют во времени свою форму и диаметр. Поверхность частиц принимается гладкой.

Большинство аспирационных схем зерноочистительных машин имеет две ступени очистки воздушного потока: первая грубая очистка – пылеосадочные камеры, вторая тонкая очистка – усовершенствованные циклоны, фильтры. Рассмотрим пылеосадочные камеры, которые для создания инерционных сил имеют перегородку с криволинейной поверхностью в верхней части. Установка криволинейной поверхности заставляет дисперсные частицы перераспределяться и двигаться вдоль перегородки. Для повышения эффективности процесса очистки воздушного потока разработано пылеулавливающее устройство [3] которое установлено на перегородку. При помощи ще-

ли и дополнительного клапана, которые выполнены на перегородке, происходит отсеечение дисперсных частиц от потока. Отделенные частицы транспортируются по специальным рукавам в нижнюю зону камеры к выгрузному устройству. Сумма коэффициентов очистки камеры η_k и пылеулавливающего устройства η_y составляют общий коэффициент очистки η_o разработанной пылеосадочной камеры.

Цель работы: математическое моделирование динамики частиц дисперсной фазы в воздушном потоке для определения возможностей повышения эффективности процесса очистки воздушного потока пылеосадочными камерами зерновых сепараторов.

Для получения зависимостей, позволяющих определить влияние на закономерности процесса вышеуказанного разделения потока на две составляющие, исследуем сначала его динамику в плоском криволинейном канале, в котором осуществляется регулируемый отбор примесей дополнительным клапаном с поперечной щелью.

С точки зрения механики процесс очистки запыленного воздушного потока относится к динамике двух или многофазных сред [4-7]. Рассмотрим задачу динамики двухфазного потока, состоящего из несущей среды (воздушного потока) и дисперсных частиц (частиц пыли и легких примесей), в рабочей зоне канала пылеосадочной камеры [8]. Многофазные среды описываются моделью многоскоростных взаимопроникающих континуумов. При отсутствии фазовых превращений соответствующие уравнения сохранения массы и импульса имеют следующий вид [5]:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \text{div } \rho_i \vec{u}_i = 0, \quad (3)$$

$$\rho_i \left(\frac{\partial \vec{u}_i}{\partial t} + \vec{u}_i \cdot \nabla \vec{u}_i \right) = \text{div } \vec{\sigma}^{(i)} + \rho_i \vec{g} + \sum_{j=1, j \neq i}^m \vec{P}_{ji}, \quad (4)$$

где $\rho_i, \vec{u}_i, \vec{\sigma}^{(i)}$ - плотность, скорость и тензор напряжений i -ой фазы; \vec{P}_{ji} - источник импульса для i -ой фазы, вызванный взаимодействием с j -ой фазой; \vec{g} - интенсивность внешних массовых сил (сила тяжести).

Данная система уравнений является незамкнутой (число уравнений меньше числа неизвестных). Одной из основных проблем при построении модели многофазной среды является проблема замыкания уравнений, которая сводится к нахождению зависимости тензора напряжений от кинематических

характеристик потока, таких как тензор скоростей деформации среды, и других факторов [6, 9, 10].

Рассмотрим плоскую задачу, исследуя движение среды в криволинейном канале (рис.1) в двухмерном виде.

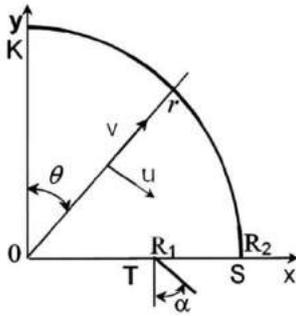


Рис.1. Плоская (двухмерная) расчетная схема криволинейного канала

Вначале составим основную систему уравнений, описывающую нелинейную динамику потока. Сюда входят уравнения сохранения массы и импульса двух фаз [5]:

для воздушного потока

$$\partial \rho_1 / \partial t + \text{div } \rho_1 \vec{u}_1 = 0, \quad (5)$$

$$\rho_1 (\partial \vec{u}_1 / \partial t + \vec{u}_1 \cdot \nabla \vec{u}_1) = \text{div } \vec{\sigma}^{(1)} + \rho_1 \vec{g} - \alpha_1 \vec{F}_{21} \quad (6)$$

и дисперсных частиц

$$\partial n / \partial t + \text{div } n \vec{U} = 0, \quad (7)$$

$$\rho_2 \left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \vec{U} \right) = \text{div } \vec{\sigma}^{(2)} + \quad (8)$$

$$+ \alpha_2 \text{div } \vec{\sigma}^{(1)} + \rho_2 \vec{g} + \alpha_1 \vec{F}_{21},$$

где $\vec{\sigma}^{(1)}, \vec{\sigma}^{(2)}$ - тензоры напряжений для воздушного потока и дисперсных частиц; $u=u_1, U=u_2$ - скорости воздушного потока и дисперсных частиц, соответственно;

$\alpha_1 \vec{F}_{21}$ - сила, с которой воздействуют частицы пыли на воздушный поток (она равна по величине и противоположна по направлению силе, с которой действует воздушный поток на частицы пыли); n - число частиц дисперсной фазы в единице объема (концентрация); α_1, α_2 - объемные доли воздуха и пыли:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1.$$

Математическая модель процесса очистки воздушного потока принимает вид:

$$\partial \rho_1 / \partial t + \text{div } \rho_1 \vec{u} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = - \frac{\nabla p}{\rho_1} + \quad (10)$$

$$+ \frac{\zeta + \mu/3}{\rho_1} \text{grad div } \vec{u} + \frac{\mu}{\rho_1} \Delta \vec{u} + \vec{g}$$

$$\partial n / \partial t + \text{div } n \vec{U} = 0, \quad (11)$$

$$\partial \vec{U} / \partial t + \vec{U} \cdot \nabla \vec{U} = \vec{g} + D^* \vec{u}_{12}, \quad (12)$$

где ρ_1, p - плотность и давление воздушного потока; ζ, μ - динамические коэффициенты вязкости воздушного потока; u, U - скорости воздушного потока и дисперсных частиц; $\vec{u}_{12} = \vec{u}_1 - \vec{u}_2$ - относительная скорость дисперсных частиц; n, a - концентрация и средний линейный размер дисперсных частиц; D^* - физический параметр, имеющий вид: $D^* = 3C_\mu \rho_1^0 / 8a \rho_2^0$; ρ_1^0, ρ_2^0 - действительные плотности воздуха и дисперсных частиц, C_μ - коэффициент сопротивления.

Принимаем следующие граничные условия:

- при $\theta=0^\circ$ (входное сечение):

$$\rho(t, \theta, r) = \rho^1(t, r), u(t, \theta, r) = u^1(t, r), v(t, \theta, r) = v^1(t, r),$$

где ρ^1, u^1, v^1 - плотность, тангенциальная и радиальная составляющие скорости воздушного потока на входе в канал;

- условие прилипания воздушного потока ($\vec{u} = 0$) и не проникновения для дисперсных частиц ($\vec{U} \cdot \vec{n} = 0, \vec{n}$ - единичная нормаль) на кривой KS;

- условие свободного вытекания на отрезке OT - для нормальной составляющей скорости движения среды

$$\partial (\vec{u} \cdot \vec{n}) / \partial \theta = 0;$$

- на отрезке TS - условие, учитывающее наличие устройства, разделяющего поток:

$$\int_{R_1}^{R_2} \vec{u} \cdot \vec{n} dr = k \int_{R_1}^{R_2} (p - p_a) dr,$$

где R_1, R_2 - радиусы, определяющие площадь входного сечения пылеулавливающего устройства, k - эмпирический параметр, p_a - атмосферное давление;

- при $\theta=90^\circ, 0 < r < R_1$:

$$\frac{\partial u}{\partial \theta}(t, \pi/2, r) = 0,$$

$$v(t, \pi/2, r) = r u(t, \pi/2, r) \text{tg } \alpha;$$

$$u(t, \pi/2, r) = u_a (R_2 - r)(r - R_1),$$

$$\int_{R_1}^{R_2} u(t, \pi/2, r) dr = kC \int_{R_1}^{R_2} (\rho(t, \pi/2, r) - \rho_a) dr,$$

$$v(t, \pi/2, r) = u(t, \pi/2, r) \operatorname{tg} \alpha,$$

$$\operatorname{tg} \alpha = (R_2 - R_1) / b,$$

где u_a - максимальная скорость на СТ, ρ_a - плотность атмосферного воздуха, C - квадрат скорости звука;

- на входе, приняты заданные распределения характеристик потока $\rho_1, n, \vec{u}, \vec{U}$ - по объему канала при $t=0$.

С учетом условий математическая модель нелинейной динамики двухфазного потока с регулируемым промежуточным отбором дисперсных частиц принимает вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{u}{r} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} + v \frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \rho \frac{\partial v}{\partial r} = -\rho \frac{v}{r}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v}{r^2 \rho} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + v \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{\mu_1}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{C}{r \rho} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} = g_\theta - \frac{uv}{r} + \frac{\chi}{r \rho} \frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \theta} + \frac{\mu_1}{r \rho} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{\mu_1 u}{r^2 \rho} + \frac{\omega}{r^2 \rho} \frac{\partial v}{\partial \theta}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{\mu_1}{r^2 \rho} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + v \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{C}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial r} = g_r + \frac{u^2}{r} + \frac{\chi}{r \rho} \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial \theta} + \frac{v}{r \rho} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{v v}{r^2 \rho} - \frac{\omega}{r^2 \rho} \frac{\partial u}{\partial \theta}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{(u+U)}{r} \frac{\partial n}{\partial \theta} + (v+V) \frac{\partial n}{\partial r} + \frac{n}{r} \frac{\partial (u+U)}{\partial \theta} + n \frac{\partial (v+V)}{\partial r} + n \frac{(v+V)}{r} = 0, \quad (16)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{u+U}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + D^* |\vec{u}_{12}| \right) U + (v+V) \frac{\partial U}{\partial r} = g_\theta - \frac{(u+U)(v+V)}{r} - \frac{\partial u}{\partial r} V, \quad (17)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{u+U}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \left(\frac{\partial v}{\partial r} + D^* |\vec{u}_{12}| \right) V + (v+V) \frac{\partial V}{\partial r} = g_r - \frac{(u+U)(v+V)}{r} - \frac{\partial u}{\partial r} V, \quad (18)$$

где $\rho = \rho_1$, $v = \lambda + \mu_1$, $\omega = v + \mu_1$, $\lambda = \xi - 2\mu_1/3$; μ_1 - эффективный динамический коэффициент вязкости потока; u, U, v, V - тангенциальные и радиальные составляющие скоростей воздушного потока и дисперсных частиц.

Рассмотрим трехмерную задачу. Конструкция устройства пылесосаочной камеры предусматривает секционирование отверстия MNEF (рис.2) для отвода отобранного насыщенного примесями воздушного потока на две части в П-образные отводные рукава [11].

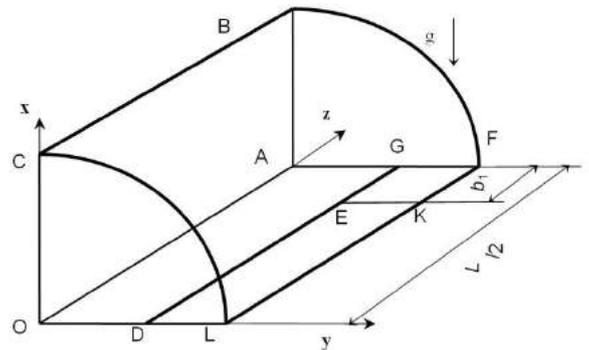


Рис.2. Схема разработанного устройства

С учетом симметрии конструкции относительно плоскости xOy, на рис.2 изображена только половина устройства. Здесь OABC соответствует входному сечению, OAGD – сечение основного выходного отверстия, DEKL – непроницаемая стенка дополнительного клапана, EGFK – сечение одного из вспомогательных выходных отверстий. Часть двухфазного потока, выходящая через основное выходное сечение, движется вертикально вниз, а поток, проходящий через вспомогательное отверстие, может отклоняться от вертикального направления на необходимый угол α (угол между проекцией скорости на плоскость XOY и направлением силы тяжести g). Стенка CBFL устройства (рис.2) представляет собой цилиндрическую поверхность радиуса R_2 , а полуширина устройства OA равна $L/2$. Обозначим ширину основного выходного сечения OD также через R_1 ($R_1 < R_2$), длину вспомогательного отверстия KF через b_1 .

Принимаем граничные условия для трехмерной задачи:

- на DEKL, CBFL, ABF условие прилипания и не проникновения;

- условие симметрии потока:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial V}{\partial z} = 0, \quad w = W = 0;$$

- на OAGD заданы u, v, w в виде:

$$\begin{cases} u(\pi/2, r, z) = u_0 \sin\left(\frac{\pi r}{R_1}\right) \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right); \\ \frac{\partial v}{\partial \theta}(\pi/2, r, z) = 0; \quad (r \leq R_1, 0 \leq z \leq L/2); \\ \frac{\partial w}{\partial \theta}(\pi/2, r, z) = 0; \end{cases}$$

-на EGFK:

$$\begin{cases} u(\pi/2, r, z, t) = \\ = u_s \sin\left(\frac{\pi(R_2 - r)}{R_2 - R_1}\right) \left(\frac{L}{2} - z\right) \left(z - \frac{L}{2} + b_1\right); \\ v(\pi/2, r, z, t) = v(\pi/2, r, z) \operatorname{tg} \alpha; \\ (R_1 \leq r \leq R_2, 0 \leq z \leq L/2); \\ \frac{\partial w}{\partial \theta}(\pi/2, r, z, t) = 0; \end{cases}$$

где

$$u_s = u_{cp} \frac{\pi R_2 L}{2(R_2 - R_1)(4K_0/\pi + b_1^2/3)},$$

$$u_0 = 2K_0 u_s b_1 (R_2 - R_1) / R_1 L,$$

где K_0 - коэффициент расхода; u_{cp} - средняя входная скорость воздушного потока;

- при $\theta=0^0$:

$$\begin{cases} u(0, r, z, t) = u_{cp} \frac{\pi^2}{4} \sin\left(\frac{\pi r}{R_2}\right) \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right); \\ v(0, r, z, t) = 0; \\ w(0, r, z) = 0; \\ \rho(0, r, z, t) = \rho_0; \\ n(0, r, z, t) = n_0; \\ U(0, r, z, t) = u(0, r, z, t); \\ V(0, r, z, t) = v(0, r, z, t); \\ W(0, r, z, t) = w(0, r, z, t); \end{cases}$$

где ρ_0, n_0 - начальные плотность потока и количество дисперсных частиц;

- при $t=0$:

$$\begin{cases} \rho(\theta, r, z, 0) = \rho_0; \\ u(\theta, r, z, 0) = \frac{2}{\pi} \left(\theta u(\pi/2, r, z, 0) + (\pi/2 - \theta) u(0, r, z, 0) \right); \\ v(\theta, r, z, 0) = 0; \\ w(\theta, r, z, 0) = 0; \\ U(\theta, r, z, 0) = u(\theta, r, z, 0); \\ V(\theta, r, z, 0) = v(\theta, r, z, 0); \\ W(\theta, r, z, 0) = w(\theta, r, z, 0); \\ n(\theta, r, z, 0) = n_0. \end{cases}$$

Тогда математическая модель нелинейной динамики двухфазного потока с отводом частиц дисперсной фазы с учетом условий:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{u}{r} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} + v \frac{\partial \rho}{\partial r} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} + \quad (19)$$

$$+ \frac{\rho}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \rho \frac{\partial v}{\partial r} + \rho \frac{v}{r} + \rho \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v}{r^2 \rho} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} +$$

$$+ v \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{\mu_1}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\mu_1}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \quad (20)$$

$$+ \frac{C}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} = g \sin \theta - \frac{uv}{r} +$$

$$+ \frac{\chi}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial \theta \partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{v}{r^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial \theta \partial z} \right) +$$

$$+ \frac{\mu_1}{\rho} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{u}{r^2} \right),$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{\mu_1}{r^2 \rho} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} +$$

$$+ v \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + w \frac{\partial v}{\partial z} -$$

$$- \frac{\mu_1}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{C}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial r} =$$

$$= -g \sin \theta + \frac{u^2}{r} +$$

$$+ \frac{\chi}{\rho} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta \partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} \right) +$$

$$+ \frac{\mu_1}{\rho} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v}{r^2} \right),$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{u}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} - \frac{\mu_1}{r^2 \rho} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} +$$

$$+ v \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{\mu_1}{\rho} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + w \frac{\partial w}{\partial z} - \quad (22)$$

$$- \frac{\mu_1}{\rho} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{C}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} =$$

$$= \frac{\chi}{\rho} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta \partial z} + \frac{\partial^2 v}{\partial r \partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\mu_1}{\rho r} \frac{\partial w}{\partial r},$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{U}{r} \frac{\partial n}{\partial \theta} + V \frac{\partial n}{\partial r} + \frac{n}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} + \quad (23)$$

$$+ n \left(\frac{\partial V}{\partial r} + \frac{V}{r} \right) + n \frac{\partial W}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} + V \frac{\partial U}{\partial r} + W \frac{\partial U}{\partial z} = \quad (24)$$

$$= g \sin \theta - \frac{UV}{r^2} + D^* |\vec{u} - \vec{U}| (u - U)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} + V \frac{\partial V}{\partial r} + W \frac{\partial V}{\partial z} = \quad (25)$$

$$= -g \cos \theta + \frac{U^2}{r} + D^* |\vec{u} - \vec{U}| (v - V)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{U}{r} \frac{\partial W}{\partial \theta} + V \frac{\partial W}{\partial r} + W \frac{\partial W}{\partial z} = \quad (26)$$

$$= D^* |\vec{u} - \vec{U}| (w - W)$$

где $u(\theta, r, z, t)$, $U(\theta, r, z, t)$ – трансверсальные, $v(\theta, r, z, t)$, $V(\theta, r, z, t)$ – радиальные, $w(\theta, r, z, t)$, $W(\theta, r, z, t)$ – осевые составляющие скоростей воздушного потока и дисперсных частиц.

Коэффициент очистки пылеулавливающего устройства определяется по формуле:

$$\eta_y = \frac{\int_{\Sigma_s} n U d \Sigma}{\int_{\Sigma_s} n U d \Sigma + \int_{\Sigma_o} n U d \Sigma} 100\%$$

где Σ_o , Σ_s – соответственно, площади отверстий OAGD и EGFK.

Для решения полученных уравнений использовали конечно-разностный метод расщепления уравнений Навье-Стокса с использованием схемы Кранка-Николсона. При расчетах выбрана сетка размером 20×20×40 узлов.

Численные расчеты по вышеизложенной методике проведены при следующих значениях параметров: плотность воздуха $\rho_1^0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$; плотность частиц $\rho_2^0 = 800 \text{ кг/м}^3$; средняя скорость воздушного потока $u_{cp} = 2,0 \text{ м/с}$; линейный размер частицы $a = 2,0 \text{ мм}$; угол открытия дополнительного клапана $\alpha = 30 \dots 37^\circ$; коэффициент расхода $K_0 = 1 \dots 4$; ширина устройства $L = 0,8 \text{ м}$; ширина щели $b = 0,08 \dots 0,11 \text{ м}$; начальная плотность воздушного потока принята постоянной по каналу и равной $1,29 \text{ кг/м}^3$; начальная относительная скорость дисперсных частиц равнялась нулю, а концентрация частиц $n = 10^4 \text{ шт/м}^3$; шаг по времени в начальный момент времени принят равным 0,1 времени достижения звука от входа канала до его конца вдоль стенки канала BCLF. В дальнейшем этот шаг выбирался автоматически так, чтобы максимальная погрешность решения между двумя последовательными шагами по времени не превышала заданной, равной 10^{-5} .

Для изучения траекторий движения дисперсных частиц при подаче в рабочую зону на различной высоте Y построены зависимости рис.3.

На рис.4-7 представлены зависимости изменения составляющих скоростей воздушного потока и дисперсных частиц в рабочей зоне пылеулавливающего устройства.

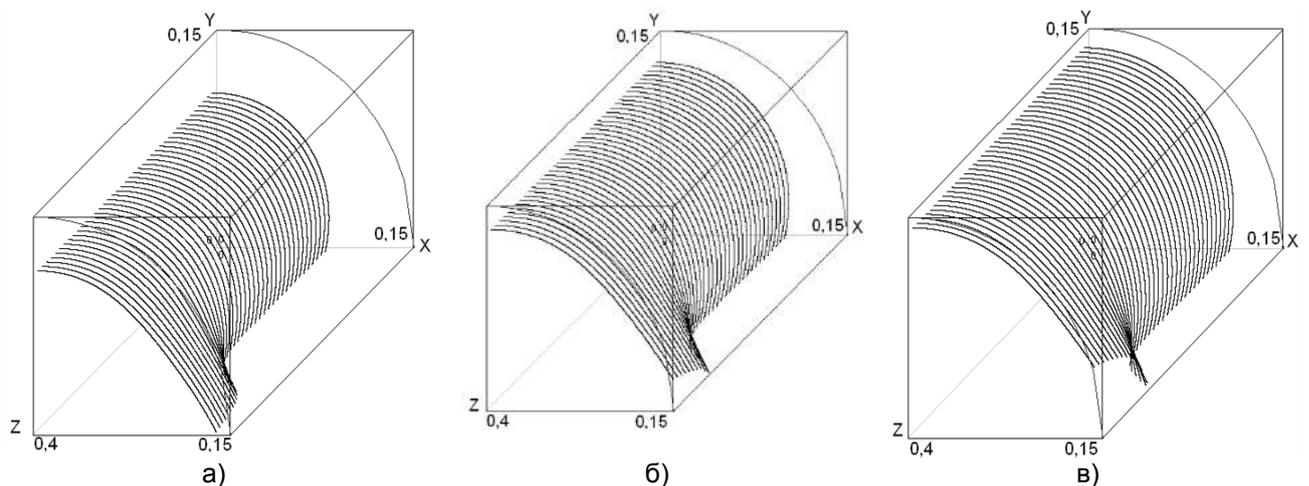


Рис.3. Траектории движения частиц дисперсной фазы, при: а) подаче в рабочую зону частиц дисперсной фазы на высоте $Y = 0,09 \text{ м}$; б) $Y = 0,11 \text{ м}$; в) $Y = 0,13 \text{ м}$; ($u_{cp} = 2 \text{ м/с}$; $K_0 = 2$; $L = 0,8 \text{ м}$; $b = 0,1 \text{ м}$; $\alpha = 30^\circ$; $a = 0,002 \text{ м}$)

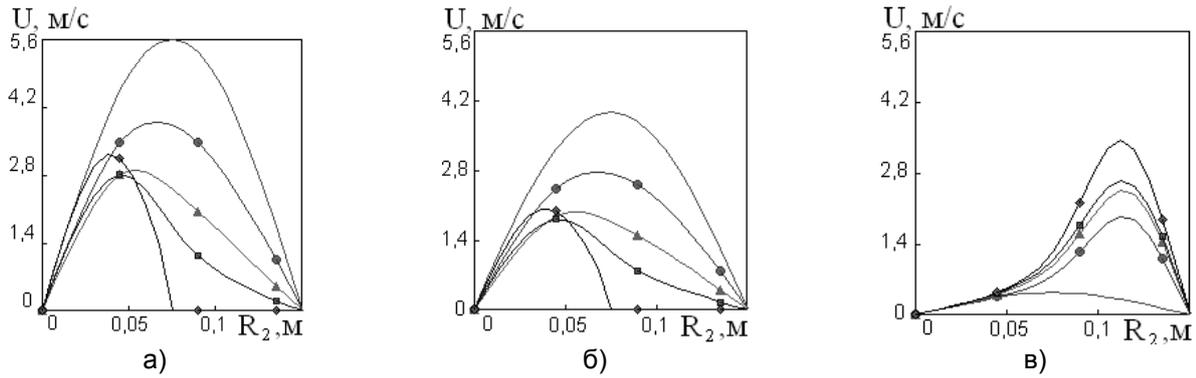


Рис.4. Зависимости трансверсальной составляющей скорости частиц дисперсной фазы от радиуса и ширины канала: а) $z=9L/20$; б) $z=L/4$; в) $z=L/20$; (— $-\theta=0^\circ$; ● $-\theta=34^\circ$; ▲ $-\theta=45^\circ$; ■ $-\theta=56^\circ$; ◆ $-\theta=90^\circ$; $u_{cp}=2\text{ м/с}$; $K_0=2$; $L=0,8\text{ м}$; $b=0,1\text{ м}$; $\alpha=30^\circ$; $a=0,002\text{ м}$)

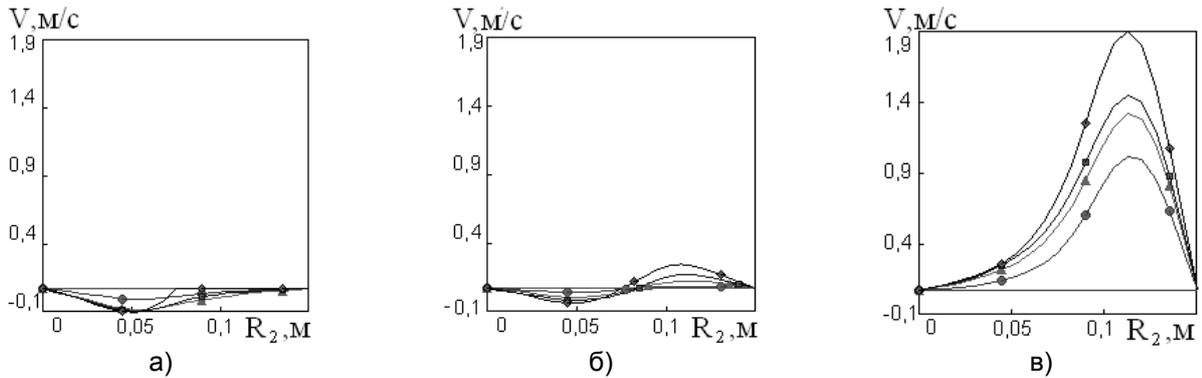


Рис.5. Зависимости радиальной составляющей скорости частиц дисперсной фазы от радиуса и ширины канала: а) $z=9L/20$; б) $z=L/4$; в) $z=L/20$; (— $-\theta=0^\circ$; ● $-\theta=34^\circ$; ▲ $-\theta=45^\circ$; ■ $-\theta=56^\circ$; ◆ $-\theta=90^\circ$; $u_{cp}=2\text{ м/с}$; $K_0=2$; $L=0,8\text{ м}$; $b=0,1\text{ м}$; $\alpha=30^\circ$; $a=0,002\text{ м}$)

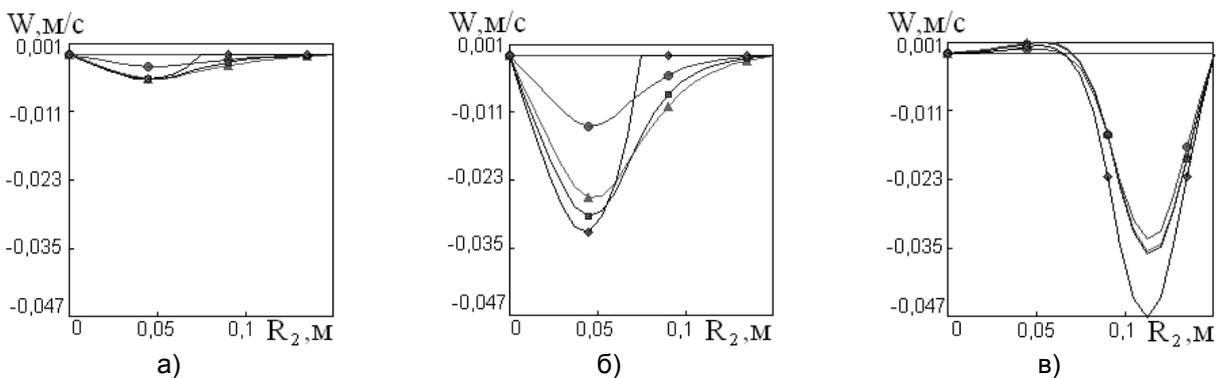


Рис.6. Зависимости z-составляющей скорости частиц дисперсной фазы от радиуса и ширины канала: а) $z=9L/20$; б) $z=L/4$; в) $z=L/20$; (— $-\theta=0^\circ$; ● $-\theta=34^\circ$; ▲ $-\theta=45^\circ$; ■ $-\theta=56^\circ$; ◆ $-\theta=90^\circ$; $u_{cp}=2\text{ м/с}$; $K_0=2$; $L=0,8\text{ м}$; $b=0,1\text{ м}$; $\alpha=30^\circ$; $a=0,002\text{ м}$)

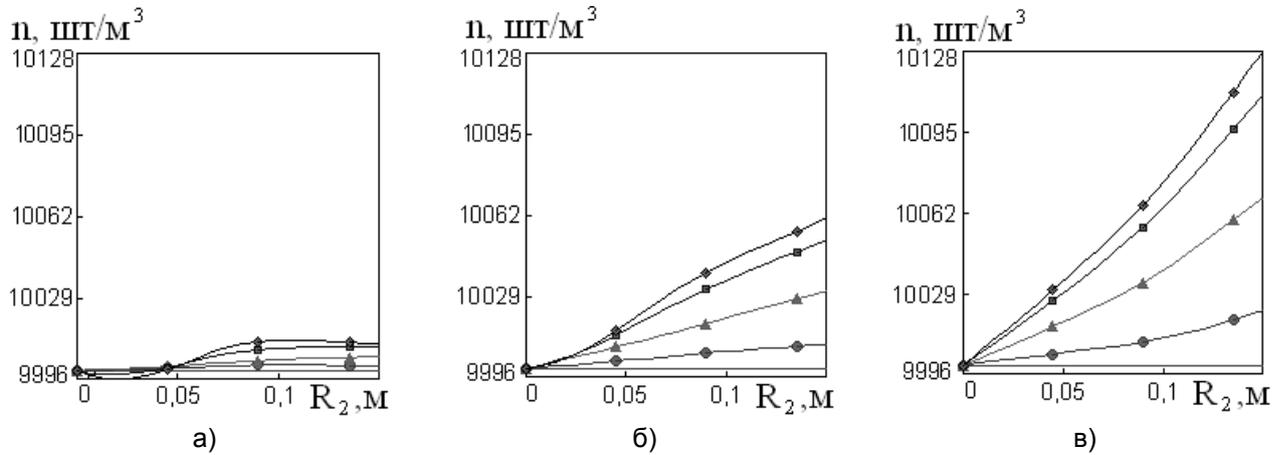


Рис.7. Распределения концентрации дисперсных частиц: а) $z=9L/20$; б) $z=L/4$; в) $z=L/20$;
(— $\theta=0^\circ$; ● $\theta=34^\circ$; ▲ $\theta=45^\circ$; ■ $\theta=56^\circ$; ◆ $\theta=90^\circ$;
 $u_{cp}=2\text{м/с}$; $K_0=2$; $L=0,8\text{м}$; $b=0,1\text{м}$; $\alpha=30^\circ$; $a=0,002\text{м}$)

Получены значения составляющих скорости дисперсных частиц (рис.3-7) подтверждают их перераспределение в рабочем канале к перегородке, П-образный отвод и отбор пылеулавливающим устройством.

Установлено, что благодаря действию криволинейной поверхности перегородки и расходу воздуха через пылеулавливающее устройство, наблюдается перераспределение дисперсных частиц в рабочей зоне: с приближением до рукавов концентрация дисперсных частиц увеличивается на 0,5-1%. Полученный диапазон изменения z -составляющей скорости (-0,047)-0,001м/с свидетельствует о несущественном перемещении дисперсных частиц относительно оси z .

Анализом результатов математического моделирования установлены: средняя скорость воздушного потока на входе $u_{cp}=2,0-2,2\text{м/с}$, ши-

рина щели $b=0,1\text{м}$, угол открытия дополнительного клапана $\alpha=30^\circ-32^\circ$, при которых обеспечивается наибольшая эффективность очистки воздушного потока разработанным пылеулавливающим устройством $\eta_v=30-35\%$. Исследованиями установлено, что сепарационная эффективность разработанной пылесадочной камеры превышает на 30-35% эффективность серийной и составляет $\eta_0=90-91\%$.

Выводы В результате проведенных исследований выявлена реальная возможность моделирования динамики двухфазных потоков в пылесадочных камерах зерновых сепараторов. Результатом моделирования стала интенсификация процесса очистки воздушного потока пылесадочными камерами путем промежуточного отбора частиц дисперсной фазы и их последующего отвода к выгрузному устройству.

4. Картушинский О.І. Газодинамічні основи розрахунку полідисперсних двофазових потоків у технічних пристроях: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 01.02.05/ Нац. техн. ун-т України "Київський політехнічний інститут". - Київ, 2001.- 34с.

5. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. - М.: Наука, 1978. - 336с.

6. Седов Л.И. Механика сплошной среды. - М.: Наука, 1976. - Т.1. - 536с.

7. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. - М.: Мир, 1971. - 536с.

8. Тищенко Л.Н., Харченко С.А. К исследованию процесса очистки воздушного потока в модернизированной пылесадочной камере

Література

1. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков В.И., Решидов И.К. Очистка промышленных газов от пыли. - М.: Химия, 1981. - 392с.

2. Степанов Г.Ю., Зицер И.М. Инерционные воздухоочистители. - М.: Машиностроение, 1986. - 184с.

3. Пиловловлювач: Д.п. 69726 А Україна, МКИ В01 D45/04/ Л.М.Тищенко, С.О.Харченко, М.Г.Пастушенко, В.Г.Породін (Україна). - 20031110655; Заявл. 25.11.2003; Опубл. 15.09.2004, Бюл.№9. - 4с.

виброцентробежных зерновых сепараторов // Вибрации в технике и технологиях. -2004. - №4(36). - С. 60 - 70.

9. Прагер В. Введение в механику сплошных сред. - М.: ИЛ, 1963. - 311с.

10. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1978. - 727с.

11. Тищенко Л.Н., Харченко С.А. Исследование динамики воздушного потока в модернизированной пылеосадочной камере виброцентробежных зерновых сепараторов // Вибрации в технике и технологиях. - 2005. - №1(43). - С. 126 - 137.

Анотація

Використання гідродинамічної аналогії з використанням рівнянь Нав'є-Стокса для розв'язку задач очищення повітряного потоку у пилоосаджувальних камерах зерноочисних сепараторів

Тищенко Л.М., Харченко С.О., Харченко Ф.М.

Розглянуті можливості використання рівнянь Нав'є-Стокса для моделювання динаміки двофазних потоків у пилоосаджувальних камерах зернових сепараторів.

Ключові слова: засоренність, очистка, воздух, поток, скорость, частица, гидродинамика, разделение, канал.

Abstract

Use of hydrodynamic analogy applying Navier-Stokes' equations to solve problems of airflow cleaning in dust setting chambers of seed separators

L.Tischenko, S.Kharchenko, F.Kharchenko

To model the dynamics of two-phase air flows in dust setting chambers of seed separators peculiar properties of application of Navier-Stokes' equations have been considered in the article.

Keywords: debris, cleaning, air flow rate, particle, fluid dynamics, separation channel.

Представлено: Н.В.Бакум / Presented by: N.Bakum

Рецензент: А.В.Богомолов / Reviewer: A.Bogomolov

Подано до редакції / Received: 7.09.2013