

Механизация

УДК 631.361.43

DOI:10.31857/S2500262720040171

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЗЕРНА
ПО РАБОЧИМ ОРГАНАМ ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКОГО ШЕЛУШИТЕЛЯ

Ю.Ф. Лачуга¹, академик РАН,
Р.И. Ибятгов², Б.Г. Зиганшин², доктора технических наук,
Ю.Х. Шогенов¹, член-корреспондент РАН,
А.В. Дмитриев², кандидат технических наук

¹Российская академия наук,
119991, Москва, Ленинский проспект, 32а
²Казанский государственный аграрный университет,
420015, Казань, ул. К. Маркса, 65
E-mail: zigan66@mail.ru

Целью исследований было определение возможности управления работой пневмомеханического шелушителя зерна крупяных культур изменением угловых скоростей вращения его основных рабочих органов – лопастного диска (ротора) и деки для обеспечения оптимальных условий шелушения (снятия цветковой оболочки с зерна). На основе модельного представления потока воздуха изучено изменение и направление скорости зерна под действием воздушного потока противоположного направления, создаваемого реверсивной декой. Представлена математическая модель движения зерна в рабочем пространстве пневмомеханического шелушителя, учитывающая реальную аэродинамику вращающегося воздушного потока, где эффективность шелушения определяется скоростью и направлением полета зерна. На основе численной реализации этой модели сделан вывод о том, что величина скорости зерна при ударе о деку в основном обусловлена угловой скоростью вращения диска и практически не зависит от угловой скорости вращения деки. Направление скорости зерна при ударе преимущественно связано с угловой скоростью вращения деки и кривизны лопасти у кромки диска. Модель дает возможность управлять работой шелушителя, изменяет угловые скорости вращения диска и деки, влияет на направление удара зерна о деку и величину ударного взаимодействия, что позволяет создать оптимальные условия для шелушения.

MODELING OF GRAIN MOTION TRAJECTORY BY WORKING ELEMENTS OF
PNEUMOMECHANICAL PEELING MACHINE

Lachuga Yu.F.¹, Ibyatov R.I.², Ziganshin B.G.², Shogenov Yu.H.¹, Dmitriev A.V.²

¹Russian Academy of Sciences, 119991, Moskva, Leninskiy prosp., 32a
²Kazan State Agrarian University, 420015, Kazan, ul. K. Marxa, 65
E-mail: zigan66@mail.ru

Efforts are underway to determine governing parameters of the pneumomechanical peeling machine for grain crops. The rotor speed of blade disk (rotor) and deck are changing to provide the optimum conditions for peeling (removal of films (outer shells) from the grain. The airflow modeling is to find variation in velocity and motion direction of the grains when the gas flows in the opposite direction produced by a variable deck. A mathematical model of grain motion in the working space of the pneumomechanical machine is presented, taking into account real flow dynamics of rotating airflow, where the peeling efficiency depends on the speed and flight direction of the grain. The simulation results of the mathematical model of grain motion trajectory by working elements of the pneumomechanical machine reveal that the grain velocity on its impact with the deck is most determined by the disc speed and is mainly independent of the deck speed. In contrast, the direction of the grain velocity, in this case, depends primarily on the deck speed and curvature of the blade at the disc edge. The developed model makes it possible to control the operation of the peeling machine by changing the speeds of the disc and deck, influencing the direction of the grain impact on the deck and the value of impact interaction, which allows to create the optimum conditions for peeling.

Ключевые слова: шелушение зерна, пневмомеханический шелушитель, лопастной диск, удар, траектория, зерно

Key words: grain peeling, pneumomechanical peeling machine, blade disk, impact, trajectory, grain

Основной рабочий орган машин для пневмомеханического шелушения зерна – лопастной диск, который вращается внутри закрытой сверху цилиндрической поверхности (деки). На вращающийся диск подается зерновой материал, разгоняемый и выбрасываемый в направлении рабочей поверхности (деки), при ударе о которую происходит шелушение. Дека может быть неподвижна или иметь обратное вращение вокруг лопастного диска [1-3].

Теоретические исследования движения зерна по рабочим органам машин, в том числе по лопастному диску, и взаимодействия с рабочими поверхностями представлены в работах [4-10]. Однако при функционировании пневмомеханического шелушителя с вращающейся декой движение зерна после отрыва от лопастного диска имеет сложный характер и изучен недостаточно. Эффективность

шелушения в этом случае в большей степени определяется скоростью и направлением полета зерна в момент его соударения со стенкой деки, что в свою очередь зависит от скорости вращения ротора и деки. Выбор оптимальных конструктивных и технологических параметров возможен при наличии математической модели полета зерна, учитывающей реальную аэродинамику вращающегося воздушного потока, приближенную к реальной [11-13].

Целью настоящего исследования было определение возможности управления работой пневмомеханического шелушителя зерна крупяных культур изменением угловых скоростей вращения его основных рабочих органов – лопастного диска (ротора) и деки для обеспечения оптимальных условий шелушения (снятия цветковых оболочек зерна).

Методика. Свободный полет зерна после его срыва с ротора можно считать горизонтальным из-за достаточно большой скорости и малой рабочей зоны $R_2 - R_1$. Падение зерна вниз под действием сил гравитации и движения воздушного потока незначительное, его влиянием на время полета и эффективность шелушения можно пренебречь. Тогда математическую модель движения зерна можно строить в упрощенной двухмерной постановке.

Движение воздушного потока между вращающимися ротором и декой является осесимметричным и стационарным. Несмотря на небольшое расстояние между вращающимися частями, поток имеет трехмерный характер. Вблизи ротора преобладает вращательно-радиальное течение потока воздуха, а около деки оно становится вращательно-осевым. На аэродинамические характеристики потока влияют как режимные параметры, так и конструктивные особенности установки. Причем в большей степени следует учитывать особенности верхней части деки, а также угол наклона ее образующей. Поэтому расчет реальной аэродинамической обстановки возможен при решении уравнений Навье-Стокса в трехмерной постановке, что вызывает небольшие осложнения. В данной работе на основе модельного представления потока воздуха исследовано изменение скорости зерна и ее направления под действием воздушного потока противоположного направления, создаваемого реверсивной декой.

Конструкция деки заметно ограничивает приток воздуха в рабочую зону аппарата. Поэтому можно считать, что между ротором и декой тангенциальная компонента скорости потока преобладает над другими составляющими. Тогда тангенциальная компонента скорости движения потока W_θ в полярных координатах (r, φ) может быть описана соотношением [14, 15]:

$$W_\theta = \frac{r^2 - R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{\omega_2 R_2^2}{r} + \frac{R_2^2 - r^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{\omega_1 R_1^2}{r},$$

где R_1, R_2 – радиусы лопастного диска и деки, м; ω_1, ω_2 – частота вращения лопастного диска и деки, c^{-1} .

Поскольку ротор и дека вращаются в противоположных направлениях, между ними существует поверхность $r = r_0$, где тангенциальная скорость равняется нулю. Множество таких точек в двухмерном представлении назовем нулевой линией. Положение нулевой линии определим с учетом условия $W_\theta(r_0) = 0$:

$$r_0 = R_1 R_2 \sqrt{\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2 R_2^2 - \omega_1 R_1^2}}.$$

Наличие двух зон с противоположным направлением движения воздушного потока оказывает достаточное влияние на траекторию полета зерна. Управляя положением нулевой линии и временем нахождения движущейся частицы в разных зонах, можно воздействовать на скорость и направление полета зерна в момент его удара о движущуюся стенку деки. Эти величины – основные при построении модели упругого удара зерна и собственно процесса шелушения.

Скорость потока в радиальном направлении можно представить в виде функции:

$$V_r = V_0 f\left(\frac{R_2 - r}{R_2 - R_1}\right).$$

Она меняется от максимального значения V_0 у кромки диска до нуля на стенке деки.

Движение зерна в кольцевой щели после отрыва от ротора можно описать с помощью следующих дифференциальных уравнений [9]:

$$\frac{dW_3}{dt} = K_n |W_\theta - W_3| (W_\theta - W_3), \quad (1)$$

$$\frac{dV_3}{dt} = -K_n (V_\theta - V_3)^2, \quad (2)$$

где $K_n = 3c \rho_\mu / 4d\rho_3$ – коэффициент парусности зерна; c – коэффициент аэродинамического сопротивления; ρ_μ – плотность воздуха, кг/м^3 ; ρ_3 – плотность зерна, кг/м^3 ; d – эквивалентный диаметр зерна, м; (V_3, W_3) – компоненты скорости зерна в радиальном и окружном направлениях, м/с.

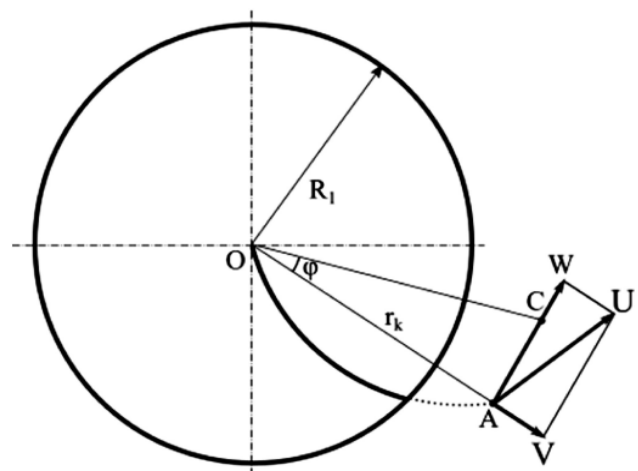


Рис. 1. Траектория движения зерна (пояснения в тексте).

По известным скоростям можно определить траекторию движения зерна. Изменение координаты зерна за время Δt в тангенциальном направлении составит $AC = W_3 \Delta t$ (рис. 1). Из треугольника OAC определим тангенс элементарного угла $\Delta\varphi$:

$$\text{tg} \Delta\varphi = \frac{W_3 \Delta t}{r}.$$

Отсюда после предельного перехода $\Delta t \rightarrow 0$ получим уравнения движения зерна по тангенциальному направлению:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{W_3}{r}. \quad (3)$$

Перемещение частицы в сторону деки по радиальному направлению – следствие компонентов скоростей V_3 и W_3 . Вклад каждой из этих составляющих следует определять отдельно.

Удаление зерна от центра за счет радиальной составляющей скорости является тривиальным, оно описывается уравнением:

$$\frac{dr}{dt} = V_3, \quad (4)$$

Для определения вклада тангенциальной составляющей скорости на перемещение частицы по радиаль-

ному направлению воспользуемся треугольником OAC . Обозначим через $r_k = OA$ текущую радиальную координату зерна. При повороте радиус-вектора r_k на угол φ длина текущего радиуса увеличится до значения:

$$r = \frac{r_k}{\cos \varphi}.$$

Найдем производную от функции r по переменной φ :

$$\frac{dr}{d\varphi} = \frac{r_k \sin \varphi}{\cos^2 \varphi}.$$

Отсюда с учетом

$$\frac{dr}{dt} = \frac{dr}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

получим:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{W_3 \sin \varphi}{\cos^2 \varphi}. \quad (5)$$

Перемещения, вызванные радиальными и тангенциальными составляющими скоростей, складываются. Объединяя уравнения (4) и (5), окончательно получим:

$$\frac{dr}{dt} = V_3 + \frac{W_3 \sin \varphi}{\cos^2 \varphi}. \quad (6)$$

Таким образом, расчет траектории зерновки в области между ротором и декой сводится к решению системы четырех дифференциальных уравнений (1), (2), (3), (6) при начальных условиях:

$$t = 0: \quad r = R_l, \quad \varphi = \varphi_H, \quad W_3 = W_{3H}, \quad V_3 = V_{3H},$$

где φ_H – начальная координата, град; (V_{3H}, W_{3H}) – компоненты начальной скорости зерна в полярной системе координат, м/с.

Как показали экспериментальные исследования, качество шелушения зависит от направления и величины вектора скорости зерна в момент соударения со стенкой деки. Для определения этих параметров были проведены численные расчеты. Некоторые результаты численных расчетов приведены на рисунках 2-4.

Результаты и обсуждение. Обозначим через β значения угла между радиус-вектором и направлением вектора скорости в момент срыва зерна с кромки диска, через α – значения угла между нормалью к стенке деки и вектора скорости в момент удара. Допустим, что в принятой цилиндрической системе координат угол α имеет положительное значение. При вращении деки в обратном направлении возникает зона воздушного потока с противоположным направлением движения. Под влиянием воздушного потока меняется траектория полета и уменьшается угол удара. Благоприятный для шелушения удар происходит при значении угла $\alpha = 0$.

На рис. 2 приведена зависимость угла падения зерна от скорости вращения диска при различных значениях скорости вращения деки. Из рисунка видно, что при больших значениях скорости вращения диска значение угла α становится больше нуля. Удар под прямым углом отмечен при скорости вращения диска около 27 с^{-1} для $\omega_2 = -15 \text{ с}^{-1}$ и при скорости вращения диска около 18 с^{-1} для $\omega_2 = -10 \text{ с}^{-1}$.

Направление вектора скорости зерна в момент его срыва с кромки диска также сильно влияет на угол удара α . Направление скорости зерна в начале полета задает-

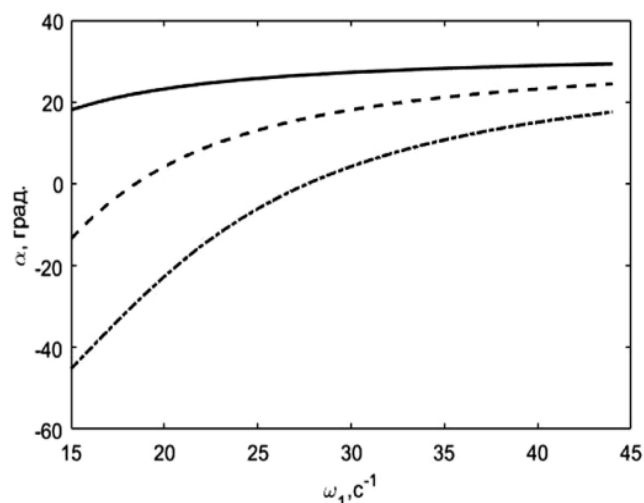


Рис. 2. Зависимость угла падения зерна от скорости вращения диска при различных значениях скорости вращения деки для $\beta=15^\circ$: штрихпунктирная линия – $\omega_2 = -15 \text{ с}^{-1}$, разрывная – $\omega_2 = -10 \text{ с}^{-1}$, сплошная – $\omega_2 = -5 \text{ с}^{-1}$.

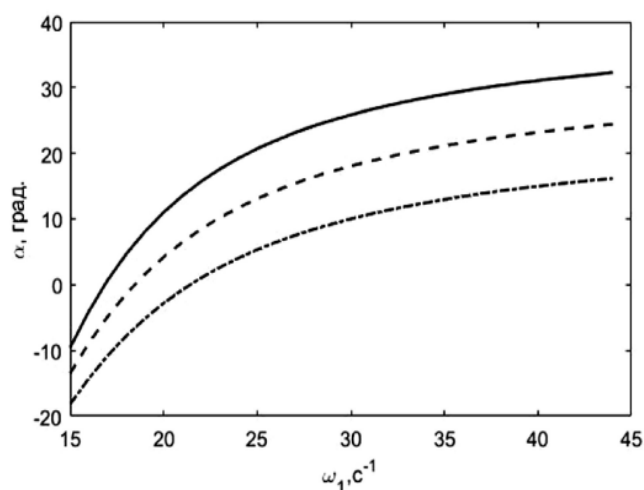


Рис. 3. Зависимость угла падения зерна от скорости вращения диска при различных значениях направления бросковой лопасти для $\omega_2 = -10 \text{ с}^{-1}$: штрихпунктирная линия – $\beta = 5^\circ$, разрывная – $\beta = 15^\circ$, сплошная – $\beta = 25^\circ$.

ся геометрией бросковой лопасти, форма которой также может стать объектом оптимизации.

Некоторые результаты численных расчетов показаны на рис. 3. Как видим, при малых углах β воздушный поток, создаваемый вращением деки, легко поворачивает траекторию зерна. Следовательно, удар зерна под прямым углом можно обеспечить при небольших скоростях вращения деки.

На рис. 4 представлена зависимость нормальной составляющей скорости зерна в момент удара от скорости вращения диска при различных значениях угла срыва β . Как видим, нормальная составляющая скорости зерна в момент удара прямо пропорциональна скорости вращения диска. В то же время для обеспечения необходимого удара по нормальному направлению при малых углах β требуются более высокие значения скорости вращения диска. Поскольку скорость зерна при ударе определяется скоростью вращения диска и практически не зависит

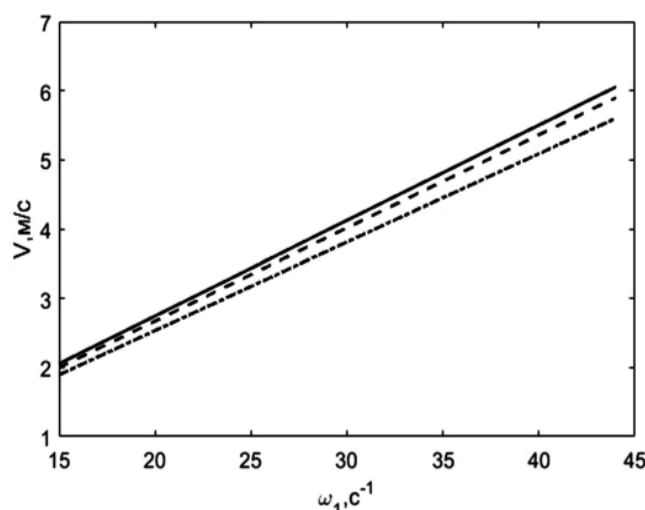


Рис. 4. Зависимость нормальной составляющей скорости зерна в момент удара от скорости вращения диска для $\omega_2 = -5 \text{ с}^{-1}$: сплошная линия – $\beta=10^\circ$; разрывная – $\beta=20^\circ$; штрихпунктирная – $\beta=30^\circ$.

от скорости вращения деки, появляется возможность оптимального управления работой пневмомеханического шелушителя.

На основе численной реализации представленной математической модели можно сделать следующий вывод. Величина скорости зерна при его ударе о деку в большей степени определяется угловой скоростью вращения диска и практически не зависит от угловой скорости вращения деки; направление скорости зерна при ударе преимущественно обусловлено угловой скоростью вращения деки и кривизной лопасти у кромки диска.

Использование модели дает возможность управлять работой шелушителя, изменяет угловые скорости вращения диска и деки, влияя тем самым на направление удара зерна о деку и величину ударного взаимодействия, что позволяет создать оптимальные условия для шелушения.

Литература

- Ибяттов Р.И., Дмитриев А.В., Лотфуллин Р.Ш. Исследование движения зерна в рабочем пространстве пневмомеханического шелушителя // *Техника и оборудование для села*. – 2018. – N 2. – С 18-21.
- Лотфуллин Р.Ш., Ибяттов Р.И., Дмитриев А.В. К определению силы удара зерна о деку пневмомеханического шелушителя // *Техника и оборудование для села*. – 2015. – N 10. – С 38-40.
- Нуруллин Э.Г. Пневмомеханические шелушители зерна (теория, конструкция, расчет). – Казань: Казан. Ун-т, 2011. – 308 с.
- Халиуллин Д.Т., Дмитриев А.В., Хафизов Р.Н., Яровой М.Н. Исследование движения воздушно-зерновой смеси в рабочей зоне семенорушки аэромеханического типа // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. – 2019. – N 4 (63). – С. 27-37.
- Халиуллин Д.Т., Лукманов Р.Р. Теоретическое обоснование некоторых параметров семенорушки пневмомеханического типа // *Журнал Фундаментальные исследования*. – 2015. – N 11 (часть 3). – С. 516-519.
- Бадретдинов И.Д., Мударисов С.Г. Оптимизация параметров пневматической системы зерноочистительной машины // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. – 2011. – N 1. – С. 6-7.
- Belinsky A., Ziganshin B., Valiev A., Haliullin D., Galiev I., Adigamov N. Theoretical investigation of increasing efficiency of combine harvester operation on slopes. Paper presented at the Engineering for Rural Development. – 2006. – V. 18. – С. 206-213. doi:10.22616/ERDev2019.18.N252.
- Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Шогенов Ю.Х. Развитие интенсивных машинных технологий, роботизированной техники, эффективного энергообеспечения и цифровых систем в агропромышленном комплексе // *Техника и оборудование для села*. – 2019. – N 7(265). – С. 2-7. ISSN 2072-9642.
- Патент № 179017 РФ. Дозирующая система пневматического высевающего устройства / Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Гайко О.А. // Патент на полезную модель RU 179017 U1, 25.04.2018. Заявка № 2017130910 от 01.09.2017.
- Халиуллин Д.Т., Нуруллин Э.Г. Исследование движения зерна в конфузоре пневмомеханического обрушивателя семян подсолнечника // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. – 2010. – Т. 5. – N 4 (18). – С. 122-124.
- Шогенов Ю.Х., Васильев В.А., Третьяков Н.Н., Миронова Е.А., Моисеев В.Ю., Романовский Ю.М. Математическое моделирование электрических сигналов в проводящей системе растения // *Известия ТСХА*. – 1999. – Вып. 2. – С. 114-128.
- Холпанов Л.П., Ибяттов Р.И. Моделирование гидродинамики многофазных гетерогенных сред в центробежном поле // *Теоретические основы химической технологии*. – 2009. – Т. 43. – N 5. – С. 534-546.
- Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1. – М.: Наука, 1987. – 464 с.
- Kholpanov L.P., Ibyatov R.I. Mathematical modeling of the dispersed phase dynamics // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2005. – Т. 39. – N 2. – С. 190-199.
- Лачуга Ю.Ф., Ксендзов В.А. Теоретическая механика. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: КолосС, 2010. – 576 с. (учебники и учебные пособия для студентов высш. учеб. заведений). ISBN 978-5-9532-0798-0.

Поступила в редакцию 21.03.20

После доработки 10.04.20

Принята к публикации 05.05.20