

УДК 512.312

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СЕПАРИРОВАНИЯ СЫПУЧЕЙ СМЕСИ В ПНЕВМОСЕПАРАТОРЕ

Равшанов Н.

д.т.н. заведующий лабораторией

Научно-инновационного центра информационно-коммуникационной технологий,
тел.: 262-71-62, e-mail: ravshanzade-09@mail.ru

Палванов Б.Ю.

старший научный сотрудник-соискатель

Научно-инновационного центра информационно-коммуникационной технологий,
тел.: +(99894) 607-67-80, e-mail: bozorboy@yandex.ru

Приводятся математическая модель на основе законов механики в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений и программное средство для исследования процесса сепарирования сыпучей смеси в пневмосепараторе. Математическая модель решена численными способами с использованием конечно-разностного метода. Разработанная модель позволяет определять скорость движения и траекторию полета частиц с учетом направления воздушного потока. Численные эксперименты показали, что для сортировки сыпучих смесей на отдельные сорта частиц направление подачи воздушного потока играет важную роль. Результаты приведенных вычислительных экспериментов представлены в виде графиков.

Ключевые слова: математическая модель, численный метод, сепарирование, сыпучая смесь, технологический процесс, вычислительный эксперимент.

MATHEMATIC MODELING AND NUMERICAL EXPERIMENT FOR THE RESEARCHERS PROCESS OF SEPARATION GRANULAR MIXTURES IN A PNEUMATIC SEPARATOR

Ravshanov N., Palvanov B.Yu.

The paper presents a mathematical model based on the laws of mechanics in the form of systems of ordinary differential equations and a software tool for investigating the process of separation of a loose mixture in a pneumatic separator. The mathematical model is solved by numerical methods using the finite-difference method. The developed model allows to determine the speed of movement and the trajectory of the flight of particles subject to the direction of the air flow. Numerical experiments have shown that for the sorting of loose mixtures into individual types of particles, the direction of air flow is important. The results of the above computational experiment are presented in the form of graphs.

Keywords: mathematical model, numerical method, separation, bulk mixture, process technology, computational experiment.

SOCHILUVCHAN ARALASHMALARNI PNEVMASEPARATORLARDA TOZALASH JARAYONLARINI TADQIQ ETISH UCHUN MATEMATIK MODEL VA SONLI TAJRIBALAR

Ravshanov N., Palvanov B.Yu.

Ishda sochiluvchan aralashmalarni pnevmaseparatorlarda tozalash jarayonlarini tadqiq etish uchun mexanikaning asosiy qonunlariga asoslangan oddiy differentsial tenglamalar tizimi ko'rinishidagi yaratilgan matematik model va dasturiy vasitalar keltirilgan. Yaratilgan matematik model sonli usulda ya'ni chekli-ayirmali usulni qo'llash orqali yechimi olingan. Yaratilgan matematik model havo oqimi yo'nalishini hisobga olgan holda, zarra harakati trayektoriyasi va tezliklarini aniqlash imkonini beradi. O'tkazilgan sonli tajribalar shuni ko'rsatadiki aralashmalarni turli navlarga ajratish jarayoniga havo oqimi yo'nalishi kata ta'sir ko'rsatadi. Yaratilgan matematik ta'minot yordamida EHMda sonli tajribalar o'tkazilgan hamda ularning natijalari grafik shaklda keltirilgan.

Tayanch iboralar: Matematik model, sonli usul, separatsiyalash, sochiluvchan aralashma, texnologik jarayon, hisoblash experimenti.

1. Введение

Одним из приоритетных направлений развития Республики Узбекистан является создание новых и совершенствование существующих техники, оборудования и технологий, используемых для приготовления, сортирования, сепарирования и переработки сельскохозяйственного сырья, продуктов общего назначения, горюче-смазочных материалов и т.д. Основным фактором в технологических процессах указанных областей является снижение себестоимости выходного продукта и сырья и повышение его качества.

Процессы разделения сложных смесей на отдельные компоненты или фазы являются неотъемлемой частью многочисленных отраслей производства. Например, процесс сепарирования, сортирования зерновых смесей и других сыпучих продуктов, а также жидких растворов как один из основных этапов технологического процесса (ТП) широко применяется на предприятиях мукомольной, масложировой, фармацевтической и горно-обогатительной отраслей промышленности.

Сортировка семян хлопчатника и их продуктов обрушивания, семян различных сельскохозяйственных культур, очистка хлопка-сырца и его волокна, обогащение полезных ископаемых, производство редких элементов (золота, вольфрама, урана, серебра, платины и др.) и многие другие могут служить примером использования технологии сепарирования и фильтрования.

Эти процессы отличаются друг от друга не только разделяемыми фазовыми или компонентными составами, но и способами и технологическим оборудованием, которые используются для достижения цели. Желаемый результат может быть достигнут с использованием как одного этапа, так и многоэтапного процесса. В зависимости от реологии составляющих смеси может быть использованы различные внешние воздействия на смеси как механические воздействия, электромагнитные поля, сила гравитации и др.

Совершенствование существующих и разработка новых эффективных способов и устройств сепарирования и фильтрования сложных смесей с учетом результатов натурного эксперимента требует солидных капиталовложений, что не всегда осуществимо. В связи с этим целесообразно обратиться к методам математического моделирования и возможностям современных информационных технологий. Для этого требуется тщательный анализ используемых технологических процессов и относящихся к ним математических моделей.

Разработка достоверной математической модели и использование эффективных численных методов решения практических задач зачастую позволяют не только анализировать технологический процесс, но и успешно управлять им, более того, предложить новый, эффективный способ организации технологического процесса и определить его оптимальные параметры функционирования.

Проведенные комплексные исследования по процессу сепарирования и разделения трудноразделяемых сыпучих смесей показали, что перспективным является переход на высокоэффективное сепарирующее оборудование, у которого выделение частиц через сепарирующую поверхность происходит под действием центробежных сил, намного превосходящих силы тяжести. Поэтому всестороннее теоретическое и экспериментальное исследование сепараторов, процесса сепарирования, разработка новых, эффективных конструкций сепараторов является актуальной задачей. Исследованием процессов сепарирования занимаются многие отечественные и зарубежные ученые.

В частности, авторами статьи [1] разработан экспериментальный зерноуборочный комбайн для изучения распределения зерна и эффективности очистки очистного устройства на фракционном сите с подачей воздушного потока по горизонтали сита. Сортировка зерна вдоль сита разделена на три секции. Авторы считают, что при увеличении частоты вибрации и скорости подачи смеси эффективность очистки снижается. Потери сырья при очистке увеличиваются при одновременном увеличении частоты колебания сита, скорости подачи сыпучей смеси и воздушного потока.

В работе [2] приведен способ улучшения процесса разделения сыпучей смеси на пневмосепараторе с использованием электрического поля коронного разряда в качестве дополнительного рабочего тела. Электрическое поле оказывает дополнительное силовое воздействие на частицы отделенной смеси. Авторы считают, что семена культурных растений и сорняков относятся к разным видам, их электрические свойства по-разному взаимодействуют с рабочими органами пневматических сепараторов, что позволяет улучшить качество разделения семян. Также авторами разработана математическая модель в виде дифференциальных уравнений для определения траектории движения частиц на пневмоэлектрическом канале.

Статья [3] посвящена разработке математической модели движения частиц рушанки семян подсолнечника по наклонной рабочей поверхности при угле ее наклона больше угла трения.

Авторами [4] исследован процесс сортирования зернового вороха на коническом сепараторе для различных культур. Получены зависимости качественной характеристики работы конического сепаратора – полноты разделения и потерь основной культуры. Выявлены рациональные режимы работы конического сепаратора.

В работе [5] теоретически рассмотрено движение частиц внутри винтового пневмосепаратора. На начальной стадии рассматривается вспомогательная модель: движение частицы по конической поверхности с данным углом полураствора под действием аксиального потока воздуха. В этом случае нормаль к поверхности конуса имеет две компоненты: радиальную и вертикальную. Разработанная модель позволяет найти закон

движения частицы по конической поверхности. Чтобы получить винтовую поверхность, модель была усложнена. А именно: к компонентам нормали поверхности была добавлена аксиальная третья компонента. Тогда созданная нормаль будет описывать винтовую поверхность. В качестве рабочей поверхности пневмосепаратора выбрана винтовая поверхность с определенным углом раствора и аксиальным углом наклона. Движение частиц происходит только по рабочей поверхности. Зная закон движения для одной частицы, можно определить траектории и для системы невзаимодействующих частиц. Таким образом, в первом приближении для невзаимодействующих частиц определена концентрация частиц на винтовой поверхности как в радиальном направлении, так и в вертикальной плоскости.

Конструкция пневматического сепаратора для сортировки и очистки семян овощных культур приведена в статье [6]. Также авторами приведены результаты испытаний пневмосепаратора на семенах свеклы столовой.

В [7] приведен общий подход построения математической модели процесса фракционной очистки зерна в зерноочистительном агрегате с различными структурными схемами, синтезированы их рациональные параметры и функциональные показатели.

В работе [8] изучается пневматический сепаратор зерна с наклонным воздушным потоком. Рассматриваются варианты компоновки зерноочистительных машин, а также предлагаемая конструкция.

Статья [9] посвящена исследованию процесса движения частицы в воздушном потоке наклонного канала. Получены математические зависимости, описывающие процесс движения частицы в наклонном канале, а также зависимость траектории ее полета от технологических и конструктивных параметров канала.

В работе [10] приводится математическая модель движения частицы в криволинейном пневмотранспортирующем канале (ПТК). Модель учитывает силу тяжести частицы и силу реакции воздушного потока, действующую на частицу в воздушном потоке, а также неравномерность распределения скорости воздушного потока по сечению криволинейного ПТК. Рассматривается криволинейный канал, образованный двумя цилиндрическими поверхностями. При смещении центра внутренней стенки от центра внешней получается криволинейный канал переменной глубины. Для исследования модели использовался свободный пакет программ компьютерной математики SciLab 5.5.1. С помощью численных методов получены траектории движения частиц в ПТК в зависимости от их скорости витания. Изучение полученных траекторий позволило определить конструктивно-технологические параметры ПТК для обеспечения требуемых показателей работы.

2. Постановка задачи

Сепарирование с помощью воздушного потока обеспечивает разделение и отбор биологически наиболее полноценных семян. Доведение до высоких степеней разделения семян от биологически неполноценных и от инородных примесей связано с определением жестких границ скоростей потока воздуха и углов подачи смеси в зависимости от размера и массы сепарируемых частиц.

Для вывода ММ процесса предположим, что на частицы действуют следующие силы: сила сопротивления F_c , сила тяжести $F_G = mg$, сила адгезии F_{ad} и подъемная сила F_p [11]. Расчетная схема приведена на рис. 1.

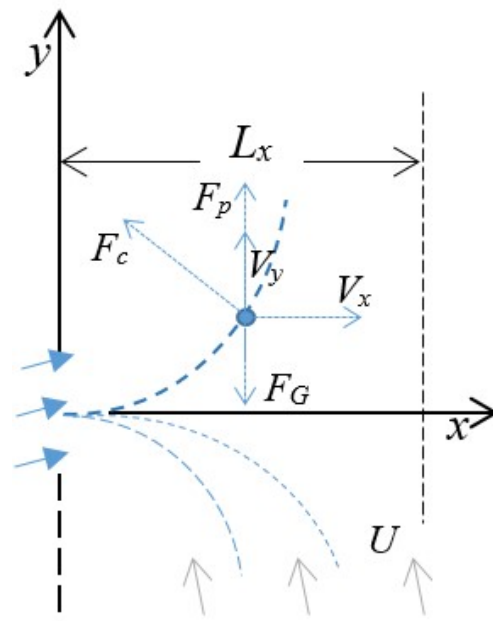


Рис. 1. Схема траектории полета и сил, действующих на частицы

Для построения математической модели процесса полета частиц в бункере сепарируемого агрегата воспользуемся законом сохранения баланса сил:

$$F = F_G + F_c + F_{ad} + F_p. \quad (1)$$

При обтекании частицы воздушным потоком возникает сила сопротивления (лобовая сила). Величина силы воздушного потока рассчитывается по формуле [12]:

$$F_c = -k_1 W \cdot |W|, \quad (2)$$

где $k_1 = 0,5 \cdot \rho_v C_D S$ - коэффициент пропорциональности, ρ_v - плотность воздуха, C_D - коэффициент сопротивления частиц, S - площадь проекции частицы на плоскости, нормальной направлению ее движения, $W = U - V$ - относительная скорость частиц (скорость витания), U - скорость подаваемого воздушного потока к бункеру сепаратора, V - скорость движения частиц.

Используя уравнения (1)-(2) и законы классической механики для определения траектории

движения частиц в пневмосепараторном канале под воздействием указанных выше сил, получаем математическую модель, описывающую движение одной частицы в виде системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dV_x}{dt} = g \cdot \cos(\beta) - k \cdot V_x |W|, \\ \frac{dV_y}{dt} = -g \cdot \sin(\beta) - k \cdot (V_y - U_1) |W|. \end{cases} \quad (3)$$

В отличие от работы [12], здесь учитывается угол β - направление воздушного потока относительно горизонта. Тогда скорость воздушного потока при угле β принимает вид

$$U_1 = U \cdot \sin \beta. \quad (3')$$

С учетом (3') и [12] получаем

$$|W| = \left[V_x^2 + (V_y - U_1)^2 \right]^{1/2},$$

и тогда система уравнений (3) принимает вид

$$\begin{cases} \frac{dV_x}{dt} = g_1 - k \cdot V_x \left[V_x^2 + (V_y - U_1)^2 \right]^{1/2}, \\ \frac{dV_y}{dt} = -g_2 - k \cdot (V_y - U) \left[V_x^2 + (V_y - U_1)^2 \right]^{1/2}, \end{cases} \quad (4)$$

$$g_1 = g \cdot \cos \beta, \quad g_2 = g \cdot \sin \beta,$$

$$V_x = V_0 \cos \alpha, \quad V_y = V_0 \sin \alpha, \quad \text{при } t = 0. \quad (5)$$

Здесь V_x, V_y - скорости движения частиц по горизонтали и вертикали; g - ускорение свободного падения; α - угол подачи сыпучей смеси относительно горизонта; β - угол подачи воздушного потока; V_0 - начальная скорость частиц, поступающих в пневмосепараторный канал,

$$k = \frac{k_1}{m}, \quad m = \frac{\rho_1 \cdot \pi \cdot d^3}{6},$$

ρ_1, d - плотность и диаметр частиц.

3. Метод решения

Поскольку аналитическое решение системы уравнений (4) с начальными условиями (5) получить затруднительно, задачу будем решать методом Рунге-Кутты. Для этого разобьем отрезок $[0, T]$ на n частей с шагом $\tau = T/n$, причем шаг τ должен быть достаточно малым, и построим систему равноотстоящих точек $t_i = i \cdot \tau$, $i = 0, 1, \dots, n$.

Сначала для простоты введем следующие обозначения:

$$V_x = V_x(t) = u(t) = u, \quad V_y = V_y(t) = v(t) = v,$$

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = F_1(t, u, v), \\ \frac{dv}{dt} = F_2(t, u, v), \end{cases}$$

$$u(0) = V_0 \cos \alpha, \quad v(0) = V_0 \sin \alpha.$$

Введем формулу Рунге-Кутты:

$$u_{i+1} = u_i + \tau \cdot (X_1 + 2X_2 + 2X_3 + X_4) / 6;$$

$$v_{i+1} = v_i + \tau \cdot (Y_1 + 2Y_2 + 2Y_3 + Y_4) / 6.$$

Здесь

$$X_1 = F_1(t_i, u_i, v_i); \quad Y_1 = F_2(t_i, u_i, v_i);$$

$$X_2 = F_1(t_i + \tau/2, u_i + \tau \cdot X_1/2, v_i + \tau \cdot Y_1/2);$$

$$Y_2 = F_2(t_i + \tau/2, u_i + \tau \cdot X_1/2, v_i + \tau \cdot Y_1/2);$$

$$X_3 = F_1(t_i + \tau/2, u_i + \tau \cdot X_2/2, v_i + \tau \cdot Y_2/2);$$

$$Y_3 = F_2(t_i + \tau/2, u_i + \tau \cdot X_2/2, v_i + \tau \cdot Y_2/2);$$

$$X_4 = F_1(t_i + \tau, u_i + \tau \cdot X_3, v_i + \tau \cdot Y_3);$$

$$Y_4 = F_2(t_i + \tau, u_i + \tau \cdot X_3, v_i + \tau \cdot Y_3).$$

Заметим, что шаг расчета можно менять при переходе от одной точки к другой. Для контроля правильности выбора шага τ рекомендуется вычитать дробь [13]:

$$\tau_1 = \left| \frac{X_2^{(i)} - X_3^{(i)}}{X_1^{(i)} - X_2^{(i)}} \right| \quad \text{или} \quad \tau_2 = \left| \frac{Y_2^{(i)} - Y_3^{(i)}}{Y_1^{(i)} - Y_2^{(i)}} \right|. \quad (7)$$

Величина τ_1, τ_2 не должна превышать нескольких сотых. В противном случае шаг τ следует уменьшить. Точность метода Рунге-Кутты оценивается как $O(\tau^4)$. Вообще же метод обладает значительной точностью и широко используется при решении обыкновенных дифференциальных уравнений.

4. Обсуждение результатов

Для определения основных параметров технологического процесса, в зависимости от режимов работы сепарирующего агрегата, физико-механических свойств сыпучей смеси и его характеристик, на основе разработанного математического обеспечения объекта исследования составлено программное средство для проведения вычислительных экспериментов на ЭВМ.

Результаты проведенного численного расчета показаны на рис. 2-17.

Из анализа проведенных расчетов на ЭВМ (рис.2) видно, что при скорости подачи воздушного потока $U = 3 \text{ м/с}$ частицы диаметром меньше $d = 0,55 \text{ мм}$ поднимаются вверх за счет малых значений плотности сепарируемых частиц. Проведенным ВЭ установлено, что траектория полета частиц зависит не только от диаметра частиц, но и также от плотности сепарируемых сыпучих смесей.

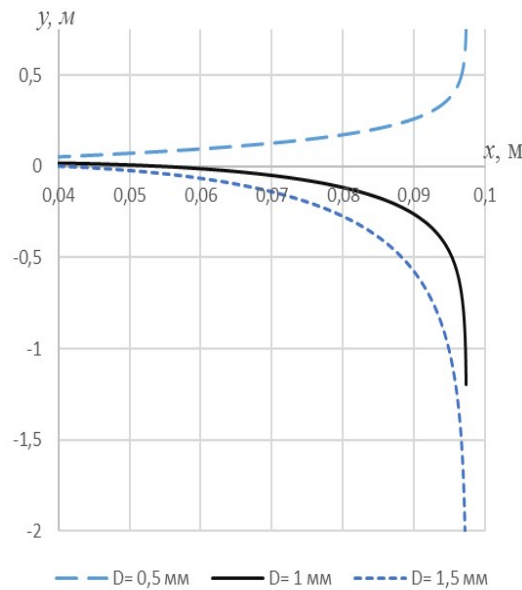


Рис. 2. Траектория движения частиц при различных плотностях ($\text{кг}/\text{м}^3$) частиц

Анализ численных расчетов показал, что при определенных значениях скорости подачи воздуха диаметр частиц сильно не влияет на горизонтальную скорость их перемещения. Как видно из проведенных численных расчетов, снижение горизонтальной скорости перемещения крупных частиц происходит медленнее, чем мелких частиц

(рис. 3). Было установлено, что это связано с силой инерции, действующей на частицы сыпучих смесей в начальном этапе процесса сепарирования (при $t=1-1,5$ с). При увеличении диаметра частиц более $0,5$ мм скорости их движения увеличиваются, а вектор скорости меняет направление (рис. 4).

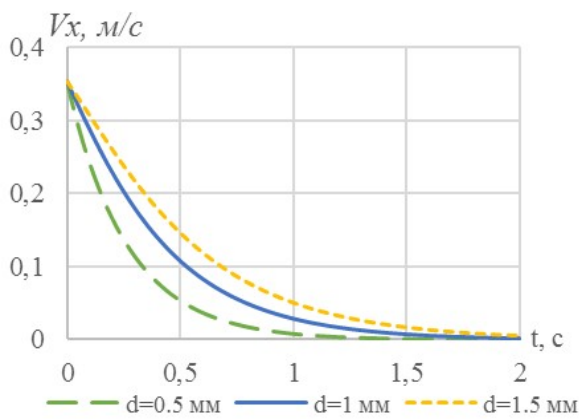


Рис. 3. Скорость движения частиц по горизонтали при различных плотностях ($\text{кг}/\text{м}^3$) частиц в зависимости от времени

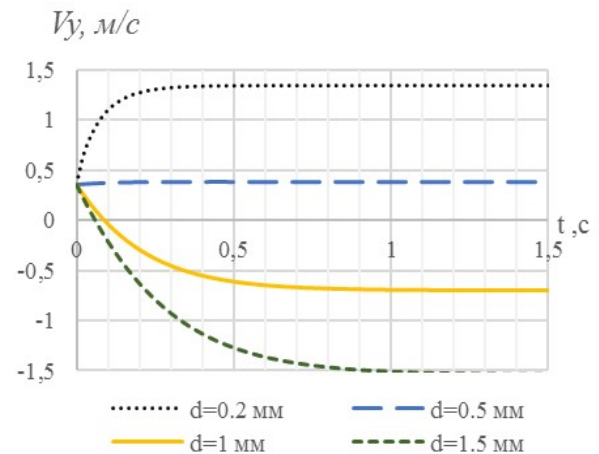


Рис. 4. Скорость движения частиц по вертикали при различных плотностях частиц в зависимости от времени

Одни из основных показателей для сортирования различных сельскохозяйственных семян - это их плотности и массы. Сортирование на основе выше указанных параметров занимает основное место при отборе полноценных семян различных культур. Результаты численных расчетов, проведенных при различных значениях плотности частиц, представлены на рис. 5-7. Из кривых на рис. 5 видно, что при скорости 5 м/с воздушного потока частица диаметром $2,5$ мм и плотности меньше 310 $\text{кг}/\text{м.куб.}$

перемещается вверх. Траектория полета частиц, кроме этих параметров, зависит от формы частиц. Численные расчеты показывают, что чем меньше плотность частиц, тем быстрее уменьшается их горизонтальная скорость (рис. 6). При увеличении плотности частиц их скорость по вертикали резко возрастает. Особенно это заметно при начальном этапе процесса сепарирования (когда $t=1-1,5$ с) (рис. 7).

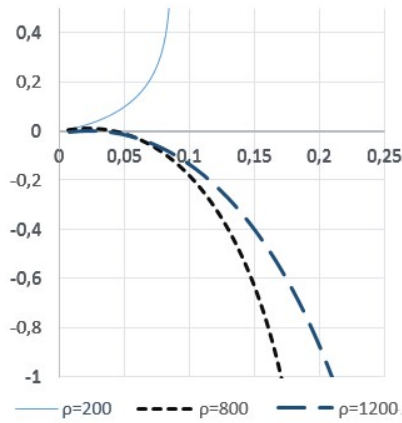


Рис. 5. Траектория движения частиц при различных плотностях ($\text{кг}/\text{м}^3$) частиц

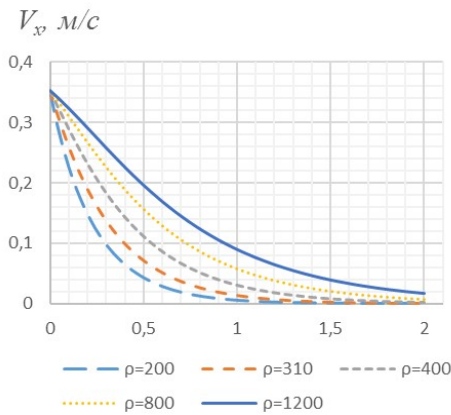


Рис. 6. Скорость движения частиц по горизонтали при различных плотностях ($\text{кг}/\text{м}^3$) частиц в зависимости от времени

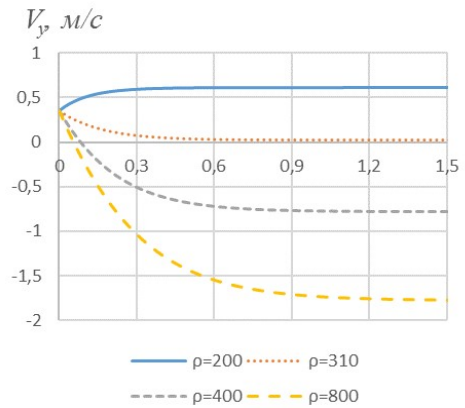


Рис. 7. Скорость движения частиц по вертикали при различных плотностях частиц в зависимости от времени

Также численные эксперименты проводились при различных значениях коэффициента аэродинамики частиц (рис. 8-10). При увеличении аэродинамических коэффициентов частиц их скорость по горизонтали уменьшается за счет увеличения сопротивления воздуха (рис. 8). При увеличении коэффициента аэродинамики частиц их скорость по вертикали также уменьшается за счет увеличения подъёмной силы. Например, скорость частиц по вертикали при $CD=0,44$ (шарообразная форма) больше, чем у частиц при $CD=0,94$ (кубообразная форма) (рис. 9). Согласно рис.10,

значение коэффициента аэродинамики не сильно влияет на траекторию полета частиц в начальных стадиях загрузки частиц смеси в бункер сепаратора. При увеличении начальной скорости подачи сыпучей смеси траектория полета частиц также увеличивается по горизонтали (рис. 11). Скорость перемещения частиц по горизонтали зависит от начальной скорости подачи сыпучей смеси к бункеру сепаратора (рис. 12). Начальная скорость подачи сыпучей смеси к бункеру сепаратора при положительном угле на вертикальную скорость перемещения частиц не влияет (рис. 13).

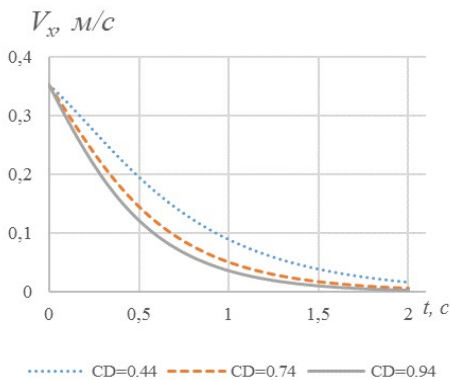


Рис. 8. Горизонтальная скорость частиц в зависимости от времени при различных значениях коэффициента аэродинамики частиц

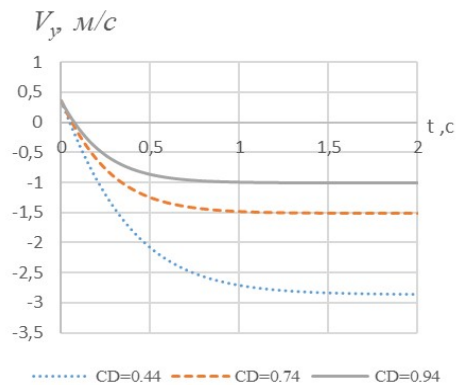


Рис. 9. Вертикальная скорость частиц в зависимости от времени при различных значениях коэффициента аэродинамики частиц

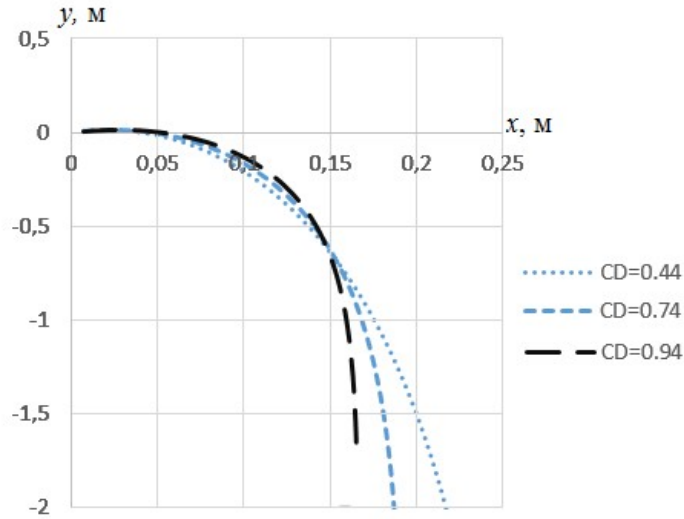


Рис. 10. Траектория полета частиц при различных значениях коэффициента аэродинамики

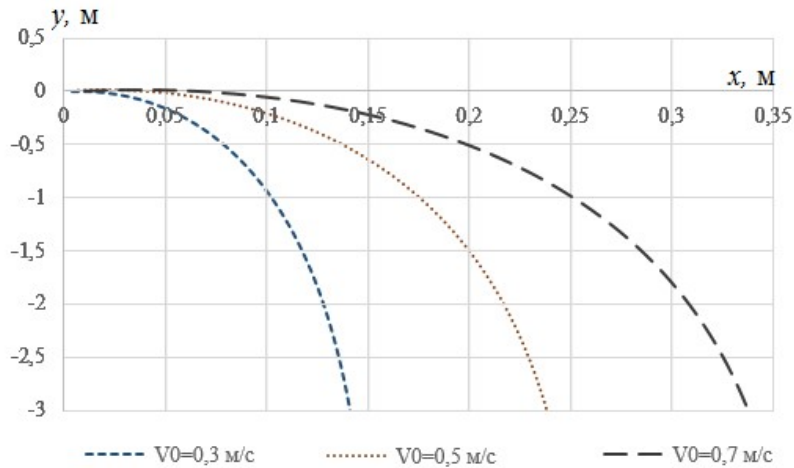


Рис. 11. Траектория движения частиц при различной начальной скорости частиц

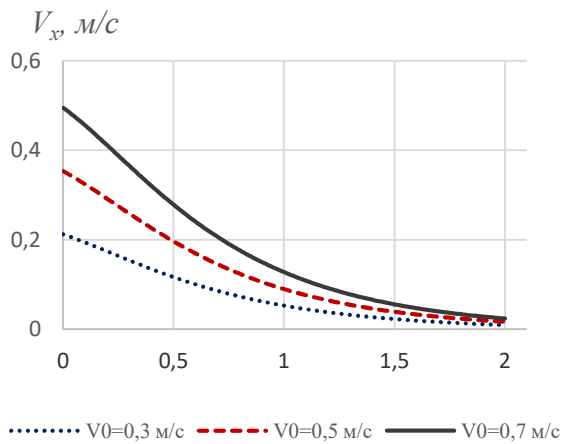


Рис. 12. Горизонтальная скорость движения частиц при различной начальной скорости частиц

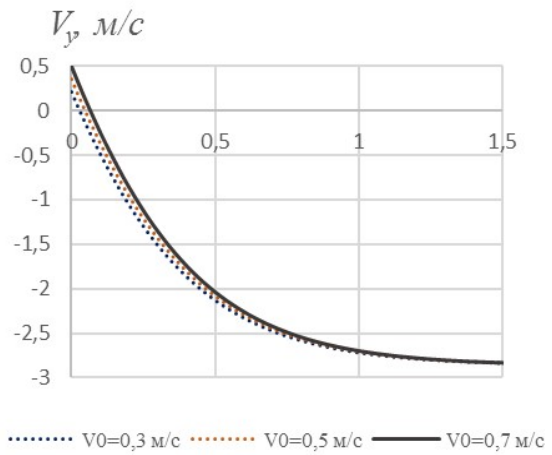


Рис. 13. Вертикальная скорость движения частиц при различной начальной скорости частиц

Проведенные численные эксперименты на ЭВМ показывают, что при диаметре частиц $d=2,5$ мм критическая скорость перемещения частиц изменяется в диапазоне от 5 до 5,5 м/с (рис. 14). При увеличении скорости воздушного потока более чем 6 м/с, эти частицы попадут в зону относительного

уменьшения скорости воздушного потока менее 5 м/с они попадут в зону целевого продукта.

Анализ численных расчетов показывает, что скорость воздушного потока не сильно влияет на скорости движения частиц по горизонтали (рис. 15). Однако скорости движения частиц по горизонтали

зависят от угла и начальной скорости подачи сыпучих смесей. Численные эксперименты показали, что при увеличении скорости подачи воздушного потока более 6 м/с вертикальная скорость

перемещения частиц (при $d = 2,5$ мм) будет расти в положительном направлении вверх, а при менее 5 м/с скорости частиц будут отрицательно направлены вниз (рис. 16).

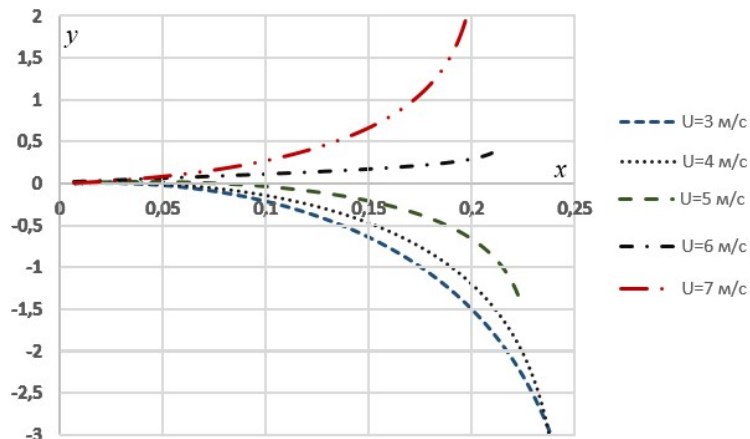


Рис. 14. Влияние скорости воздушного потока в пневмосепараторном канале на траектории движения частиц при диаметре частицы $d = 2,5$ мм

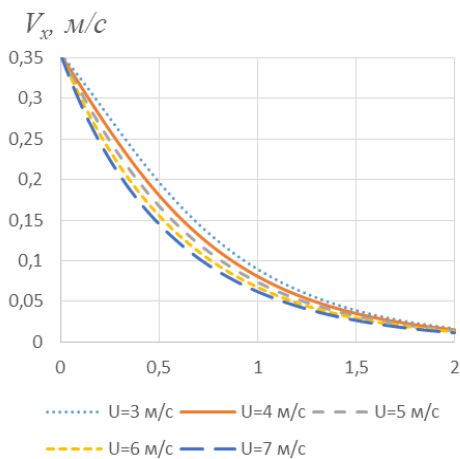


Рис. 15. Влияние скорости воздушного потока на горизонтальную скорость частиц

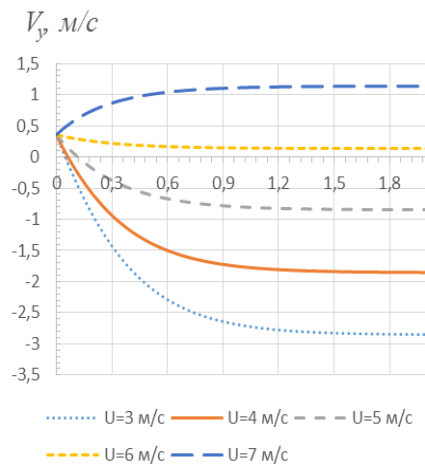


Рис. 16. Влияние скорости воздушного потока на вертикальную скорость частиц

Как показал анализ численных расчетов при сортировке сыпучих смесей, особенно зерновых культур, в пневмосепараторном агрегате направление воздушного потока играет существенную роль. Численные эксперименты

показывают, что при подаче угла воздушного потока более 92° относительно горизонта сыпучие смеси рассеиваются наилучшим образом (рис. 17).

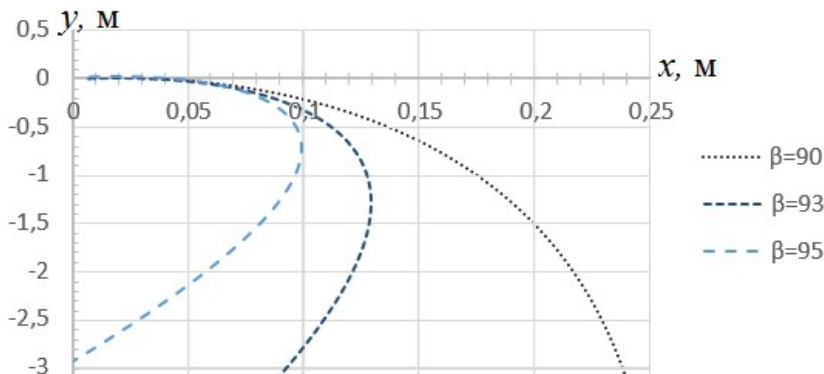


Рис. 17. Траектория движения частиц при различных значениях подачи угла (в градусах) воздушного потока относительно горизонта

5. Заключение

По проведённому и представленному в настоящей работе исследованию сделаем следующие выводы:

- разработанные математическая модель, метод решения и программное средство решения задачи можно использовать как математическое обеспечение для определения основных параметров воздушных сепараторов и их диапазонов изменения при процессе сепарирования сыпучей смеси и зерновых культур, а также при исследовании процесса в целом;

- при различных значениях угла подачи воздушного потока установлено, что он играет существенную роль при процессе сепарирования и сортирования сыпучих масс, с ростом угла подачи

воздушного потока происходит наилучшее рассеивание траектории полета частиц;

- проведены вычислительные эксперименты при различных значениях параметров пневмосепаратора и свойств сыпучей смеси для определения критической скорости движения и траектории полета частиц в пневмосепараторном канале;

- анализ численных расчетов показывает, что эффективное рассеивание сыпучей смеси на пневмосепараторе зависит от скорости и направления воздушного потока;

- анализ численных расчетов показывает, что для диаметра частиц в 2,5 мм и плотности 1200 кг/м.куб. при скорости 5,5-6 м/с подачи воздушного потока скорость движения частиц будет критической или можно говорить, что частицы в пневмосепараторном канале будут находиться в взвешенном состоянии.

Литература

- [1] *Simonyan K.J., Yiljep Y.D.* Investigating Grain Separation and Cleaning Efficiency Distribution of a Conventional Stationary Rasp-bar Sorghum Thresher // *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal Manuscript* PM 07 028. - Vol. X. - August, 2008.
- [2] *Kovalyshyn S., Dadak V.* Theoretical studies of the ellipsoidal-shaped particles' behaviour in the channel of pneumo-electric separator bumping into its walls // *ECONTECHMOD: AN INTERNATIONAL QUARTERLY JOURNAL*. – 2016. – Vol. 5, № 3. – Pp. 147-152.
- [3] *Деревенко В.В., Глуценко Г.А.* Закономерности однонаправленного движения потока воздуха и частиц рушанки по рабочей поверхности пневмосепаратора // *Известия вузов. Пищевая технология*. – 2009. – № 5-6. – С. 92-93.
- [4] *Черняков А.В., Коваль В.С., Сухов А.В., Павлюченко К.В.* Исследование процесса сортирования зернового вороха на коническом сепараторе на различных культурах // *Омский научный вестник*. – 2013. – № 3 (123). – С. 108-112.
- [5] *Матвеев А.И., Лебедев И.Ф., Никифорова Л.В., Яковлев Б.В.* Моделирование движения частиц в винтовом пневмосепараторе // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – Москва: Горная книга, 2014. – № 10. – С. 172-178.
- [6] *Павлов Л.В., Ахраменко В.А.* Пневматический сепаратор и результаты сортировки семян свеклы столовой с его применением // *Научно-практический журнал «Овощи России»*. – 2013. – № 2 (19). – С. 73-74.
- [7] *Ермольев Ю.И., Кочкин М.Ю., Лукинов Г.И., Бутовченко А.В.* Моделирование процесса фракционной очистки зерна в зерноочистительном агрегате // *Вестник ДГТУ. Технические науки*. - 2010. - Т. 10, № 3(46).
- [8] *Павлюченко К.В.* Экспериментальное исследование пневматического сепаратора зерна с наклонным воздушным потоком // *Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ*. – 2016. – № 3(6). - URL <http://e-journal.omgau.ru/index.php/2016-god/5/29-statya-2016-2/375-00125>. - ISSN 2413-4066.
- [9] *Павлюченко К.В.* Теоретическое исследование движения частицы в наклонном воздушном канале // *Омский научный вестник*. – 2015. – № 3 (143). – С. 177-181.
- [10] *Саитов В.Е., Суворов А.Н.* Математическая модель движения частицы в криволинейном пневмотранспортирующем канале // *Пермский аграрный вестник «Агроинженерия»*. – 2015. – № 2 (10). – С. 55-60.
- [11] *Равшанов Н., Палванов Б.Ю., Исламов Ю.Н.* Компьютерная модель процесса сепарирования трудноразделяемых сыпучих смесей центробежным сепаратором // *Проблемы вычислительной и прикладной математики*. – Ташкент, 2015. – № 1(1). – С. 40-47.
- [12] *Семенов Е.В., Славянский А.А., Антипов С.Т.* Расчет эффективности процесса фракционирования сыпучей смеси в рабочем объеме пневмосепаратора // *Вестник ВГУИТ*. – 2015. – № 3. – С. 43-49.
- [13] *Копченова Н.В., Марон И.А.* Вычислительная математика в примерах и задачах: Учебное пособие. – 2009. – 368 с.