

УДК 519.6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СЕПАРИРОВАНИЕ СЫПУЧИХ СМЕСИ НА ОСНОВЕ ПОДДУВАВ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Равшанов Н. К., Палванов Б. Ю.

ravshanzade-09@mail.ru

Научно-инновационный центр информационно-коммуникационных технологий, 100084, Узбекистан, Ташкент, Кичик халка йўли 2.

В статье для исследования технологического процесса сепарирования трудно-разделяемых сыпучих смесей, определения основных параметров и режима работы сепарирующего агрегата и их диапазонов изменения предложена математическая модель с учетом направления движения воздушного потока сыпучих смесей описывающий в виде систем нелинейных дифференциальных уравнений, на основе классического закона механики твердых тел и численный алгоритм для решения задачи на ЭВМ. Из за нелинейности математическая модель было решено численными способами с использованием модифицированной методами «прогноза и коррекции» с автоматическими выборами шага по времени. В работе также приведена устойчивости и сходимости метода «прогноза и коррекции» для решения поставленной задачи, для проведения вычислительного эксперимента на ЭВМ разработана программное средство и проведен численный эксперимент, результаты которого представлены в виде графиков.

Ключевые слова: ключевое слово, ключевое слово

Цитирование: *Равшанов Н. К., Палванов Б. Ю.* Численное моделирование технологического процесса сепарирование сыпучих смеси на основе поддував воздушного потока // Проблемы вычислительной и прикладной математики. — 2018. — № 4(16). — С. 46–60.

1 Введение

Одним из приоритетных направлений развития Республики, является создание нового и совершенствование существующей техники, оборудования и технологии используемых для приготовления, сортирования, сепарирования и переработка сельскохозяйственного сырья, продуктов общего назначения, горючей смазочных материалов и т.д.

Надо отметить, что процесс сепарирование, 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, фармацевтических, горно-обогачительных отраслей промышленности.

Основным фактором в вышеуказанных ТП является снижение себестоимости выходного продукта и сырья и повышение их качества.

Как выше указанной процессы разделения отдельных компонентов или фаз сложных смесей являются неотъемлемой частью многочисленных отраслей производства. Сортировка семян хлопчатника и их продуктов обрушивания, семян различных сельскохозяйственных культур, очистка хлопка-сырца и его волокна, обогащение полезных ископаемых, производства редких элементов (золота, вольфрама, урана, серебра, платины и других) 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 технологическими оборудованьями, которые используются для достижения цели. Желанный результат может быть достигнут как с использованием одного этапа, так и использованием многоэтапного процесса. В зависимости от реологии составляющих смеси могут быть использованы различные внешние воздействия на смеси, как механические воздействия, электромагнитные поля, сила гравитации и другие. Совершенствование существующих и разработка новых эффективных способов и устройств сепарирования и фильтрования сложных смесей, опираясь на результаты натурального эксперимента, требует солидных капиталовложений, но 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 им 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 оптимальных параметров 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 центробежных сепараторов, процесса сепарирования, разработка новых, эффективных конструкций сепараторов является актуальной задачей.

Проблемами теоретического и экспериментального исследования указанного выше процесса посвящены работы ряд ученых в частности в работе [1] обосновано применение цилиндрических решет с продолговатыми отверстиями для выделения мелких примесей из зернового вороха. Выдвинуто и подтверждено предположение об интенсификации сепарации путем применения решет с отверстиями, наклоненными под углом относительно вертикальной оси вращения решета.

В работе [2] 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. Требуется подобрать такие параметры ПТК, при которых канал обеспечивает перемещение всех выносимых из пневмосепарирующего канала частиц в воздухоочиститель и скорость воздушного потока на выходе из ПТК, достаточную для эффективной работы воздухоочистителя. 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.

В работе [3] исследовано процесса очистки масла и различные смазывающие жидкости в режущем аппарате многороторной мелиоративной косилки от частиц механических примесей с целью снижения скорости изнашивания зубьев шестерен и повышения надежности самого режущего аппарата. Проведены теоретические исследования по определению параметров конструкции. Для подтверждения теоретических исследований, связанных с определением параметров шестерни, в полости которой закреплена цилиндрическая вставка, были проведены лабораторные исследования процесса центробежной очистки масла. Также обоснована необходимость очистки масла в режущих аппаратах многороторных мелиоративных косилках от частиц механических примесей. Описана методика проведения исследований по очистке масла с помощью шестерни, в полости которой закреплена цилиндрическая вставка. Представлены результаты исследования процесса центробежной очистки масла. Получены графики, показывающие зависимость концентрации механических примесей в масле в процентах от конструктивных параметров шестерни, в полости которой закреплена цилиндрическая вставка.

В работе [4] представлено описание нового метода экстракции примесей путем кристаллизации в поле центробежных сил. Описан механизм формирования зоны при покрытии целевого продукта и водорастворимых примесей (сульфаты натрия и калия) кристаллического типа. Предложен математический метод процесса кристаллизации с расчетом поляризации центробежных сил, который позволяет в любой момент получать концентрацию твердой фазы (сульфаты натрия и калия) в любой осадочной центробежной зоне ротора.

Авторами в работе [5] были проведены численное и экспериментальное исследование нестационарного трехмерного турбулентного течения в модели лабиринтного золоуловителя, установлена адекватность математической модели процесса и определена эффективность улавливания частиц для разных конструкций и режимов работы лабиринтного золоуловителя.

В работе [6] представлена математическая модель газодинамического процесса сепарации мелкодисперсной пыли в центробежно-инерционном пылеуловителе методами вычислительного эксперимента. Математическое моделирование осуществляется в двумерной с учетом осевой симметрии методом крупных частиц. С помощью разработанной программы выполнены вычислительные эксперименты.

В работе [7] представлена математическая модель процесса абсорбции в аппарате с перекрестным взаимодействием фаз. Идентификация математической модели осуществлялась путем сопоставления расчетных и экспериментальных значений степени извлечения, полученных на примере абсорбции аммиака из газозооушной смеси водой.

В работе [8] проведены экспериментальные и теоретические исследования, направленные на увеличение эффективности и качественного улучшения характеристик оборудования для очистки промышленных выбросов. Для оценки фракционной эффективности газоочистки разработана математическая модель движения дисперсной фазы. Выполнен эксперимент по определению эффективности газоочистки. Авторы указывают что проведенный анализ показывает качественное совпадение полученных теоретических и экспериментальных результатов.

В статье [9] усовершенствованы универсальные математические модели обмолота / сепарации зерна и материалов, кроме зерен как в осевых, так и в касательных молотильных установках комбайнов. Математическая модель представлена аналитически в виде на основе физического процессов обмолота и разделения, которые опи-

связываются некоторыми стохастическими законами. Двух существующих модельные уравнения были объединены: одна содержит уравнения для обмолота и разделения зерна, другая для фрагментации и разделения. Затем модели были расширены до двумерных функций зерна и соответственно распределений МОГ, соответствующих любому из продольных сечений молотильного пространства. Проведенных экспериментов сравнивали с предсказанными и экспериментальными данными и удовлетворяет теорию определенность.

2 Постановка задачи

Сепарирование сыпучих смесей с учетом направления движения воздушного потока обеспечивает разделение и отбор биологически наиболее полноценных семян и увеличивается производительности агрегата. 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, массы и формы сепарируемых частиц.

Для вывода математической модели процесса предположим, что на частицы действуют следующие силы: сила сопротивления F_c , сила давления F_d , сила трения частиц с воздухом F_{tr} , сила тяжести $F_G = mg$, сила адгезии F_{ad} и подъемная сила F_p [?]. Расчетная схема ТП приведена на рисунке 1.

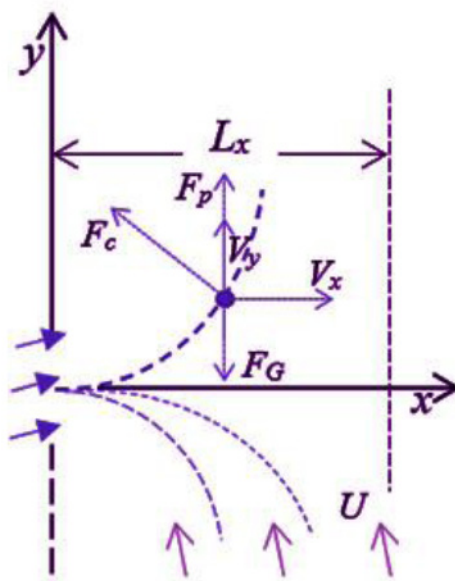


Рис. 1 Расчетная схема траектория полёта частиц в пневматическом сепараторе

Тогда равнодействующая сила F_R будет вычисляться с помощью формулой:

$$|\vec{F}_R| = |\vec{F}_c| + |\vec{F}_d| + |\vec{F}_{tr}| + |\vec{F}_G| + |\vec{F}_{ad}| + |\vec{F}_p|. \quad (1)$$

Величину силы воздушного потока можно рассчитать по формуле [10]:

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

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, нормальную направлению ее движения, $W = U - V$ – относительная скорости

частиц (скорость витания), U – скорость подаваемого воздушного потока к бункеру сепаратора, V – скорость движения частиц.

Сила адгезии согласно в работе [10–14] можно описать следующим образом:

$$F_{ad} = 2,4 \cdot 10^{-7} r$$

где r – радиус сферических частиц.

Неравномерная скорость обтекания частиц и вызванная циркуляция воздуха по контуру частицы в пневмоканале порождает эффект Магнуса и создает силу, действующую на частицу в перпендикулярном к направлению потока и называется силой Магнуса. Величина этой силы в соответствии с теорией Н.Е. Жуковского может быть выражена следующим образом:

$$F_p = \rho_2 J |U| \sin \beta$$

где ρ_2 – плотность воздуха, U – средняя скорость воздушного потока, β – угол подачи воздушного потока.

Циркуляция частиц вычисляется с помощью:

$$J = \frac{dU}{dy} S d.$$

Используя уравнения (1)–(2) и законы классической механики для определения траектории движения частиц в пневмоканале под воздействием выше указанных сил, получаем математическую модель, описывающую движение для 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 [10, 11], здесь учитывается угол β направление воздушного потока относительно горизонта и учета силы адгезии и циркуляция частиц. Тогда скорость воздушного потока при угле β можно записать

$$U_1 = U \cdot \sin \beta. \quad (4)$$

С учетом (4) и работе [10–13] получим

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

и тогда систему уравнение (3) можно записать в виде

$$\begin{cases} \frac{dV_x}{dt} = g_1 - k \cdot V_x [V_x^2 + (V_y - U_1)^2]^{1/2}, \\ \frac{dV_y}{dt} = -g_2 - k \cdot (V_y - U) [V_x^2 + (V_y - U_1)^2]^{1/2}, \end{cases} \quad (5)$$

где $g_1 = g \cdot \cos \beta$, $g_2 = g \cdot \sin \beta$, $k = \frac{k_1}{m}$, $m = \frac{\rho_1 \cdot \pi \cdot d^3}{6}$,

$$V_x = V_0 \cos \alpha, \quad V_y = V_0 \sin \alpha, \quad \text{при } t = 0. \quad (6)$$

где 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, ρ_1, d – плотность и диаметр частиц.

3 Метод решения

Поскольку систему уравнений (5) с начальными условиями (6) получить аналитическое решение затруднительно. Поэтому поставленную задачу будем решать численным методом. Для численного решения воспользуемся методом «прогноза и коррекции» [14, 15], который имеет преимущество перед другими классическими методами. Здесь объем вычислений и затраты машинного времени на реализацию задачи гораздо меньше, чем в других методах, и обеспечивается квадратичная сходимость итерационного процесса. Вычисление значений искомой переменной в начальный момент времени производится с помощью модифицированного метода Эйлера.

Сначала для простоты введем следующие обозначения:

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

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = F_1(t, u, v), \\ \frac{dv}{dt} = F_2(t, u, v), \end{cases} \quad (7)$$

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

Тогда уравнений (7) можно представить следующим виде:

$$u_1 = u_0 + \frac{\Delta t}{2} [F_1(u_0, v_0) + F_1(u_0 + \Delta t F_1(u_0, v_0), v_0 + \Delta t F_2(u_0, v_0))],$$

$$v_1 = v_0 + \frac{\Delta t}{2} [F_2(u_0, v_0) + F_2(u_0 + \Delta t F_1(u_0, v_0), v_0 + \Delta t F_2(u_0, v_0))].$$

Для дальнейшего уточнения значений искомой переменной используется метод «прогноза» и «коррекции», суть которого состоит в следующем:

Первом этапе значения переменных предварительно вычисляются с помощью

$$u_{p+1}^{(0)} = u_{p-1} + 2\Delta t F_1(u_p, v_p),$$

$$v_{p+1}^{(0)} = v_{p-1} + 2\Delta t F_2(u_p, v_p),$$

где $p = 1, 2, 3, \dots, P - 1$;

за тем поправка значений искомых переменных осуществляется с помощью выражений

$$u_{p+1}^{(S)} = u_p + \frac{\Delta t}{2} [F_1(u_p, v_p) + F_1(u_{p+1}^{(S-1)}, v_{p+1}^{(S-1)})];$$

$$v_{p+1}^{(S)} = v_p + \frac{\Delta t}{2} [F_2(u_p, v_p) + F_2(u_{p+1}^{(S-1)}, v_{p+1}^{(S-1)})],$$

где S – число итерации

ошибка метода «прогноза и коррекции» вычисляется с помощью выражения

$$E(U_{p+1}) = \frac{1}{2} (u_p^{(S)} - u_p^{(S-1)}), \quad u_{p+1}^{(S+1)} - u_{p+1}^{(S)} = \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial F}{\partial t} [u_{p+1}^{(S)} - u_{p-1}^{(S-1)}].$$

Итак, в результате совместного решения этих уравнений получаем тенденцию изменения искомых технологических переменных как по времени, так и по пространственной переменной.

Для определения ограничений ошибки метода прогноза переменные u , v разлагаем в окрестности точки $t = t_p$ в ряд Тейлора и получаем

$$u(t) = u_p + u'_p(t - t_p) + \frac{u''_p}{2}(t - t_p)^2 + \frac{1}{6}(t - t_p)^3 u''(\tau_1),$$

$$v(t) = v_p + v'_p(t - t_p) + \frac{v''_p}{2}(t - t_p)^2 + \frac{1}{6}(t - t_p)^3 v''(\tau_1),$$

где точка τ_1 лежит между t и t_p .

Аналогично полагая, что точка τ_2 расположена между t_{p-1} и t_p , получаем

$$u_{p-1} = u_p - \Delta t \cdot u'_p + \frac{\Delta t^2}{2} u''_p - \frac{\Delta t^3}{6} u''_p(\tau_2),$$

$$v_{p-1} = v_p - \Delta t v'_p + \frac{\Delta t^2}{2} v''_p - \frac{\Delta t^3}{6} v''_p(\tau_2),$$

Вычитая значение искомых переменных в точках $p + 1$, $p - 1$ и используя выражение

$$\frac{u''_p(\tau_1) - u''_p(\tau_2)}{2} = u''_p(\tau); \quad t_{p-1} \leq \tau \leq t_{p+1},$$

имеем

$$u_{p+1} = u_p + 2\Delta t \cdot u'_p + \frac{\Delta t}{3} u''_p(\tau);$$

$$v_{p+1} = v_p + 2\Delta t \cdot v'_p + \frac{\Delta t}{3} v''_p(\tau);$$

Отсюда следует, что ошибка ограничения метода прогноза равна

$$\varepsilon_{u,j} = \frac{\Delta t^3}{3} u''_p(\tau), \quad \varepsilon_{v,j} = \frac{\Delta t^3}{3} v''_p(\tau).$$

Если третье производное постоянное, то ошибка ограничения равна $K \cdot \Delta t^3$ а порядок аппроксимации данного метода равен $O(\Delta t)^2$.

Так как коррекция является обобщением метода трапеции, то ошибка ограничения определяется следующим образом:

$$\varepsilon_{u,k} = -\frac{\Delta t^3}{12} u''_p(\bar{\tau}), \quad \varepsilon_{v,k} = -\frac{\Delta t^3}{12} v''_p(\bar{\tau}), \quad t_{p-1} \leq \bar{\tau} \leq t_{p+1}.$$

Следовательно, она равняется $K \cdot \Delta t^3$, а порядок аппроксимации $O(\Delta t)^3$. Отсюда следует, что ошибка ограничения и порядок аппроксимации метода прогноза и коррекции одинаковы.

Теперь остановимся на сходимости итерационного метода прогноза и коррекции. Итерационный процесс прекращается, когда

$$\left| u_{p+1}^{(S-1)} - u_{p+1}^{(S)} \right| < \varepsilon, \quad \left| v_{p+1}^{(S-1)} - v_{p+1}^{(S)} \right| < \varepsilon, \quad \varepsilon > 0.$$

Для исследования сходимости итерационного метода прогноза и коррекции воспользуемся равенством

$$u_{p+1}^{(S+1)} - u_{p+1}^{(S)} = \frac{\Delta t}{2} \left[F_1 \left(u_{p+1}^{(S)}, v_{p+1} \right) - F_1 \left(u_{p+1}^{(S-1)}, v_{p+1} \right) \right],$$

$$v_{p+1}^{(S+1)} - v_{p+1}^{(S)} = \frac{\Delta t}{2} \left[F_2 \left(u_{p+1}^{(S)}, v_{p+1} \right) - F_2 \left(u_{p+1}^{(S-1)}, v_{p+1} \right) \right],$$

Используя теорему о среднем значении, получаем

$$\begin{cases} u_{p+1}^{(S+1)} - u_{p+1}^{(S)} = \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial F_1}{\partial t} \left[U_{p+1}^{(S)} - U_{p+1}^{(S-1)} \right], \\ v_{p+1}^{(S+1)} - v_{p+1}^{(S)} = \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial F_2}{\partial t} \left[v_{p+1}^{(S)} - v_{p+1}^{(S-1)} \right], \end{cases} \quad (8)$$

Предположим, что $\partial F_1 / \partial t$, $\partial F_2 / \partial t$ и ограничены, т.е. можно найти такое M' , что

$$\frac{\partial F_1}{\partial t} \leq M', \quad \frac{\partial F_2}{\partial t} \leq M'$$

Тогда из (8) следует, что

$$\begin{cases} \left| u_{p+1}^{(S+1)} - u_{p+1}^{(S)} \right| \leq \frac{\Delta t}{2} M' \left| u_{p+1}^{(S)} - u_{p+1}^{(S-1)} \right|, \\ \left| v_{p+1}^{(S+1)} - v_{p+1}^{(S)} \right| \leq \frac{\Delta t}{2} M' \left| v_{p+1}^{(S)} - v_{p+1}^{(S-1)} \right|, \end{cases} \quad (9)$$

Аналогично

$$\begin{cases} \left| u_{p+1}^{(S)} - u_{p+1}^{(S-1)} \right| \leq \frac{\Delta t}{2} M' \left| u_{p+1}^{(S-1)} - u_{p+1}^{(S-2)} \right|, \\ \left| v_{p+1}^{(S)} - v_{p+1}^{(S-1)} \right| \leq \frac{\Delta t}{2} M' \left| v_{p+1}^{(S-1)} - v_{p+1}^{(S-2)} \right|, \end{cases} \quad (10)$$

Теперь, подставляя (9) - (10) в равенства (8), получаем

$$\left| u_{p+1}^{(S+1)} - u_{p+1}^{(S)} \right| \leq \left(\frac{\Delta t M'}{2} \right)^2 \left| u_{p+1}^{(1)} - u_{p+1}^{(0)} \right|,$$

$$\left| v_{p+1}^{(S+1)} - v_{p+1}^{(S)} \right| \leq \left(\frac{\Delta t M'}{2} \right)^2 \left| v_{p+1}^{(1)} - v_{p+1}^{(0)} \right|.$$

Таким образом, если выбрать шаг интегрирования по времени из условия

$$\Delta t < \frac{2}{M'},$$

то данный итерационный процесс сходится квадратично.

Теперь остановимся на выборе шага по времени Δt . Если взять шаг Δt слишком малым, то итерационный процесс быстро сходится, но вторая сторона данного вопроса состоит в том, что количество вычисляемых шагов по времени будет резко возрастать, а это потребует больших затрат машинного времени и вычислений. Если выбрать шаг Δt большим, то на каждом шаге по времени число итераций будет расти, а количество шагов по времени сохранится. Предположим, что после бесконечно большого количества итераций выполняется равенство

$$u_{p+1} = u_p + \frac{\Delta t}{2} [F_1(u_p, v_p + F_1(u_{p+1}, v_{p+1}))], \quad (11)$$

если не будем учитывать ошибку округления. Если точное решение задачи равно Y_p , то можно записать

$$Y_{p+1} = Y_p + \frac{\Delta t}{2} [F_1(Y_p, v_p) + F_1(Y_{p+1}, v_{p+1})] + l_p, \quad (12)$$

где l_p – сумма ошибок округления и ограничения. Вычитая (11) из (12) и положив

$$e_p = Y_p - U_p,$$

имеем

$$e_{p+1} = e_p + \frac{\Delta t}{2} \{ [F_1(Y_p, v_p) - F_1(u_p, v_p)] + [F_1(Y_{p+1}, v_{p+1}) - F_1(u_{p+1}, v_{p+1})] \} + \varepsilon_p$$

На основе теоремы о среднем значении

$$e_{p+1} = M' e_p + \bar{\chi},$$

где

$$M' = 1 + \left(\frac{\Delta t F_1 u}{2} \right) / \left(1 - \frac{\Delta t F_1 u}{2} \right); \quad \bar{\chi} = \varepsilon_p / \left(1 - \frac{\Delta t F_1 u}{2} \right).$$

Аналогичные выкладки можно сделать для переменных $v(t)$.

Для сходимости метода требуется выполнение условий

$$\left| \frac{\Delta t F_1}{2} \right| < 1, \quad \left| \frac{\Delta t F_2}{2} \right| < 1. \quad (13)$$

Если F_1 , F_2 становятся меньше нуля, то Δt удовлетворяет условию (13), следовательно, выполняется условие $0 < M' < 1$.

Значит, оператор перехода не становится больше единицы, следовательно, ошибка, присутствующая при вычислении значений функции в p -й шаг интегрирования, не растет на следующем. Отсюда следует, что данный метод является абсолютно устойчивым при выполнении условия (13), т.е. конечно-разностная неявная схема является безусловно устойчивой.

4 Обсуждение результатов

На основе разработанных математических модели и вычислительных алгоритмов было составлено программные средства и проведены численных экспериментов для определения основных параметров технологического процесса. Результаты проведенного численного расчета приведены в рис 2-5.

Проведенные численные расчеты показывают, что в определенной скорости воздушного потока в пневмаканале чем больше плотнее частиц, тем медленнее уменьшается их значение горизонтальной скорости по времени (рис.2.). А вертикальная скорость при больших значениях плотности за счет увеличения массы частиц изменяет свое направление (рис. 3.). Очистка тяжелых частиц от лёгких примесей в пневмаканале происходит за счет подачи воздушного потока. В рисунке 3 отрицательные значения скорости означают нижние направления.

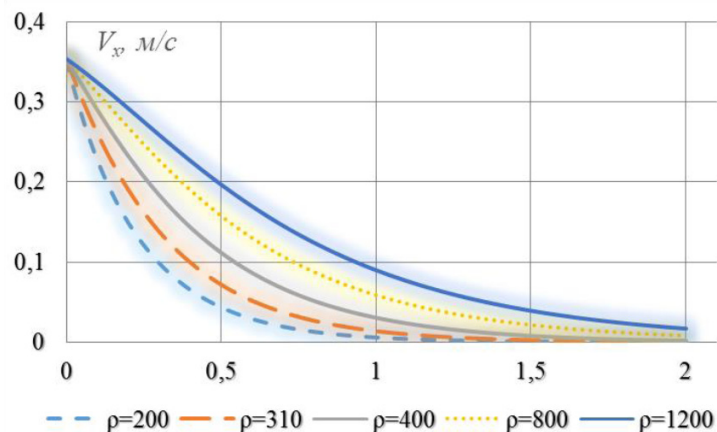


Рис. 2 Влияние плотности (кг/м^3) частиц на горизонтальную скорости (м/с) по времени (секунд) в пневмаканале.

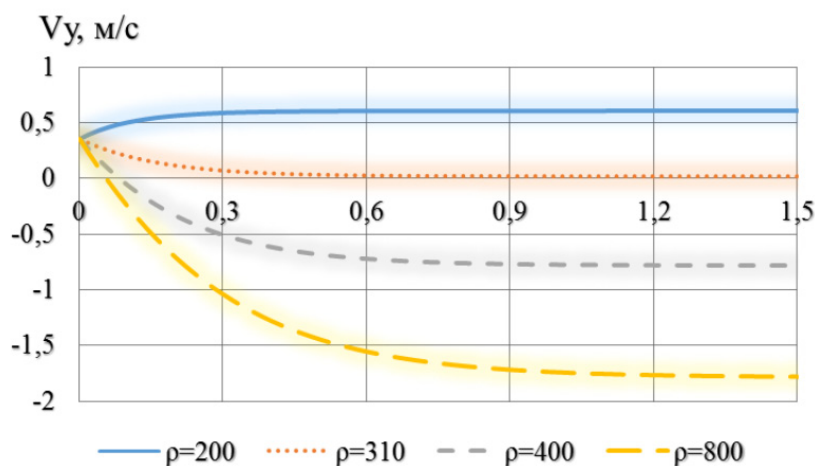


Рис. 3 Влияние плотности (кг/м^3) на вертикальную скорости (м/с) частиц по времени (секунд) в пневмаканале.

В рисунок 4 приведена траектория движения частиц в различных плотности. Из рисунков видно что в определенной скорости подачи сыпучих смеси чем больше плотности тем дальше уплотается по горизонтали за счет увеличения инерционных сил частиц. Поведения этих частиц при сортировке различных сортов зерна (пшеница, рысь и др.) роль огромная.

В рисунок 5 приведена траектория движения частиц в различных значения подачи воздушного потока. Из рисунок 5 видно, что при определенных значения параметров сыпучего материала

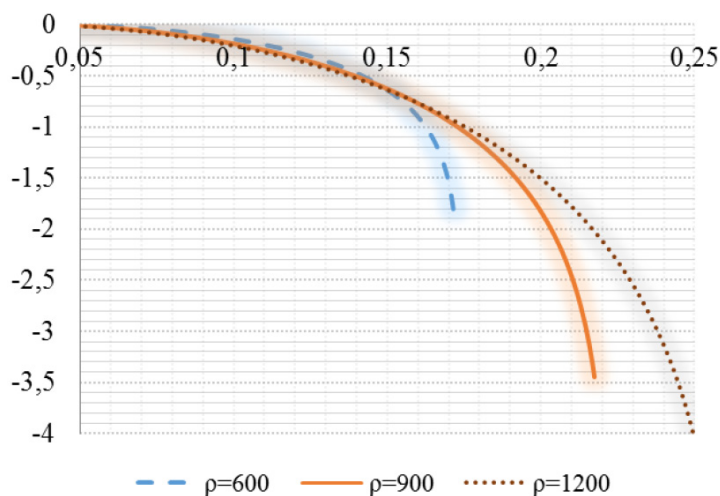


Рис. 4 Траектория движения частиц в различных значениях плотности (кг/куб.метр) сыпучих материала в пневмаканале.

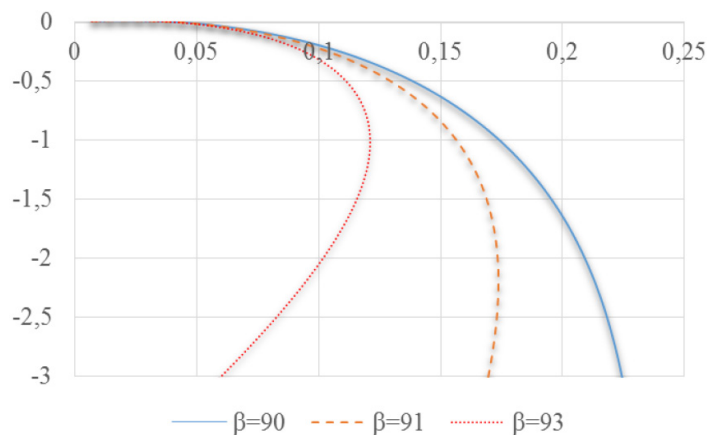


Рис. 5 Траектория движения частиц в различных значениях угла (градус) подачи воздушного потока.

5 Заключение

По проведённому и представленному в настоящей работе исследованию можно делать следующие выводы:

Разработаны математическая модель, численный метод и программное средство решения задачи с доказанными устойчивости и сходимости 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 установлены, что она существенный рол играет при процессе сепарирования и сортирования сыпучих масс, с ростом угла подачи воздушного потока происходит наилучше рассеивания траектория 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 свойства частиц а также скорости и направления воздушного потока;

Из анализа численных расчетов показывает, что для диаметров частиц $2,5$ мм и плотности 1100 кг/м.куб. при скорости $5,8$ м/с подачи воздушного потока скорости движения частиц будет критическими или можно говорить, что частиц будет находится в взвешенном состоянии в пневмосепараторном канале.

Литература

- [1] *Хижников А. А., Стрикунов Н. И.* Повышение эффективности очистки зерна на подсевном решете центробежно-решетного сепаратора // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2010. № 66(4). С. 72–76.
- [2] *Саитов В. Е., Суворов А. Н.* Математическая модель движения частицы в криволинейном пневмотранспортирующем канале // Пермский аграрный вестник, 2015. № 2(10). С. 55–60.
- [3] *Мажугин Е. И., Борисов А. Л., Пашкевич А. В.* Результаты лабораторных исследований процесса центробежной очистки масла в режущем аппарате многороторной косилки // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии, 2016. № 1. С. 93–97.
- [4] *Фефелов П. А., Арзамасцев А. А., Леонтьева А. И., Утробин Н. П., Брянкин К. В., Чупрунов С. Ю.* Математическое моделирование процесса кристаллизации водорастворимых примесей из суспензий полупродуктов органических красителей в поле центробежных сил // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки, 1997. № 2. С. 211–213.
- [5] *Алтухов Ю. А., Кисляк С. М., Аль Замми А. М., Сеначин П. К., Богомолов А. Р., Дадонов П. В.* Исследование аэродинамики и эффективности улавливания лабиринтного золоуловителя // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2012. № 1(89). С. 97–101.
- [6] *Чистяков Я. В., Махнин А. А., Володин Н. И.* Математическая модель центробежно-инерционного пылеуловителя для горноперерабатывающей промышленности // Известия Тульского государственного университета, 2013. № 3. С. 40–48.
- [7] *Латышов Д. Н.* Математическое моделирование процесса абсорбции в аппарате для низконапорных газовых потоков // Вестник Казанского технологического университета, 2013. № 16(12). С. 99–100.
- [8] *Усманова Р. Р., Заиков Г. Е., Дебердеев Р. Я.* Теоретическое и экспериментальное исследование эффективности сепарации дисперсных частиц // Вестник Казанского технологического университета, 2012. № 15. С. 11–14.
- [9] *Petri I.* Miu Applied Modeling Theory of Material Separation in Combine Harvesters // The Society for engineering in agricultural, food, and biological system, Paper Number: 043072, 2017.

- [10] Деревенко В. В., Глущенко Г. А. Закономерности однонаправленного движения потока воздуха и частиц рупанки по рабочей поверхности пневмосепаратора // Известия вузов, пищевая технология, 2009. № 5–6. С. 92–93.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Павлов Л. В., Ахраменко В. А. Пневматический сепаратор и результаты сортировки семян свеклы столовой с // dvsgvdsfhdgndjd, 0000. Т. 00. № 0. С. 00–00.
- [14] Ravshanov N., Palvanov B. Y. Математическая модель и численный эксперимент для исследования процесса сепарирования сыпучей смеси в пневмосепараторе // Журнал «Проблемы вычислительной и прикладной математики». – Ташкент. 2017. № 3(9). С. 37–45.
- [15] Ravshanov N., Palvanov B. Y., Орифджонова У. Компьютерное моделирование сложного технологического процесса сепарирования сыпучих смесей // Журнал «Проблемы вычислительной и прикладной математики». – Ташкент. 2017. № 2(8). С. 30–40.

Поступила в редакцию 06.07.2018

UDC 519.6

NUMERICAL MODELING OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF SEPARATION OF LOOSE MIXTURES BASED ON AIRFLOW BLOWING

Ravshanov N. K., Palvanov B. Y.

ravshanzade-09@mail.ru

Scientific and innovation center of information and communication technologies, 100084, 2 Kichik Halka yuli, Tashkent, Uzbekistan.

In the article, a mathematical model considering the direction of the airflow of loose mixtures which is described in the form of systems of nonlinear differential equations, based on the classical law of the mechanics of solids and on the basis of the classical law of the mechanics of solids; and numerical algorithm for solving the problem on a computer are proposed to investigate the technological process of separating difficult-to-separate loose mixtures, determining the main parameters and operating mode of the separating unit and their ranges. Because of the nonlinearity, the mathematical model was solved by numerical methods using the modified "forecast and correction" methods with automatic time step selections. The paper also demonstrates the stability and convergence of the "forecast and correction" method for solving the problem, software tool has been developed for computational experiment on a computer and a numerical experiment has been carried out, the results of which are presented in the form of graphs.

Keywords: keyword, keyword, keyword, keyword

Citation: Ravshanov N. K., Palvanov B. Y. 2018. Numerical modeling of the technological process of separation of loose mixtures based on airflow blowing. *Problems of Computational and Applied Mathematics*. 4(16): 46–60.

References

- [1] Khizhnikov A. A., Strikunov N. I. 2010. Povysheniye effektivnosti ochistki zerna na podsevnom reshete tsentrobezhno-reshetnogo separatora [Increase of efficiency of grain cleaning on the sieve sieve of the centrifugal-grate separator]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Vestnik of the Altai State Agrarian University] 66(4):72–76.
- [2] Saitov V. Ye., Suvorov A. N. 2015. Matematicheskaya model' dvizheniya chastitsy v krivolinyom pnevmotransportiruyushchem kanale [Mathematical model of particle motion in a curved pneumatic transport channel]. *Permskiy agrarnyy vestnik* [Perm agrarian bulletin] 2(10):55–60.
- [3] Mazhugin Ye. I., Borisov A. L., Pashkevich A. V. 2016. Rezul'taty laboratornykh issledovaniy protsessa tsentrobezhnoy ochistki masla v rezhushchem apparate mnogorotnoy kosilki [Results of laboratory studies of the process of centrifugal oil cleaning in the cutting apparatus of a multi-rotor mower]. *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy] 1:93–97.
- [4] Fefelov P. A., Arzamastsev A. A., Leontyeva A. I., Utrobin N. P., Bryankin K. V., Chuprunov S. Yu. 1997. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa kristallizatsii vodorastvorimyykh primesey iz suspenziy poluproduktov organicheskikh krasiteley v pole tsentrobezhnykh sil [Mathematical modeling of the process of crystallization of water-soluble impurities from suspensions of intermediates of organic dyes in a field centrifugal forces]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Bulletin of Tambov University. Series: Natural and technical sciences] 2:211–213.
- [5] Altukhov Yu. A., Kislyak S. M., Al-Zamili A. M., Senachin P. K., Bogomolov A. R., Dadonov P. V. 2012. Issledovaniye aerodinamiki i effektivnosti ulavlivaniya labirintnogo zoloulovatelya [Investigation of aerodynamics and efficiency of catching a labyrinth ash collector]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass State Technical University] 1(89):97–101.
- [6] Chistyakov Ya. V., Makhnin A. A., Volodin N. I. 2013. Matematicheskaya model' tsentrobezhno-inertsionnogo pyleulovatelya dlya gornopererabatyvayushchey promyshlennosti [Mathematical Model of the Centrifugal-Inert Dust Collector for the Mining Industry]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Izvestia, Tula State University] 3:40–48.
- [7] Latypov D. N. 2013. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa absorptsii v apparate dlya nizkonapornyykh gazovykh potokov [Mathematical modeling of the absorption process in the apparatus for low-pressure gas flows]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University] 16(12):99–100.
- [8] Usmanova R. R., Zaikov G. Ye., Deberdeyev R. Ya. 2012. Teoreticheskoye i eksperimental'noye issledovaniye effektivnosti separatsii dispersnykh chastits [Theoretical and experimental study of separation efficiency of dispersed particles]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universitet* [Bulletin of Kazan Technological University] 15:11–14.
- [9] Petri I. 2017. Miu Applied Modeling Theory of Material Separation in Combine Harvesters // *The Society for engineering in agricultural, food, and biological system, Paper Number: 043072*.
- [10] Derevenko V. V., Glushchenko G. A. 2009. Zakonomernosti odnonapravlennoy dvizheniya potoka vozdukh i chastits rushanki po rabochey poverkhnosti pnevmoseparatora [Regularities of the unidirectional movement of air flow and particles of the pelt on the working surface of the pneumatic separator]. *Izvestiya vuzov, pishchevaya tekhnologiya* [Izvestiya Vuzov, edutnaya tekhnologiya] 5–6:92–93.
- [11] Chernyakov A. V., Koval V. S., Sukhov A. V., Pavlyuchenko K. V. 2013. Issledovaniye protsessa sortirovaniya zernovogo vorokha na konicheskom separatore na razlichnykh kul'turakh

- [Investigation of the process of sorting grain heap on a conical separator in various cultures // Omsk Scientific Bulletin]. *omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin] 3(123):108–112.
- [12] Matveyev A. I., Lebedev I. F., Nikiforova L. V., Yakovlev B. V. 2014. Modelirovaniye dvizheniya chastits v vintovom pnevmosepatatore [Simulation of the motion of particles in a screw pneumatic sepor]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)*. – Moskva: Gornaya kniga. [Mining information-analytical bulletin (scientific and technical journal). - Moscow: The Mountain Book] 10:172–178.
- [13] Pavlov L. V., Akhramenko V. A. 0000. Pnevmaticheskiy separator i rezul'taty sortirovki semyan svekly stolovoy s [The pneumatic separator and the results of the sorting of the beet seed with]. xxxxxxxxxxxxxxx [xxxxxxx] 0:00–00.
- [14] Ravshanov N., Palvanov B. Yu. 2017. Matematicheskaya model' i chislenny eksperiment dlya issledovaniya protsessa separirovaniya sypuchey smesi v pnevmasepatatore [Mathematical Model and Numerical Experiment for Investigating the Process of Separation of a Loose Mixture in an Air Separator]. *Zhurnal «Problemy vychislitel'noy i prikladnoy matematiki»*. – Tashkent. [Journal "Problems of Computational and Applied Mathematics". – Tashkent.] 3(9):37–45.
- [15] Ravshanov N., Palvanov B. Yu., Orifzhonova U. 2017. Komp'yuternogo modelirovaniye slozhnogo tekhnologicheskogo protsessa separirovaniye sypuchikh smesey [Computer simulation of complex technological process of separation of loose mixtures]. *Zhurnal «Problemy vychislitel'noy i prikladnoy matematiki»*. – Tashkent. [Journal "Problems of Computational and Applied Mathematics". – Tashkent.] 2(8):30–40.

Received July 6, 2018