

УДК 631.316.02-001.5

Центробежное фракционирование длинностебельных материалов

И. В. Игнатенко, А. В. Погорелов

(Донской государственный технический университет)

Для фракционирования длинностебельных сельскохозяйственных материалов по длине предложен принцип центробежного фракционирования без применения сит. Описано устройство бесситового центробежного фракционера и его расчётная схема. Определены основные процессы: разгон частиц центробежным диском, разбрасывание в кольцевом аэродинамическом канале и разделение разделительными цилиндрами. Произведено математическое моделирование процессов разгона частиц центробежным диском и движения сброшенных частиц в восходящем воздушном потоке. Проведён компьютерный эксперимент. Получены траектории движения частиц в кольцевом аэродинамическом канале. Отличие траекторий так значительно, что можно говорить о сепарационных свойствах сочетания центробежного поля сил и воздушного потока. Приводятся рекомендации по компоновке разделительных цилиндров. Результаты моделирования свидетельствуют о принципиальной возможности реализации процесса фракционирования длинностебельных материалов центробежным рабочим органом за счёт различий траекторий разброса частиц в воздушном потоке.

Ключевые слова: переработка сельскохозяйственного сырья, центробежное фракционирование, воздушный поток, математическое моделирование, компьютерный эксперимент.

Введение. В сельскохозяйственном производстве возникает необходимость разделения длинностебельных материалов типа соломы по длине на фракции [1]. Широкое распространение получило использование соломистой подстилки при напольном выращивании бройлеров. Однако солома, прошедшая простое измельчение, не соответствует зоотехническим требованиям по длине резки (рекомендованная длина — от 100 до 180 мм). Слишком короткие фракции представляют опасность для птицы при заглатывании. Длинная фракция не образует слоя нужной плотности.

Состояние проблемы. Возникает задача механизации фракционирования соломистой массы, получаемой при уборке зерновых культур в качестве отходов. Фракционирование длинностебельной массы не имеет должного обеспечения техническими средствами. Типовые технологии фракционирования продуктов основаны на применении различных сит. Для длинностебельных материалов ситовые технологии неработоспособны. Требуется разработка бесситовых технологий.

Цель статьи — обоснование использования для фракционирования соломистой массы центробежного бесситового рабочего органа.

Принцип центробежного бесситового фракционирования. Принцип центробежного бесситового фракционирования основан на аэродинамической сепарации потока частиц, разбрасываемого быстровращающимся диском. В нём совмещены процессы разгона частиц на центробежном диске и воздушная сепарация сбрасываемых с диска частиц в аспирационном кольцевом канале. Функциональная схема центробежного фракционирования солоmistых материалов представлена на рис. 1.

Основными рабочими органами машины являются быстровращающийся диск 2 и разделительные цилиндры 5. Длинностебельная масса после измельчения через питатель 1 подаётся в центр диска 2, приводимый во вращение от электродвигателя 3, и под действием центробежных сил движется по нему, набирая скорость. Частицы, сбрасываемые с диска, попадают в кольцевой зазор, продуваемый потоком воздуха от вентилятора 4. Траектории частиц в зазоре зависят от их свойств — в частности от парусности. Лёгкие частицы будут уноситься с воздухом в отводящие патрубки, остальные будут попадать в разные цилиндры 5, распределяясь по фракциям.

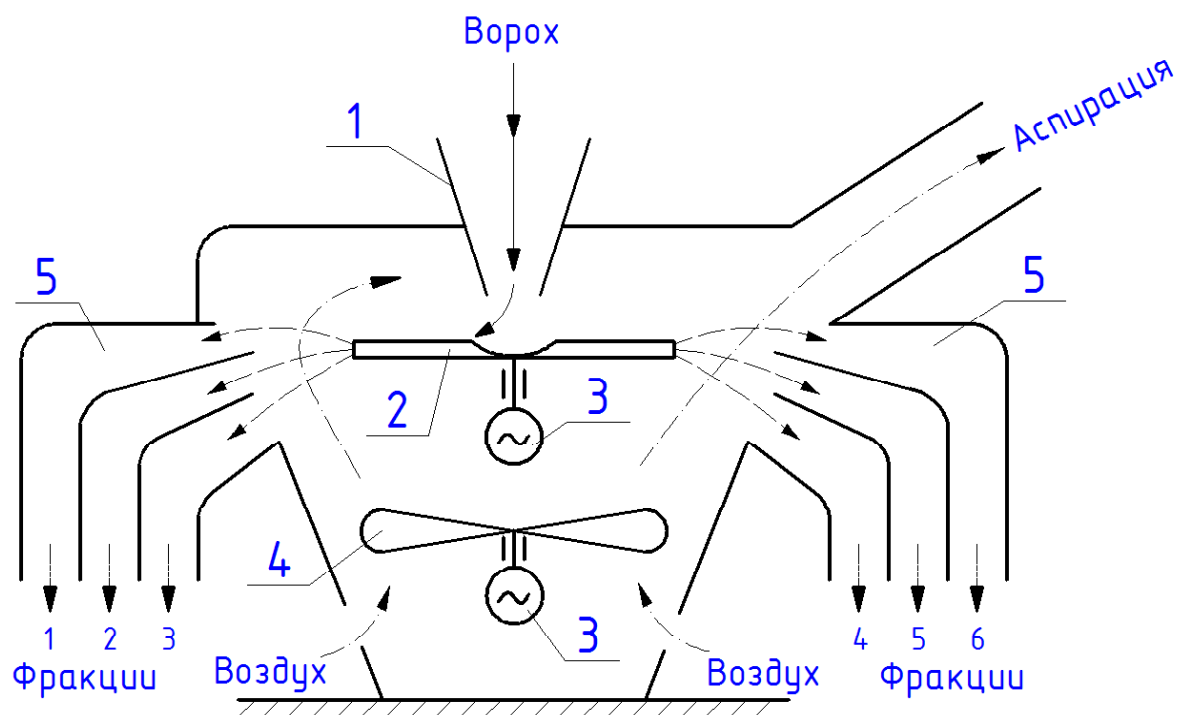


Рис. 1. Функциональная схема центробежного фракционирования:
1 — питатель; 2 — диск; 3 — электродвигатели; 4 — вентилятор; 5 — разделительные цилиндры

Расчётная схема процесса центробежного фракционирования. Расчётная схема (рис. 2) представляет собой плоский диск, вращающийся на вертикальном валу с угловой скоростью ω . Поток стебельной массы считается состоящим из отдельных длинных частиц, не взаимодействующих друг с другом, имеющих разную массу m и размеры: длину ℓ , ширину b , толщину δ . Частица считается длинной, если её толщина и ширина намного меньше длины ℓ . Длинная частица поступает на диск в точку с начальным радиусом r_0 (положение 1). Ориентация её характеризуется углом φ_1 случайной величины. Силами трения частица увлекается вращающимся диском в сложное движение: переносное вращательное вместе с диском и относительное поступательное по диску.

Помимо сил трения на частицу действуют центробежные силы, распределённые по её длине неравномерно, так что образуется крутящий момент M_k . Под действием центробежных сил частица движется к краю диска (положение 2), одновременно разворачиваясь, уменьшая угол ориентации ($\varphi_2 < \varphi_1$). Её устойчивое состояние наступает, когда частица расположится по радиусу (положение 3). Тогда угол ориентации $\varphi_3 = 0$, закручивающий момент $M_k = 0$.

По достижении края диска частица сбрасывается с него с абсолютной скоростью V_a и движется в воздушном канале между диском и разделительными конусами, подвергаясь воздействию воздушного потока со скоростью u . Под действием аэродинамических сил частица (точнее, её центр тяжести) описывает траекторию. Так как частицы имеют разную длину, массу и парусность, то и траектории их в воздушном потоке будут разные. Лёгкие частицы будут выдуваться вверх, тяжёлые, длинные — падать вниз.

Разделение на фракции по длине осуществляется кольцевыми каналами, расположенными на пути потока сброшенных с диска частиц.



- 1) разгон — движение длинной шероховатой частицы по вращающемуся диску;
- 2) разбрасывание — движение частицы в воздушном потоке с начальной скоростью по разным траекториям;
- 3) разделение потока частиц на фракции по кольцевым каналам.

Математическое моделирование движения частицы по диску. Движение частицы по вращающемуся диску — хорошо проработанный в литературе вопрос [2]. Его теория, разработанная академиком П. М. Василенко, представлена в учебниках. Однако теория предполагает, что частица круглая, и требует доработки, если речь идёт о длинной частице.

Смещение центра тяжести ξ рассматриваем аналогично задаче П. М. Василенко как движение точечной массы m по горизонтальному диску с прямыми лопастями, установленными под углом ψ к радиусу.

Уравнение движения центра масс по Василенко П. М.

$$\xi'' + 2f\omega\xi' - \omega^2\xi = [r_0\omega^2 \cos(\psi_0 \pm \phi) / \cos \phi] - fg \quad (1)$$

Здесь f — коэффициент трения частицы о диск; ϕ — угол трения; $\operatorname{tg} \phi = f$.

Уравнение (1) является неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка. Его характеристическое уравнение:

$$\lambda^2 + 2f\omega\lambda - \omega^2 = 0 \quad (2)$$

имеет корни

$$\lambda_1 = \omega \cdot \sqrt{(1+f^2)} - f\omega, \quad \lambda_2 = -\omega \cdot \sqrt{(1+f^2)} - f\omega. \quad (3)$$

Полное решение уравнения (1) с начальными условиями: при $t = 0$ $\xi = \xi' = 0$ имеет вид:

$$\xi = \left[\frac{fg}{\omega^2} - r_0 \frac{\cos(\psi_0 \pm \phi)}{\cos \phi} \right] \left[\frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_2 e^{\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{\lambda_2 t}) - 1 \right] \quad (4)$$

Скорость относительного движения частицы вдоль направления лопасти:

$$\dot{\xi} = u_r = \left[\frac{fg}{\omega^2} - r_0 \frac{\cos(\psi_0 \pm \phi)}{\cos \phi} \right] \left[\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) \right]. \quad (5)$$

Переносная скорость представлена окружной тангенциальной скоростью $V_t = r\omega$. Абсолютная скорость рассева частиц

$$\vec{V}_a = \vec{V}_r + \vec{V}_t. \quad (6)$$

Вращение длинной частицы вокруг центра тяжести описывается дифференциальным уравнением вида:

$$J\ddot{\phi} = M_k - M_B, \quad (7)$$

где J — центральный момент инерции длинной частицы; $M_k = \frac{1}{2}m\omega^2\ell(r_0 + \xi)\sin\phi$ — момент распределённой центробежной нагрузки; $M_B = K_a \ell \xi \cos\phi$ — момент аэродинамических сил сопротивления; K_a — коэффициент аэродинамического сопротивления.

Уравнения (1) и (7) составляют полную математическую модель движения длинной частицы по диску.

Анализ уравнений показывает, что к моменту сброса с диска длинная частица стремится сориентироваться по направлению действия центробежных сил по радиусу диска. Этот центробежный эффект упорядочивает последующее движение сброшенных частиц в воздушном потоке. Анализ не обнаруживает дестабилизирующих факторов, способных вызвать кувыркание частицы. Поворот длинных сориентированных частиц просматривается только в горизонтальной плоскости.

Моделирование процессов разбрасывания. После сброса с диска частица движется в равномерном воздушном потоке со скоростью w под действием силы тяжести mg и силы лобового сопротивления R , направление которой противоположно направлению скорости V относительно воздушного потока (рис. 3). Для плоской задачи начальные условия: при $t = 0$ $w_0 = V_r = 0$. Уравнения движения будут:

$$m\ddot{x} = -R \cos \theta, \quad (8)$$

$$m\ddot{z} = -R \sin \theta + mg, \quad (9)$$

где θ — угол между осью X и направлением относительной скорости V .

Сила сопротивления R противоположна направлению относительной скорости частицы относительно потока V . Её величина пропорциональна квадрату относительной скорости, т. е. $R = k_R V^2$. Вместе с силой веса G сила сопротивления R образует равнодействующую силу F , направленную против скорости движения частицы и вызывающую торможение частицы. На рис. 3. показано равновесие сил в момент сброса частицы с диска и в текущем положении. Сравнение

показывает, что по мере движения в воздушном потоке сила F уменьшается, но эффект её остаётся тормозящим.

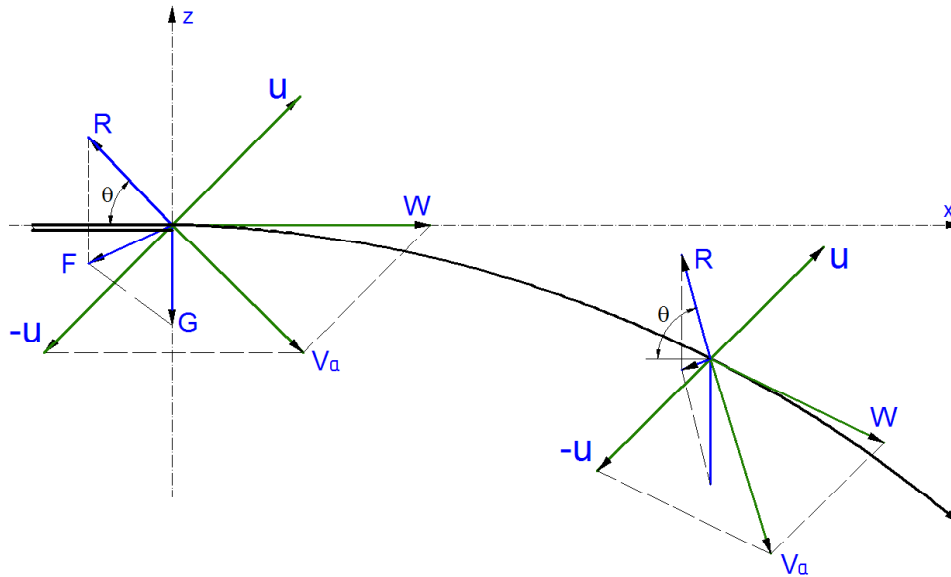


Рис. 3. Взаимодействие летящей частицы с воздушным потоком после сброса с диска

Проекции вектора относительной скорости на оси координат будут:

$$V_x = \dot{x} + u \cos \beta; \quad V_z = \dot{z} + u \sin \beta. \quad (10)$$

Выражение для модуля вектора скорости V

$$|V| = \sqrt{V_x^2 + V_z^2} = \sqrt{u^2 + \dot{x}^2 + \dot{z}^2 + 2u \cdot (\dot{x} \cdot \cos \beta + \dot{z} \cdot \sin \beta)} \quad (11)$$

Коэффициент сопротивления k_R будем считать пропорциональным площади лобового сечения S частицы. $k_R = kS$. При скорости воздушного потока, близкой к скорости витания частицы, можно принять $k = \text{const}$.

Полное выражение для силы сопротивления:

$$R = k S V^2, \quad (12)$$

где V находится по выражению (11).

Выражения для $\sin \theta$ и $\cos \theta$ получим через проекции V :

$$\sin \theta = V_x / V, \quad \cos \theta = V_z / V. \quad (13)$$

С учётом соотношений (10) получим:

$$\sin \theta = (\dot{z} + u \sin \beta) / V, \quad \cos \theta = (\dot{x} + u \cos \beta) / V. \quad (14)$$

Полученные соотношения (12) и (14) приводят дифференциальные уравнения задачи (8) и (9) к виду:

$$m\ddot{x} = -k \cdot S \cdot V (\dot{x} + u \cos \beta) \quad (15)$$

$$m\ddot{z} = mg - k \cdot S \cdot V (\dot{z} + u \sin \beta) \quad (16)$$

Если учесть, что объём частицы $O = a \cdot b \cdot l$, то масса частицы

$$m = O \gamma = a \cdot b \cdot l \gamma \quad (17)$$

Тогда площадь лобового сечения S можно выразить через массу частицы и её толщину, являющуюся качеством сепарации:

$$S = a \cdot b = m / (\gamma \cdot l) \quad (18)$$

С учётом соотношений (11) и (18) и уравнений (15) и (16) получим математическую модель процесса разброса в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\ddot{x} = -\frac{k}{\gamma \ell} (\dot{x} + u \cos \beta) \sqrt{u^2 + \dot{x}^2 + \dot{z}^2 + 2u \cdot (\dot{x} \cdot \cos \beta + \dot{z} \cdot \sin \beta)} \quad (19)$$

$$\ddot{z} = g - \frac{k}{\rho \ell} (\dot{z} + u \sin \beta) \sqrt{u^2 + \dot{x}^2 + \dot{z}^2 + 2u \cdot (\dot{x} \cdot \cos \beta + \dot{z} \cdot \sin \beta)} \quad (20)$$

Отличительной особенностью уравнений является наличие в них членов, зависящих от длины частицы ℓ .

Уравнения трансцендентны и аналитического решения не имеют. Для построения траекторий относительного движения частиц полученные уравнения решали методом компьютерного моделирования в среде Simulink MatLab.

Рассчитаны траектории частиц соломистой массы. На рис. 4 представлены траектории абсолютного движения $Z(X)$ частиц в равномерном воздушном потоке при режиме сепарации: $u = 8 \text{ м/с}$, $V_a = 20 \text{ м/с}$, $\beta = 70^\circ$.

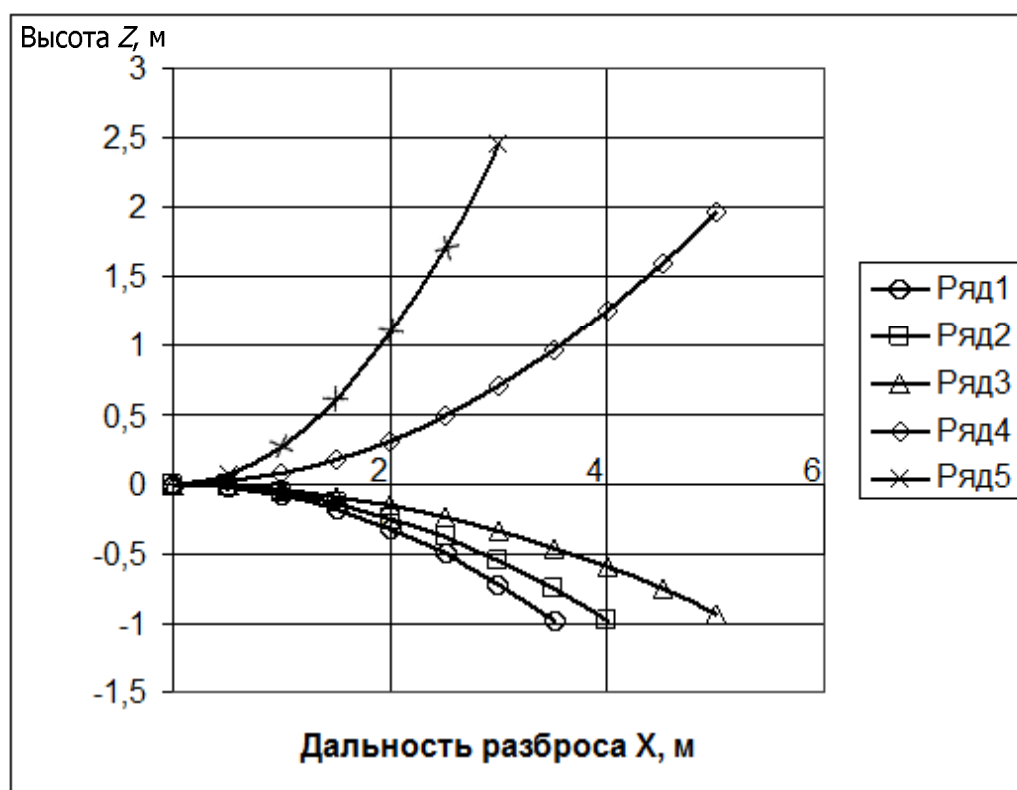


Рис. 4. Траектории движения соломистых частиц в воздушном потоке при центробежной сепарации. Длины фракций: ряд 1 — 250 мм; ряд 2 — 180 мм; ряд 3 — 100 мм; ряд 4 — 15 мм; ряд 5 — 5 мм

Результаты моделирования говорят о большой разнице в траекториях частиц лёгкой и тяжёлой фракций. Траектории отличаются так сильно, что можно говорить о сепарационных свойствах сочетания центробежного поля сил и воздушного потока.

Следует отметить быстротечность процесса сепарации. Время сепарации при скорости воздушного потока, принятой в пневмосепарирующих системах для многокомпонентного вороха, составляет по расчётам 0,1—0,3 с, что намного меньше, чем при сепарации на решётах. Следовательно, можно ожидать высокой производительности центробежного фракционирования.

Моделирование процесса разделения на фракции. Различия траекторий частиц различной массы и размеров в центробежном поле позволяют осуществлять разделение частиц длинностебельного материала. Разницу в дальности выброса самой лёгкой и тяжёлой частиц следует считать мерой фракционных свойств центробежной установки.

Процесс разделения разлетающихся частиц по фракциям осуществляется разделительными цилиндрами. Входные параметры — гранулометрический состав, радиусы сепарирующих цилиндров, высота кольцевых зазоров. Выходные — гранулометрический состав в каждом кольцевом зазоре. Зависимость между ними описывается методами статистики при помощи гистограмм и является наиболее информативным показателем фракционных свойств установки. Однако получение таких показателей достаточно трудоёмко.

Более наглядным для практики показателем является толщина потока. Величина толщины потока равна расстоянию между точками пересечения крайних траекторий с наклонной образующей конической поверхности разделителей. Угол наклона рекомендуется принимать 30 градусов.

Толщина потока увеличивается с увеличением диаметров конуса разделителя. Однако минимальный радиус, определяющий начало образующей конуса, не должен превышать дальность полёта самой тяжёлой фракции на уровне условного пола.

Проведённые расчёты по структурным моделям в среде Simulink показали, что при изменении длины солоmistых частиц от 250 до 100 мм дальность полёта фракции составляет примерно 1,5 высоты диска над уровнем условного пола. Этого позволяет делать окна разделительных конусов достаточно большими, чтобы избежать забивания. Устанавливая разделительные перегородки через 300 мм, можно легко получать необходимое разделение на 3 фракции, что в большинстве случаев вполне приемлемо для практики.

Выводы. Результаты моделирования разброса частиц свидетельствуют о принципиальной возможности реализации процесса фракционирования длинностебельных материалов центробежным бесситовым разбрасывающим рабочим органом.

Библиографический список

1. Московский, М. Н. Вопросы экономического применения солоmistой подстилки в ПТФ в условиях ЮФО / М. Н. Московский, А. Д. Гришков, А. В. Погорелов: мат-лы междунар. научн.-практ. конф. 4—5 марта 2010 г., Ростов-на-Дону, 2010. — С. 346—350.

2. Теория, конструкция и расчёт сельскохозяйственных машин / Е. С. Босой и др. — Москва: Машиностроение, 1977. — 568 с.

Материал поступил в редакцию 08.04.2012.

References

1. Moskovskij, M. N. Voprosy` e`konomicheskogo primeneniya solomistoj podstilki v PTF v usloviyax YuFO / M. N. Moskovskij, A. D. Grishkov, A. V. Pogorelov: mat-ly` mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. 4—5 marta 2010 g., Rostov-na-Donu, 2010. — S. 346—350. — In Russian.

2. Teoriya, konstrukciya i raschyot sel`skoxozyajstvenny`x mashin / E. S. Bosoj i dr. — Moskva: Mashinostroenie, 1977. — 568 s. — In Russian.

CENTRIFUGAL FRACTIONATION OF LONG-STALKED MATERIALS

I. V. Ignatenko, A. V. Pogorelov

(Don State Technical University)

The screenless centrifugal fractionation approach is offered for the fractionation of the long-stalked agricultural materials lengthways. The screenless centrifugal fractionation device and its analytical model are described. The basic processes are specified – accelerating particles with the centrifugal disc, spreading in the annular aerodynamic channel, and assorting with the partitioning cylinders. The mathematical simulation of the particle acceleration with the centrifugal disc and the dropped particles motion in the unward airflow processes is carried out. The computer-based experiment is conducted. Paths of particles in the annular aerodynamic channel are obtained. The paths differ so greatly that it is possible to state the separating properties of the centrifugal force field and airflow combination. The recommendations on the arrangement of the partitioning cylinders are given. The simulation results imply the feasibility of assorting the long-stalked materials with the centrifugal tool at the cost of the differences in particle spreading paths in the airflow.

Keywords: agricultural raw materials processing, centrifugal fractionation, air flow, mathematical simulation, computer-based experiment.