

УДК 62-9:001.891.57

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ПРИ ВОЗДУШНОМ СЕПАРИРОВАНИИ СЫПУЧИХ СМЕСЕЙ

Пивень В.В., Уманская О.Л., Кривчун Н.А.

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, e-mail: pivenvv@yandex.ru

При сепарировании сыпучих смесей воздушным потоком необходимо точное определение параметров делительной камеры. Величина и расположение зоны приема различных компонентов зависит от их аэродинамических свойств, скорости воздушного потока, высоты воздушного канала. Аэродинамические свойства исходного материала зависят от его влажности, крупности, шероховатости поверхности и др. Стесненное движение компонентов в воздушном потоке также влияет на качество сепарирования. Возникают различные завихрения, влияющие на процесс обтекания компонентов воздушным потоком. Высокая концентрация и различные скорости движения компонентов в воздушном потоке приводят к столкновению компонентов. При расчетах необходимо учитывать скорость ввода компонентов в воздушный поток, угол ввода и угол наклона воздушного канала к горизонту. Математическое моделирование траекторий движения компонентов сепарируемой смеси позволяет определять конструктивные параметры сепараторов, а также необходимые регулировки для учета меняющихся свойств материала и условий сепарирования. Математическое моделирование позволяет прогнозировать качество процесса воздушного сепарирования. Процесс сепарирования усложняется, если исходная смесь имеет значительное перекрытие вариационных кривых разделения. В этом случае моделирование процесса сепарирования позволяет принять правильное решение о количестве и качестве фракций, получаемых в результате сепарирования.

Ключевые слова: воздушное сепарирование, сыпучие смеси, компоненты сепарируемого материала, аэродинамические свойства, траектории движения

MATHEMATICAL MODELING OF THE TRAJECTORIES OF COMPONENTS FOR AIR SEPARATION OF LOOSE MIXTURES

Piven V.V., Umanskaya O.L., Krivchun N.A.

Federal State Budget Institution of Higher Education «Tyumen Industrial University», Tyumen, e-mail: pivenvv@yandex.ru

When separating bulk mixtures by air flow, it is necessary to accurately determine the parameters of the dividing chamber. The size and location of the reception area of the various components depends on their aerodynamic properties, the air flow rate, the height of the air channel. The aerodynamic properties of the starting material depends on its moisture content, grain size, surface roughness, etc. Constrained motion of a component in the air stream also affects the quality of separation. There are various turbulences that affect the process of flow around the components of the air flow. The high concentration and different speeds of the components in the air flow cause the components to collide. In the calculations it is necessary to take into account the speed of entering the components into the air flow, the angle of entry and the angle of inclination of the air channel to the horizon. Mathematical modeling of the trajectories of the separable mixture components allows determining the design parameters of the separators, as well as the necessary adjustments to take into account the changing properties of the material and the conditions of separation. Mathematical modeling allows to predict the quality of the air separation process. The separation process is complicated if the initial mixture has a significant overlap of the separation variation curves. In this case, the simulation of the separation process allows you to make the right decision about the number and quality of fractions obtained as a result of separation.

Keywords: air separation, bulk mixtures, components of the material to be separated, aerodynamic properties, trajectories of motion

Сепарирование многокомпонентных сыпучих смесей воздушным потоком применяют в различных отраслях промышленности: сепарирование порошков в фармацевтической промышленности, порошковой металлургии, пищевой и перерабатывающей промышленности, строительной индустрии и др. Разделяемые компоненты должны при этом различаться по аэродинамическим свойствам. Получение конечных продуктов разделения в чистом виде возможно только в том случае, если вариационные кривые разделения не пересекаются.

Воздушные сепараторы могут использоваться для извлечения примесей из основного потока зерна, фракционирования исходного зернового материала [1–3], выделения примесей из отходов [4]. Эффективность работы воздушных сепараторов и производительность незначительно зависит от влажности и засоренности зерна в сравнении с другими рабочими органами. Поэтому совершенствование воздушных сепараторов [5, 6] поиск новых технологических схем их применения, оптимизация параметров воздушных сепараторов является актуальной научной задачей. Эффективность

процесса воздушной сепарации зависит от точности определения конструктивных размеров сепарирующих камер, оптимальных значений скорости воздушного потока, скорости и угла ввода компонентов в воздушный поток, производительности [7–9].

Цель исследования: получить математические выражения для построения траекторий движения компонентов сепарируемых смесей в воздушном потоке, с помощью математического моделирования движения компонентов определить координаты зоны приема в зависимости от их исходных аэродинамических свойств.

Материалы и методы исследования

Критериями качества процесса воздушной сепарации при разделении исходного материала на две фракции является полнота разделения (процент или доля выноса легких примесей из основного материала в отходы) и потери основного продукта в отходы. Целесообразность применения технологии воздушного сепарирования определяется наличием в исходном материале компонентов, отличающихся от основного продукта аэродинамическими свойствами. Если таких отличий нет, применяются другие способы разделения. Если по физико-механическим свойствам компонентов исходной смеси ее можно разделить по нескольким признакам, то технологическая линия выстраивается таким образом, чтобы на первых этапах обработки можно было выделить наибольшее количество примесей и снизить нагрузку на последующие рабочие органы.

До 70% примесей в исходном зерновом материале, поступающем на послеуборочную обработку, отделяются от семян основной культуры по аэродинамическим признакам. Эффективность процесса воздушного сепарирования повышается, если применять скоростной ввод исходного ма-

териала в воздушный поток. Этот эффект наиболее ощутим при высокой (до 15–20%) засоренности исходного материала.

Для определения одного из основных параметров сепарирующей камеры – протяженности приемников фракций рассмотрим схему сил, действующую на частицу сепарируемого материала, которая движется в наклонном воздушном канале (рис. 1). Исходный зерновой материал с начальной скоростью V_0 вводится под углом α_0 к направлению воздушного потока. Воздушный поток имеет скорость W , а угол наклона воздушного канала к горизонту равен γ . Текущее значение скорости частицы сепарируемого материала обозначено как V . Вектор скорости V образует с вектором скорости воздушного потока W угол α . На частицу материала действует следующая система сил: сила тяжести $m \cdot g$ и сила аэродинамического сопротивления R . Дифференциальные уравнения движения частицы в проекции на координатные оси X и Y будут иметь следующий вид:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = R_x - m \cdot g \cdot \sin \gamma,$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = m \cdot g \cdot \cos \gamma - R_y. \quad (1)$$

Сила аэродинамического сопротивления R , действующая на частицу со стороны воздушного потока, направлена противоположно вектору V_R , а ее значение определяется по формуле

$$R = 0,5 \cdot c_x \cdot \rho \cdot S_M \cdot V_R^2, \quad (2)$$

где c_x – безразмерный коэффициент лобового сопротивления частицы; ρ – плотность воздуха, кг/м³; S_M – площадь миделева сечения (площадь проекции частицы на плоскость, перпендикулярную вектору относительной скорости V_R), м².

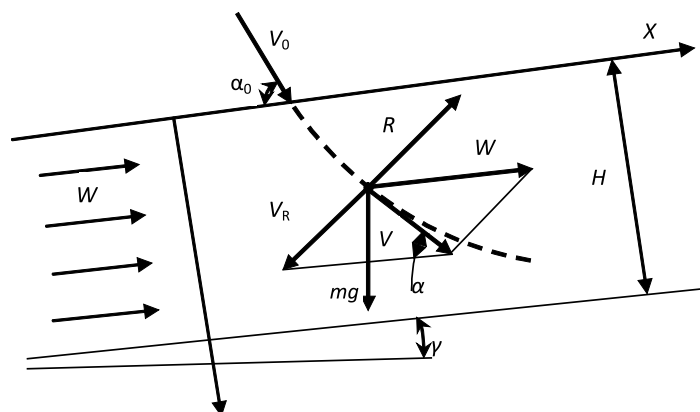


Рис. 1. Схема сил, действующая на частицу сепарируемого материала в наклонном воздушном канале

Во время движения сепарируемых частиц в воздушном потоке их положение все время меняется. Аэродинамические свойства зерновых материалов удобнее всего характеризовать скоростью витания. Это такая скорость вертикального воздушного потока, при которой частица находится в нем в равновесном положении. Сила аэродинамического сопротивления уравновешивается силой тяжести частицы. В этом случае усредненное значение аэродинамических свойств частицы учитывается обобщенным коэффициентом парусности k_w [10, 11]. Тогда силу аэродинамического сопротивления можно представить как

$$R = k_w \cdot m \cdot V_t^2, \quad (3)$$

где k_w – коэффициент парусности, m^{-1} ; m – масса частицы, кг; V_t – скорость витания, м/с.

В состоянии равновесия при нахождении частицы в воздушном потоке во взвешенном состоянии

$$k_w \cdot m \cdot V_t^2 = m \cdot g. \quad (4)$$

Из формулы (4) получаем математическое выражение для определения значения коэффициента парусности

$$k_w = g / V_t^2. \quad (5)$$

Математическую связь коэффициента парусности с коэффициентом лобового сопротивления можно установить из равенства правых частей формул (2) и (3). Учитывая, что во взвешенном состоянии относительная скорость движения частицы V_R равна скорости витания V_t , получаем

$$k_w = c_x \cdot \rho \cdot S_M / (2 \cdot m). \quad (6)$$

Вектор относительной скорости движения частицы V_R является стороной параллелограмма, построенного на векторах V_B и W . Вектор текущего значения абсолютной скорости частицы V является диагональю этого параллелограмма. Из соотношения сторон треугольника, построенного на векторах V , V_R и W , следует, что

$$V_R = \sqrt{W^2 + V^2 - 2 \cdot W \cdot V \cdot \cos \alpha}. \quad (7)$$

Для преобразований системы уравнений (1) заменим проекции векторов скорости V и ускорения на оси координат X и Y следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cdot \cos \alpha, \quad \dot{y} = V \cdot \sin \alpha, \quad \dot{x}_0 = V_0 \cdot \cos \alpha_0, \\ \ddot{x} &= \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad \ddot{y} = \frac{d^2 y}{dt^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Введем следующие подстановки:

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \dot{x} / \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}, \quad \sin \alpha = \dot{y} / \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}, \\ V / \sin \beta &= V_R / \sin \alpha. \end{aligned} \quad (9)$$

При движении частицы в воздушном потоке аэродинамическая сила R зависит от относительной скорости V_R . Поэтому при определении R в выражении (3) параметр V_t необходимо заменять на V_R . С учетом зависимостей (3)–(9) дифференциальные уравнения движения (3) принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= k_w (W - \dot{x}) \sqrt{(W - \dot{x})^2 + \dot{y}^2} - g \cdot \sin \gamma, \\ \ddot{y} &= g \cdot \cos \gamma - k_w \cdot \dot{y} \sqrt{(W - \dot{x})^2 + \dot{y}^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Решение дифференциальных уравнений движения материальной точки в воздушном потоке произведем методом разложения в степенные ряды в виде

$$x = x_0 + \dot{x}_0 \cdot t + \ddot{x}_0 \cdot t^2 / (2!) + \ddot{\ddot{x}}_0 \cdot t^3 / (3!) + \dots$$

$$y = y_0 + \dot{y}_0 \cdot t + \ddot{y}_0 \cdot t^2 / (2!) + \ddot{\ddot{y}}_0 \cdot t^3 / (3!) + \dots \quad (11)$$

Индекс «0» означает начальные условия: начальную скорость частицы, угол ввода (рис. 1). Проведенные расчеты показывают, что четвертые члены уравнений (11) на порядок меньше предыдущих и при расчетах ими можно пренебречь. Для определения времени сепарирования t_s (времени нахождения частицы в воздушном канале высотой H) приравняем координату Y во втором уравнении системы (11) величине H и получим

$$t_s = (-V_0 \cdot \sin \alpha_0 + \sqrt{V_0^2 \cdot \sin^2 \alpha_0 + 2H \cdot \ddot{y}_0}) / \ddot{y}_0. \quad (12)$$

Полученные формулы позволяют рассчитать траекторию движения сепарируемой частицы, имеющей определенные аэродинамические свойства.

Результаты исследования и их обсуждение

Компоненты исходной зерновой смеси, поступающей в воздушный канал, имеют большое разнообразие по аэродинамическим свойствам (рис. 2). Вариационные кривые распределения компонентов по скоростям витания частично перекрываются и получить при воздушном сепарировании в чистом виде зерно основной культуры или примеси невозможно. В чистом виде можно получить большую часть примесей – зона A и часть зерна – зона C . В диапазоне B вариационные кривые пересекаются, и в этом диапазоне скоростей витания получается промежуточная фракция, состоящая из зерна основной культуры и примесей.

Получение такой промежуточной фракции целесообразно, так как из основного потока выделяется значительная часть компонентов в чистом виде. Дальнейшая очистка промежуточной фракции должна производиться на других рабочих органах в зависимости от различия физико-механических свойств компонентов этой фракции.

Величина скорости компонентов V_R зависит от скорости ввода V_0 и от угла ввода α_0 . Поэтому для увеличения действующей на компоненты сепарируемого материала аэродинамической силы и повышения качества сепарации необходимо увеличение скорости ввода исходного материала в воздушный поток.

Расчеты траекторий движения компонентов зернового материала производились при следующих параметрах: скорость ввода

компонентов в воздушный поток $V_0 = 5$ м/с, угол ввода $\alpha_0 = 60^\circ$, скорость воздушного потока $W = 8$ м/с, высота воздушного канала $H = 0,3$ м. В результате расчета траекторий движения с помощью уравнений (11) установлено, что для зерна пшеницы с диапазоном скоростей витания $8,9 \dots 11,5$ м/с значение $X_D = 0,265$ м (рис. 3). Этой координате соответствует начало осаждения наиболее тяжелых зерен. Данные получены при высоте воздушного канала $H = 0,3$ м. Протяженность зоны приема полноценного зерна ($D_1 + D_2$) составляет $0,059$ м. Начало зоны осаждения примесей ($X_D + D_1$), имеющих скорость витания $0 \dots 9,5$ м/с, составляет $0,294$ м. Проведенные экспериментальные исследования траекторий движения компонентов показали их максимальное отклонение от расчетных значений в пределах 14%.

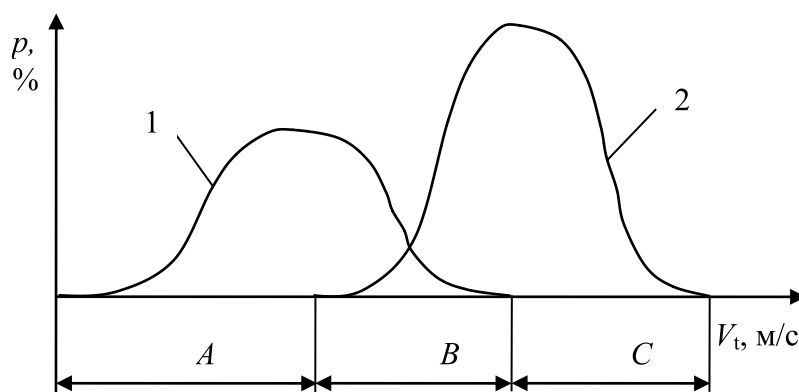


Рис. 2. Примерный график плотности распределения (p) компонентов основной культуры (2) и примесей (1) по скоростям витания (V): A – диапазон получения примесей в чистом виде; B – диапазон получения смешанной фракции: зерно основной культуры и примеси; C – диапазон получения зерна основной культуры в чистом виде

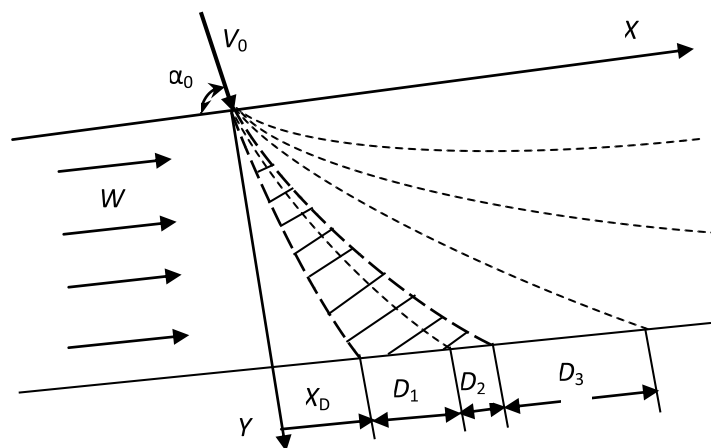


Рис. 3. Траектории движения компонентов: X_D – абсцисса начала зоны осаждения полноценного зерна; D_1 – протяженность зоны приема чистого зерна; D_2 – протяженность зоны приема чистого зерна и примесей; D_3 – протяженность зоны приема примесей

Легкие примеси выносятся воздушным потоком и не осаждаются. В зоне D_2 происходит осаждение как полноценного зерна, так и примесей. С помощью полученных в данной работе математических зависимостей можно так же определить максимальное значение скорости витания частиц, которые выносятся воздушным потоком по каналу и не будут осаждаться в приемнике фракций. Для вышеприведенного примера это значение скорости витания составляет 0,56 м/с.

Заключение

1. Математическое моделирование траекторий движения компонентов позволяет получить координаты и протяженность зоны приема компонентов, имеющих различные аэродинамические свойства. Оптимизация процесса воздушной сепарации должна производиться путем установления оптимальных значений параметров ввода сепарируемой смеси и скорости воздушного потока.

2. В процессе работы аэродинамические свойства компонентов и исходная засоренность материала могут меняться. Поэтому в зоне приема фракций необходимо предусматривать регулировочные устройства (поворотные заслонки, перемещение приемников фракций вдоль оси X). В случае перекрытия вариационных кривых распределения компонентов сепарируемого материала можно получать несколько фракций: чистое зерно, примеси, промежуточные фракции с содержанием зерна и примесей (рис. 3).

3. Выделение из общего потока обрабатываемого материала однородных фракций позволяет разгрузить основное оборудование для очистки зерна, снизить повреждение зерна, уменьшить энергетические затраты на послеуборочную обработку.

Список литературы

1. Piven V.V. The theoretical justification for the fractionation of bulk materials during separation. MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 106. no. 03005. 9 p. DOI: 10.1051/matec-conf/201710603005.

2. Чумаков В.Г. Деление зернового вороха на фракции пневморешетным сепаратором // Тракторы и сельхозмашины. 2011. № 12. С. 31–33.

3. Семенов Е.В., Славянский А.А., Антипов С.Т. Расчет эффективности процесса фракционирования сыпучей смеси в рабочем объеме пневмосепаратора // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 3 (65). С. 43–49. DOI:10.20914/2310-1202-2015-3-43-49.

4. Saitov V.E., Kurbanov R.F., Suvorov A.N. Assessing the adequacy of mathematical models of light impurity fractionation in sedimentary chambers of grain cleaning machines. Procedia Engineering 2 series «2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016». 2016. P. 107–110.

5. Авдеев Н.Е., Чернухин Ю.В., Странадко О.Г. Поиск новых принципов сепарирования // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2012. № 3 (53). С. 24–26.

6. Иванов Н.М., Чепурин Г.Е. Энергозатраты при послеуборочной обработке зерна // Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31. № 4. С. 87–90.

7. Бурков А.И., Глушков А.Л., Лазыкин В.А. Исследование вертикального пневмосепарирующего канала с опорной сеткой // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2015. № 1 (44). С. 73–79.

8. Бурков А.И., Глушков А.Л., Лазыкин В.А. Исследование разделительной камеры фракционного пневмосепаратора при очистке семян кормовых трав // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2014. № 5 (42). С. 69–74.

9. Шуханов С.Н. Планирование и методика проведения экспериментальных исследований зернометателя барабанного типа // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2015. № 5 (55). С. 71–73.

10. Глушков А.Л. Анализ процесса движения компонентов зернового материала в приемной камере зерноочистительной машины // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2016. № 4. С. 69–75.

11. Шуханов С.Н. Элементы взаимодействия частиц зернового вороха с воздухом при работе ленточного метателя // Аграрный научный журнал. 2015. № 12. С. 58–59.