

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПНЕВМОСЕПАРАЦИИ СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

MODELING OF AIR SEPARATION OF SUNFLOWER SEEDS IN THE AIR STREAM

Исмаилова Х.Р., соискатель

Азербайджанский Государственный Аграрный Университет
E-mail: tagievurfan@yahoo.com, tagiyev.asau@gmail.com

Ismailova H.R., Applicant

Azerbaijan State Agricultural University
E-mail: tagievurfan@yahoo.com, tagiyev.asau@gmail.com

Приведена математическая модель процесса пневмосепарации семян подсолнечника в горизонтальном воздушном потоке. Получена система дифференциальных уравнений, учитывающих действие боковых сил и моментов сопротивления элементов семенного вороха в воздушном потоке. Смоделировано поведение семян подсолнечника, примесей и пылевидных частиц на поверхности семян при изменении входных и управляющих параметров процесса пневмосепарации. Разработанная математическая модель и установленные геометрические и аэродинамические параметры отдельно взятых семян дают возможность при исследовании процессов пневматической сепарации в воздушном потоке заменить классические формы тел в виде шара и цилиндра на реальную ассиметричную форму семян подсолнечника. Результаты численных исследований математической модели позволяют оптимизировать следующие параметры: длину аспирационного канала, высоту верхней и нижней частей аспирационного канала и технологические режимы: угол и скорость вбрасывания семян, скорость воздушного потока.

Ключевые слова: математическая модель, пневмосепарация, боковые силы, вращение семян.

The mathematical model of air separation of sunflower seeds in the horizontal air flow was given. The system of differential equations that take into account lateral forces and resistance of seeds in the air stream was obtained. The behavior of sunflower seeds, impurities and dust particles on the seed surface at different input and control parameters of air separation was simulated. The developed mathematical model and established geometric and aerodynamic parameters of single seeds allow replacing the classical forms of a ball or cylinder with real asymmetric forms of sunflower seeds. The results of numerous studies of the mathematical model lead to the improvement of following parameters: the length of aspiration channel, the height of the upper and lower parts of the aspiration channel and technological modes: the angle and speed of seed ejection and air flow rate.

Key words: mathematical model, air separation, side forces, seed rotation.

Введение

Для семенного зерна его очистка в сочетании с последующим сортированием по добротности является основной операцией, обеспечивающей получение высококачественных семян для посева. Применение только способа очистки по аэродинамическим свойствам позволяет удалить до 50% и более всех примесей, содержащихся в зерне. Фракционирование зерна в воздушном потоке позволяет выделить фракцию с большей удельной массой зерна, которая отличается биологической полноценностью, более высокой урожайностью и дольше сохраняет урожайные свойства.

Современные требования к устройствам и процессам обработки семян воздушным потоком обуславливают необходимость более глубокого изучения взаимодействия частиц зернового вороха с воздушным потоком и элементами сепарируемого канала. Результаты теоретических и экспериментальных исследований должны лечь в основу создания научной базы для конструирования зерноочистительных и сортировальных машин семян высших репродукций.

При исследовании процесса сепарации зернового вороха в горизонтальном канале [1, 2] принимают, что воздушный поток равномерен по сечению канала, частицы не взаимодействуют одна с другой и не меняют своего положения по отношению к оси воздушного потока.

В этих работах определены следующие аэродинамические характеристики: скорость витания, коэффициенты сопротивления и парусности семян основных культур, сорных растений и других фракций зернового вороха. Для некоторых семян определены миделевы сечения семян.

Целью данной работы является разработка математической модели процессов сепарации и фракционирования семян в воздушном потоке с учетом влияния

поперечных сил и взаимодействий частиц зернового вороха между собой и с воздушным потоком.

В Азербайджане отсутствуют технология и технические средства для послепосевной обработки небольших партий маточных, суперэлитных, элитных и первой репродукции семян масличных культур.

Методика

Для решения поставленной проблемы нами разработана технология и экспериментальное оборудование послепосевной обработки гибридов семян родительских форм и гибридов семян подсолнечника первой репродукции.

Важной единицей оборудования в предложенной технологии является пневмосепарирующая колонка. На колонке осуществляется окончательная очистка семян.

При обдуве запыленной поверхности семянки потоком воздуха на прилипшую частицу действуют силы адгезии $\vec{F}_{ад}$, вес частицы $\vec{G}$, сила аэродинамического воздействия (реакция воздуха) $\vec{R}$ и подъемная сила $\vec{F}_{под}$. Для частиц небольших размеров, когда $F_{ад} > G$ и сила реакции воздуха больше подъемной силы, т.е. $R > F_{под}$, отрыв прилипших частиц произойдет при условии:

$$R > \mu F_{ад}, \quad (1)$$

где $\vec{F}_{ад}$ — сила адгезии, $\vec{R}$ — сила аэродинамического воздействия, выступающая здесь как лобовая сила, $\vec{F}_{под}$ — подъемная сила, μ — коэффициент трения.

Силу воздействия воздушного потока при обтекании частицы воздушным потоком можно рассчитать по формуле

$$R = c_x \rho S_m u_{от}^2 / 2, \quad (2)$$

где c_x — коэффициент аэродинамического сопротивления частицы; ρ — плотность воздуха; S_m — миделево се-

чение частицы; $u_{от}$ — относительная скорость частицы в воздушном потоке.

Определение силы аэродинамического сопротивления для различных семян и при различных условиях воздействия воздушного потока требует ряда экспериментальных исследований. Поэтому при отработке технологии в производственных условиях выбор скоростных режимов воздушного потока и параметров аспирационной колонки определялись по качеству сепарации семян.

В связи с тем, что в аспирационном канале кроме сепарации семян должно производиться обеспыливание их поверхности, параметры канала и режимы его работы должны отличаться от сепарационных каналов, применяемых в зерноочистительных машинах. В частности, длина канала и его высота, должна обеспечить сепарацию семян за счет скорости воздушного потока и времени нахождения в воздушном потоке. А для обоснования параметров канала и режимов его работы необходимо учесть все силы, действующие на семена, и эпюры скоростей воздушного потока по сечению канала должны соответствовать турбулентному воздушному потоку.

Примем степенной закон распределения воздушного потока по сечению канала. Тогда эпюра скорости воздушного потока в канале на отрезке $0 \leq y \leq b_0$ опишется уравнением

$$\vec{V} = \vec{V}_{\max} \left(\frac{y}{b_0} \right)^{1/7} \vec{i}, \quad (3)$$

где b_0 — расстояние от оси канала до условной стенки; $\vec{i}$ — единичный вектор оси X .

При таком законе распределения скоростей возникает градиент $\text{grad}_x V$ воздушного потока, который в свою очередь приводит к возникновению боковых сил, действующих на семянку.

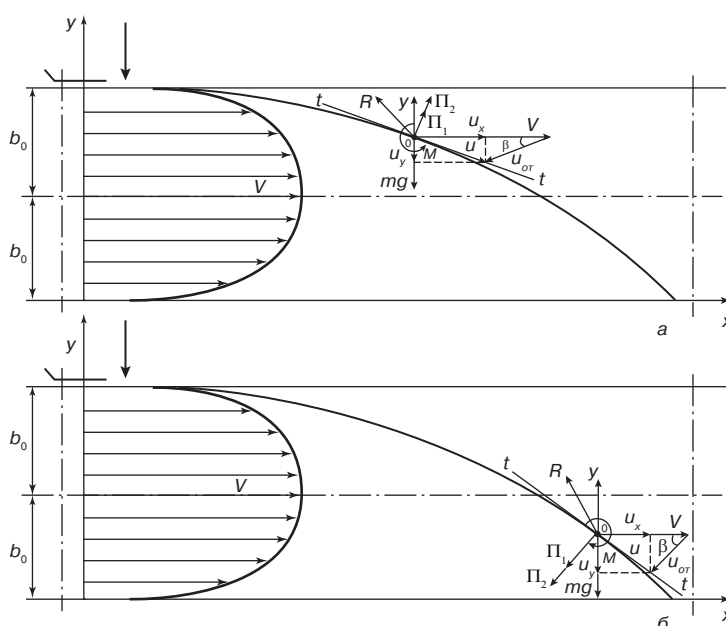
При вбрасывании семянки в горизонтальный воздушный поток пневмосепарационного канала действующие на частицу силы можно привести к главному вектору сил $\vec{P}$ и главному моменту сил $\vec{M}$.

Составляющими силами главного вектора в нашем случае являются сила тяжести $\vec{G} = m\vec{g}$, сила сопротивления воздушного потока $\vec{R}$ и боковые силы, одна из которых Π_1 возникает от градиента $\text{grad}_x V$ воздушного потока, обтекающего частицу, а другая Π_2 возникает от вращения частицы, обтекаемой воздушным потоком (эффект Магнуса).

Для правильного выбора направления действующих сил необходимо совместно рассмотреть план скоростей частицы и схему действующих сил. План скоростей и схема сил, действующих на семянку в первой половине и во второй половине пневмосепарационного канала, представлены соответственно на рис. 1а и б, где $\vec{V}$ — скорость воздушного потока, $\vec{u}$ — скорость семянки и ее проекции u_x , u_y на оси координат, $\vec{u}_{от}$ — относительная скорость семянки в воздушном потоке, $t-t$ — касательная к траектории полета семянки в рассматриваемой точке.

Сила сопротивления воздушного потока (сила реакции воздуха) направлена в сторону, противоположную относительной скорости частицы, а боковые силы направлены перпендикулярно относительной скорости в направлении, показанном на рис. 1а и б.

Рис. 1. План скоростей и схемы сил, действующих на семянку: а — в первой половине канала; б — во второй половине канала



Относительную скорость семянки в воздушном потоке на отрезке $0 \leq x \leq b_0$ найдем из прямоугольного треугольника плана скоростей (рис. 1а и б):

$$u_{от} = \sqrt{(V \pm u_x)^2 + u_y^2}. \quad (4)$$

Когда скорость витания семянки больше скорости воздушного потока и семянка падает вниз по аспирационному каналу, перед u_y ставится знак «+», в противном случае ставится знак «-».

Уравнение движения семянки для первой половины горизонтального канала в проекциях на оси координат с учетом боковых сил и момента сил, действующего на семянку, примет вид

$$\begin{cases} m \frac{du_x}{dt} = -R \sin \beta + \Pi_1 \cos \beta + \Pi_2 \cos \beta \\ m \frac{du_y}{dt} = R \cos \beta + \Pi_1 \sin \beta + \Pi_2 \sin \beta - mg \\ J \frac{d\omega}{dt} = M \end{cases} \quad (5)$$

где m — масса частицы; t — время, J — момент инерции частицы; ω — угловая скорость частицы; r — радиус-вектор от начала координат XOY , связанный с частицей, m ; β — угол, определяемый направления относительной скорости семянки к направлению воздушного потока.

Так как семянка подсолнечника имеет большое отклонение от симметрии, то частота вращения ее будет намного выше, чем частота вращения сферической частицы. Значит, кинематика и динамика движения семянки в воздушном потоке будут иными, чем у шаровой или цилиндрической частицы. Поэтому при выводе системы уравнений движения рассматриваем конкретно семянку подсолнечника с их геометрическими и аэродинамическими характеристиками. На рис. 2 изображены схема семянки подсолнечника, ее миделево сечения S_x , S_y , S_z по ортогональным плоскостям, основные размеры, полученные в результате замеров трех типов семян.

Вследствие действия боковых сил в восходящем потоке семянка не может занимать в нем постоянного

и определенного положения по отношению к направлению скорости потока. Ориентация ее в потоке будет постоянно меняться. По этой причине будут изменяться площадь миделева сечения и коэффициент парусности. Основные размеры, миделевы сечения и масса трех типов семян представлены в таблице. При описании аэродинамических свойств семян предпочтительнее выбирать коэффициент парусности перед коэффициентом аэродинамического сопротивления, так как именно этот показатель больше фигурирует в справочной литературе по семенам. Поэтому силу сопротивления $\vec{R}$ определяем из соотношения [10]

$$R = mk_n u_{от}^2, \quad (6)$$

где k_n — коэффициент парусности, величина которого определяется экспериментально для семян всех сельскохозяйственных культур.

Проекция силы сопротивления R_x и R_y на оси координат

$$R_x = mk_n u_{от} u_{от} \cos \beta. \quad (7)$$

$$R_y = mk_n u_{от} u_{от} \sin \beta. \quad (8)$$

Проекция относительной скорости семанки на оси x и y определяется из плана скоростей (рис. 1) с учетом значения скорости потока из выражения (3)

$$u_{от} \sin \beta = u_y; \quad (9)$$

$$u_{от} \cos \beta = V \pm u_x = \left[V_{\max} \left(\frac{x}{b_0} \right)^{1/7} \pm u_y \right]. \quad (10)$$

Силу сопротивления R в развернутом виде определяем из соотношения (6), подставляя значения относительной скорости семанки в воздушном потоке из выражения (4)

$$R = mk_n \left\{ \left[V_{\max} \left(\frac{x}{b_0} \right)^{1/7} \pm u_y \right]^2 \right\}. \quad (11)$$

Поэтому силу сопротивления R определяем из соотношения величины боковых сил, которая согласно теореме Н.Е. Жуковского пропорциональна относительной скорости набегающего потока от $\vec{u}_{от}$ и циркуляции Q , т.е.

$$\vec{\Pi} = \rho \vec{u}_{от} Q, \quad (12)$$

где ρ — плотность воздуха.

Циркуляция скоростного поля определяется криволинейным интегралом

$$Q_1 = \int u_{ox} dx + u_{oy} dy = \int_0^{2\pi} \{ u_{ox} [x(\alpha), y(\alpha)] x'(\alpha) + u_{oy} [x(\alpha), y(\alpha)] y'(\alpha) \} d\alpha,$$

где u_{ox} , u_{oy} — проекции относительной скорости семанки; α — угловая координата точки контура обтекания (угол Эйлера, угол поворота частицы).

Циркуляцию скорости Q_1 , Q_2 воздушного потока по контуру семанки подсолнечника определяем криволинейным интегралом с использованием методики Ф.Г. Зуева [3] для случая циркуляции скорости по круговому контуру цилиндра или шара.

$$Q_1 = C \frac{\pi}{2} (a^2 + b^2) = \frac{\pi V_{\max}}{14 b_0^{1/7} x^{6/7}} (a^2 + b^2); \quad (13)$$

Рис. 2. Схема семанки подсолнечника

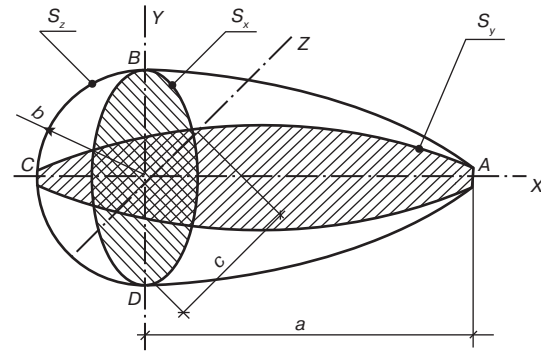


Таблица.

Геометрические размеры семанок подсолнечника

Параметры	Единицы измерения	Тип семанок		
		№1	№2	№3
a	мм	7,27	7,89	8,88
b	мм	2,38	2,68	2,98
c	мм	2,86	3,4	3,58
S _x	мм ²	10,58	12,96	16,39
S _y	мм ²	21,4	25,98	32,94
S _z	мм ²	35,84	44,54	54,18
m	г	0,048	0,059	0,071

$$Q_2 = \pi(a^2 + b^2)\omega. \quad (14)$$

Тогда из уравнения (12), подставляя значения проекций относительных скоростей семанки (9), (10) и циркуляции скорости, Q_1 , Q_2 воздушного потока (13), (14) получаем значения проекций боковых сил на оси координат

$$\Pi_{1x} = \frac{\rho \pi}{14} (a^2 + b^2) \frac{V_{\max}}{b_0^{1/7} x^{6/7}} u_x; \quad (15)$$

$$\Pi_{1y} = \frac{\rho \pi}{14} (a^2 + b^2) \frac{V_{\max}}{b_0^{1/7} x^{6/7}} \left[V_{\max} \left(\frac{x}{b_0} \right)^{1/7} \pm u_x \right]; \quad (16)$$

$$\Pi_{2x} = \pi \rho (a^2 + b^2) \omega u_y; \quad (17)$$

$$\Pi_{2x} = \pi \rho (a^2 + b^2) \omega \left[V_{\max} \left(\frac{x}{b_0} \right)^{1/7} \pm u_y \right]. \quad (18)$$

Известно, что линии действия сил $\vec{R}$, Π_1 , Π_2 , проходят через центр масс частицы. Тогда величина момента, действующая на частицу, будет определяться силой аэродинамического сопротивления и ее плечом относительно центра масс. С учетом значения силы сопротивления $\vec{R}$ из выражения (11) момент сил, действующий на семанку, равен

$$M = l_c R = l_c mk_n \left\{ \left[V_{\max} \left(\frac{x}{b_0} \right)^{1/7} \pm u_x \right]^2 + u_y^2 \right\}, \quad (19)$$

где l_c — плечо силы сопротивления относительно центра масс семечки.

Из векторной системы уравнений (5) с учетом значений проекций сил сопротивления (7) и (8), проекций относительных скоростей семечки (9), (10), проекций боковых сил на оси координат (15)–(18) и момента силы сопротивления (19) получаем систему уравнений движения семечки в проекциях на оси координат для первой половины канала.

При попадании частицы в другую половину потока (изменение координаты центра масс частицы $x > b_0$) некоторые силы меняют свое направление (рис. 1б), поэтому в уравнениях (10) перед выражением этих сил знак должен быть изменен на противоположный. Изменяется направление составляющих Π_{1x} и Π_{2x} боковых сил.

Проекция силы $\vec{\Pi}_2$ на ось X изменяет знак при изменении направления угловой скорости или знака проекции относительной скорости на ось X , а проекция силы $\vec{\Pi}_2$ на ось Y изменяет знак при изменении знака ω . Направление момента сил при $y > b_0$ изменяется на противоположное, направление силы сопротивления, действующей вдоль оси X , определяется знаком u_x . На отрезке $b_0 < y < 2b$ скорость воздушного потока описывается уравнением

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{du_x}{dt} = & -k_n \sqrt{\left[V_{\max} \left(\frac{x}{b_0} \right)^{1/7} + u_x \right]^2 + u_y^2} + \\ & + \frac{\rho}{m} \frac{\pi V_{\max}}{14 b_0^{1/7} x^{6/7}} (a^2 + b^2) \left[V_{\max} \left(\frac{x}{b_0} \right)^{1/7} + u_x \right] + \\ & + \frac{\rho}{m} \pi (a^2 + b^2) \omega \left[V_{\max} \left(\frac{x}{b_0} \right)^{1/7} + u_x \right]; \end{aligned} \right. \quad (20)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{du_y}{dt} = & k_n \sqrt{\left[V_{\max} \left(\frac{x}{b_0} \right)^{1/7} + u_x \right]^2 + u_y^2} + \left[V_{\max} \left(\frac{x}{b_0} \right)^{1/7} + u_x \right] + \\ & + \frac{\rho}{m} \frac{\pi V_{\max}}{14 b_0^{1/7} x^{6/7}} (a^2 + b^2) u_x + \frac{\rho}{m} \pi (a^2 + b^2) \omega u_x - g; \\ \frac{d\omega}{dt} = & \frac{l_c m}{J} k_n \left\{ \left[V_{\max} \left(\frac{x}{b_0} \right)^{1/7} + u_x \right]^2 + u_y^2 \right\}; \\ \vec{V} = & V_{\max} \left(1 - \frac{x}{b} \right)^{1/7} \vec{i}. \end{aligned} \right. \quad (21)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Припоров И.Е., Шепелев А.Б., Асеева А.В. Совершенствование процесса очистки семенного материала на воздушно-решетных зерноочистительных машинах // Научный журнал КубГАУ. — № 131 (07). — 2017. — С. 16.
2. Припоров Е.В., Шафоростов В.Д., Припоров И.Е. Эффективная очистка семян подсолнечника // Сельский механизатор. — 2014. — № 1(53). — С. 15.
3. Зуев Ф.Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях. — М.: Колос, 1976. — 344 с.

Начальные условия решения уравнения при пневматической сепарации должны быть при $t = 0$, $x = 0$, $y = 0$, $u_x = u_{x_n}$, $u_y = u_{y_n}$, $\omega_n = 0$.

При граничных условиях $y = r$ и $y = 2b - r$ произойдет взаимодействие частицы с воздушными границами потока. В результате вполне упругого удара со скольжением изменятся нормальная, тангенциальная и угловая скорости частицы. Так, частица в форме эллипсоида, которая имела скорость до удара u_1 и угловую скорость ω_1 , в первое мгновение после удара приобретает скорость u_2 и угловую скорость ω_2 . Для этого случая угловую скорость, нормальные и тангенциальные составляющие скорости частиц после удара о воздушные границы канала можно получить из соответствующих выражений [3]

$$u_{n_2} = k_n (u_{n_1} - \omega_1 a) - \omega_1 a - \frac{ma}{J} \left[a(1 + k_n)(u_{n_1} - \omega_1 a) - b(1 - k_t)(u_{t_1} + \omega_1 b) \right], \quad (23)$$

$$u_{t_2} = k_t (u_{t_1} + \omega_1 b) - \omega_1 b - \frac{mb}{J} a(1 + k_n) \times \\ \times (u_{n_1} + \omega_1 a) - b(1 - k_t)(u_{t_1} + \omega_1 b). \quad (24)$$

где u_{n_1} , u_{t_1} , ω_1 , u_{n_2} , u_{t_2} , ω_2 — соответственно нормальные, тангенциальные и угловые скорости частиц соответственно до и после удара о границу канала; k_n , k_t — коэффициенты восстановления нормальной и касательной компонент скорости частиц, обычно определяемые экспериментально; J — момент инерции частицы.

Начальными условиями для уравнений (12)–(14) будут значения параметров, полученные в результате решения системы уравнений (11), т.е. $u_x = u_{x_k} = u_{t_1}$, $u_y = u_{y_k} = u_{n_1}$ и $\omega = \omega_k = \omega_1$.

Выводы

1. Разработанная математическая модель и установленные геометрические и аэродинамические параметры отдельно взятых семечек дают возможность при исследовании процессов пневматической сепарации в воздушном потоке заменить классические формы тел в виде шара и цилиндра на реальную ассиметричную форму семян подсолнечника.

2. Результаты численных исследований математической модели позволяют оптимизировать следующие параметры: длину аспирационного канала, высоту верхней и нижней частей аспирационного канала и технологические режимы: угол и скорость вбрасывания семечки, скорость воздушного потока.

REFERENCES

1. Priporov I.E., Shepelev A.B., Aseeva A.V. Improving the process of cleaning seed on air-sieve grain cleaning machines // Scientific journal KubGAU. № 131 (07). 2017. С. 16.
2. Priporov E.V., Shaforostov V.D., Priporov I.E. Effective cleaning of sunflower seeds // Country mechanic. 2014. № 1 (53). С. 15.
3. Zuev F.G. Pneumatic transportation at grain processing enterprises. M.: Kolos, 1976. 344 p.