

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ДВИЖЕНИЯ ЗЕРНА В ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКОМ ШЕЛУШИТЕЛЕ

Ю.Ф. Лачуга¹, академик РАН, Р.И. Ибятгов², доктор технических наук,
Ю.Х. Шогенов¹, член-корреспондент РАН, Б.Г. Зиганшин², доктор технических наук,
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

Исследования проводили с целью определения параметров оптимизации и повышения эффективности работы пневмомеханического шелушителя. Рассматривали движение зерна в рабочем пространстве пневмомеханического шелушителя, образованном вращающимся лопастным ротором и реверсивной декой, которая вращается вокруг него в обратном направлении. Работу выполняли с учетом ранее проведенных исследований, в которых рассматривали тангенциальное движение зерна и воздушного потока в пространстве между ротором и декой. Математическую модель движения зерна строили в двумерной постановке и решали в лагранжевой системе координат с учетом скоростей и дифференциальных характеристик движения воздушного потока, описанных в эйлеровой системе координат. Траектория движения зерновки, в том числе ее скорость и угол контакта при соударении со стенкой деки зависят от рабочих скоростей вращения ротора и деки, угла срыва зерновки с вращающегося ротора и ее коэффициента парусности. При увеличении угловой скорости вращения деки ω_2 меняется угол наклона вектора скорости зерновки α при её соударении со стенкой деки. Изменяя величину угла срыва β можно регулировать угол соударений зерновки с декой. Скорость движения зерновки и угол её соударения с декой зависят от физических параметров самой зерновки. Поэтому угол срыва β и угловая скорость вращения деки ω_2 могут быть использованы как параметры оптимизации пневмомеханического шелушителя.

RESULTS OF NUMERICAL CALCULATION OF GRAIN MOVEMENT IN A PNEUMATIC MECHANICAL HULLER

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

¹Russian Academy of Sciences,
119991, Moskva, Leninskii prosp., 14

²Kazan State Agrarian University,
420015, Kazan', ul. K. Marksa, 65
E-mail: zigan66@mail.ru

The research aimed to determine the parameters of optimisation and increase the efficiency of the pneumatic-mechanical peeler. We considered the movement of grain in the working space of a pneumatic-mechanical peeler formed by a rotating bladed rotor and a reversible deck that rotates around it in the opposite direction. The work was carried out taking into account previous studies, which considered the tangential movement of grain and air flow in the space between the rotor and the deck. The mathematical model of grain movement was built in a two-dimensional formulation and calculated in the Lagrangian coordinate system, considering the velocities and differential characteristics of the air flow described in the Euler coordinate system. The trajectory of the grain movement, including its speed and contact angle upon impact on the deck wall, depend on the operating speeds of rotation of the rotor and deck, the angle of separation of the grain from the rotating rotor and its windage coefficient. With an increase in the angular velocity of rotation of the deck ω_2 , the angle of inclination of the grain velocity vector α changed when it collided with the wall of the deck. By changing the value of the stall angle β , it is possible to control the angle of collision of the grain with the deck. The speed of grain movement and the angle of its impact with the deck depend on the physical parameters of the grain itself. Therefore, the stall angle β and the angular speed of rotation of the deck ω_2 can be used as parameters for optimizing the pneumatic-mechanical peeler.

Ключевые слова: пневмомеханический шелушитель, траектория зерна, лагранжевая система координат, эйлеровая система координат, численные расчеты.

Key words: pneumatic-mechanical peeler; grain trajectory; Lagrangian coordinate system; Euler coordinate system; numerical calculations.

Как известно, один из вариантов рабочего органа машины для пневмомеханического шелушения зерна – лопастной диск (ротор), который вращается внутри закрытой сверху цилиндрической деки, имеющей обратное вращение вокруг ротора [1, 2, 3]. На ротор подается зерновой материал, разгоняемый и выбрасываемый в направлении деки, при ударе о которую происходит шелушение [4, 5]. Ранее было рассмотрено тангенциальное движение воздушного потока в пространстве между ротором и декой, которые вращаются в противоположных направлениях. Исходя из технологических соображений, объем поступающего

потока воздуха в рабочую зону дозируется с помощью конструкционных элементов шелушителя. Поэтому радиальной и вертикальной составляющими скоростей воздушного потока можно пренебречь. Формула для описания движения воздушного потока при выполнении указанных допущений была выведена ранее [6].

Эффективность шелушения зерновых культур при ударе о внутреннюю стенку деки зависит от многих факторов. В первую очередь, необходимо обеспечить требуемую силу удара, достаточную для разбивания оболочки зерновки. Как известно, наибольшая сила возникает при вертикальном падении тел. Поэтому

важно определение закономерностей влияния различных факторов на траекторию движения зерновки, в том числе на ее скорость и угла контакта при соударении со стенки деки. Все эти характеристики сильно зависят от скоростей вращения рабочих узлов, угла срыва зерновки с вращающегося диска и ее коэффициента парусности.

Из-за вращения диска и деки во встречных направлениях, между ними возникают две зоны с противоположными направлениями движения воздушного потока. Они оказывают сильное влияние на траекторию полета зерен. Кроме того, на неё влияет угол срыва зерновки с диска, поскольку от величины этого показателя зависит время нахождения зерновки в зоне обратного вращения потока воздуха. Управляя положением нулевой линии и временем нахождения движущейся частицы в разных зонах, можно влиять на скорость и направление полета зерновки в момент ее удара о движущуюся стенку деки. Это основополагающие характеристики в процессе шелушения.

Движение зерновки после ее срыва с ротора можно считать горизонтальным, поскольку расстояние между вращающимися ротором и декой относительно не большое. С другой стороны, вращающийся ротор, своей лопастью придаёт зерну большую скорость полета, достаточную для его шелушения. В таких условиях возможное осаждение зерновки в вертикальном направлении не существенно. Поэтому математическая модель движения зерна строится в двухмерной постановке [7, 8, 9].

Цель исследований – определение параметров оптимизации и повышения эффективности работы пневмомеханического шелушителя.

Методика. Для описания движения дисперсных частиц в воздушном потоке существует разные подходы [10, 11, 12]. Мы в своей работе решали векторное уравнение движения зерновки в лагранжевой системе координат с учетом скоростей и дифференциальных характеристик движения воздушного потока, описанных в эйлеровой системе координат [13, 14, 15]. Согласно такому подходу, уравнение движения зерновки в рабочем пространстве аппарата можно представить в виде следующего дифференциального уравнения:

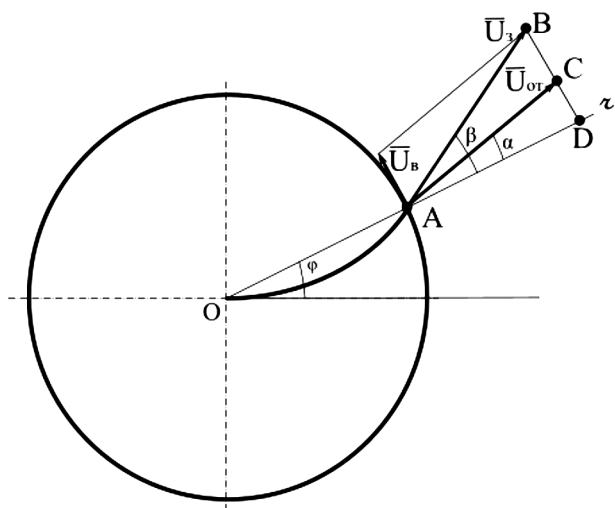


Рис. 1. К расчету траектории движения зерна $\vec{U}_3, \vec{U}_B, \vec{U}_{OT}$ – вектора скоростей зерна, воздушного потока и относительной скорости, м/с; α – угол наклона относительной скорости, рад; β – угол срыва зерна с кромки диска, рад; (r, φ) – полярные координаты.

$$\frac{d\vec{U}_3}{dt} = -k(\vec{U}_3 - \vec{U}_B)^2, \quad (1)$$

где \vec{U}_3, \vec{U}_B – вектора скоростей зерна и воздушного потока, м/с; $k=3c_p \rho_a^2 / 4d\rho_z$ – коэффициент парусности зерновки, 1/м (где c_p – коэффициент сопротивления воздушному потоку, зависящий от формы зерна и свойств его поверхности; ρ_a – плотность воздуха, кг/м³; ρ_z – плотность зерновки, кг/м³; d – эквивалентный диаметр зерновки, м).

Скорость зерна представим в виде суммы скорости воздушного потока и относительной скорости $\vec{U}_3 = \vec{U}_B + \vec{U}_{OT}$. Направления относительной скорости зададим углом α , равным значению угла поворота от радиальной оси системы координат Or до вектора относительной скорости зерна (рис. 1).

В качестве положительного направления угла поворота возьмем направление против часовой стрелки. При этом диапазон изменения угла α в интервале $(0, \pi/2]$ будет соответствовать полету зерновки по направлению вращения ротора, в интервале $[-\pi/2, 0)$ – по направлению вращения деки.

Если относительную скорость представить как вектор $\vec{U}_{OT} = (u \cos \alpha, u \sin \alpha) = u\vec{e}$, то уравнение (1) запишется в виде:

$$\frac{d\vec{U}_3}{dt} = -ku^2\vec{e}. \quad (2)$$

Здесь $\vec{e} = (e_1, e_2) = \cos \alpha \cdot \vec{i} + \sin \alpha \cdot \vec{j}$ – единичный вектор относительной скорости; \vec{i} и \vec{j} – орты цилиндрической системы координат (r, φ) .

После подстановки зависимости $\vec{U}_3 = \vec{U}_B + u\vec{e}$, с учетом стационарности воздушного потока, уравнение (2) примет следующий вид:

$$\left(\frac{du}{dt} + ku^2\right)\vec{e} + u\frac{d\vec{e}}{dt} = -(\vec{U}_B \cdot \vec{v})\vec{U}_B - (\vec{U}_{OT} \cdot \vec{v})\vec{U}_B.$$

С помощью известных формул векторного анализа правую часть этого уравнения можно расписать в ортогональной системе координат. Для моделирования движения зерновки в пневмомеханическом шелушителе, полученное векторное уравнение было расписано в цилиндрической системе координат (r, φ) . После ряда трудоемких преобразований были получены следующие обыкновенные дифференциальные уравнения для модуля относительной скорости и угла ее направления:

$$\frac{du}{dt} = -ku^2 - (P_r + E_r) \cos \alpha - (P_\varphi + E_\varphi) \sin \alpha, \quad (3)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = (P_r + E_r) \frac{\sin \alpha}{u} - (P_\varphi + E_\varphi) \frac{\cos \alpha}{u}, \quad (4)$$

где

$$P_r = V_B \frac{\partial V_B}{\partial r} + \frac{W_B}{r} \frac{\partial V_B}{\partial \varphi} - \frac{W_B^2}{r},$$

$$P_\varphi = V_B \frac{\partial W_B}{\partial r} + \frac{W_B}{r} \frac{\partial W_B}{\partial \varphi} + \frac{V_B W_B}{r},$$

$$E_r = u \left[\cos \alpha \frac{\partial V_B}{\partial r} + \frac{\sin \alpha}{r} \frac{\partial V_B}{\partial \varphi} - \sin \alpha \frac{W_B}{r} \right],$$

$$E_\varphi = u \left[\cos \alpha \frac{\partial W_B}{\partial r} + \frac{\sin \alpha}{r} \frac{\partial W_B}{\partial \varphi} + \sin \alpha \frac{V_B}{r} \right],$$

где через V_a, W_a обозначены компоненты вектора скорости воздушного потока, направленные по осям r и φ .

Для численного решения системы уравнений (3), (4) необходимо задавать начальные условия $u(0)$ и $\alpha(0)$ при $t=0$. Состояния векторов скоростей воздушного потока \vec{U}_B , зерновки \vec{U}_3 и относительной скорости \vec{U}_{OT} в начале полета (см. рис. 1). В момент

срыва зерна с вращающегося диска угол β , то есть направление вектора скорости зерна \vec{U}_3 известен. Это угол наклона касательной к лопасти на кромке ротора, который задается как исходная характеристика аппарата. Тангенциальная составляющая воздушного потока \vec{U}_B перпендикулярна к радиусу вектора Or . Угла наклона вектора относительной скорости зерна $\vec{U}_{от}$ в начале полета необходимо вычислить. На рис. 1 он обозначен как $\alpha = \angle CAD$. Из прямоугольного треугольника ABD имеем $\angle ABD = 90^\circ - \beta$. Тогда углы треугольника ABC определяются следующими соотношениями: $\angle BAC = \beta - \alpha$, $\angle ABC = 90^\circ - \beta$, следовательно, $\angle ACB = 180^\circ - \angle ABC - \angle BAC = 90^\circ + \alpha$. Стороны треугольника равны модулям соответствующих векторов скоростей: $BC = |\vec{U}_B|$, $AC = |\vec{U}_{от}|$, $AB = |\vec{U}_3|$.

Запишем для треугольника ABC теорему косинусов:

$$|\vec{U}_{от}|^2 = |\vec{U}_B|^2 + |\vec{U}_3|^2 - 2|\vec{U}_B| \cdot |\vec{U}_3| \cos \angle ABC.$$

Отсюда находим:

$$u(0) = \sqrt{|\vec{U}_B|^2 + |\vec{U}_3|^2 - 2|\vec{U}_B| \cdot |\vec{U}_3| \sin \beta}. \quad (5)$$

Теперь применим теорему синусов:

$$\frac{\sin \angle ABC}{|\vec{U}_{от}|} = \frac{\sin \angle BAC}{|\vec{U}_B|}.$$

С учетом равенства $\sin(90^\circ - \beta) = \cos \beta$ это соотношение примет вид:

$$\sin(\beta - \alpha) = \frac{|\vec{U}_B|}{|\vec{U}_{от}|} \sin(90^\circ - \beta). \quad (6)$$

Итак, для вычисления направления вектора относительной скорости зерновки, в момент ее срыва с диска, окончательно получим:

$$\alpha(0) = \beta - \arcsin\left(\frac{|\vec{U}_B|}{u(0)} \cos \beta\right). \quad (7)$$

Проведем предварительный анализ построенных начальных условий (5) и (7). При уменьшении угла β , значение функции $\sin \beta$ то же уменьшается. Поэтому, как следует из формулы (5), при уменьшении угла срыва модуль относительной скорости $u(0)$ возрастает. В предельном случае $\beta \rightarrow 0$ получим зависимость $u^2 = |\vec{U}_B|^2 + |\vec{U}_3|^2$. Следовательно, когда вектора \vec{U}_B и \vec{U}_3 перпендикулярны, при увеличении любого из них относительная скорость возрастает. Если $\beta = 0$, то формула (6) примет вид:

$$\sin(-\alpha) = \frac{|\vec{U}_B|}{|\vec{U}_{от}|}$$

Поэтому, поскольку функция $\sin(\alpha)$ является нечетной, угол наклона $\alpha(0)$ в момент срыва зерновки с диска будет отрицательным.

Если зерновка срывается по направлению касательной к ротору, то формула (5) преобразуется к виду $u(0) = \vec{U}_3 - \vec{U}_B$, а зависимость (7) примет вид $\alpha(0) = \beta$. Следовательно, при условии $\beta = 90^\circ$ направление векторов скоростей зерновки \vec{U}_3 и воздушного потока \vec{U}_B совпадают, а относительная скорость равна их разности.

Результаты проведенного анализа свидетельствуют, что построенные зависимости (5) и (7) обоснованы, они согласуются с реальной картиной движения зерновки на границах возможного диапазона задания начальных условий. Таким образом, относительная скорость зерновки u и угла ее направления α могут быть вычислены с использованием дифференциальных уравнений (3)-(4) при начальных условиях (5) и (7).

Для расчета траектории движения зерна по известным значениям модуля относительной скорости

и угла ее направления необходимы соответствующие уравнения по радиальным и угловым координатам. Движение зерновки по тангенциальному направлению происходит благодаря ее окружной скорости и описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{W_B + u \sin \alpha}{r}. \quad (8)$$

Перемещение зерновки в сторону деки по радиальному направлению является следствием двух скоростей – V_3 и W_3 . Вклад радиальной составляющей скорости V_3 тривиальный и описывается уравнением:

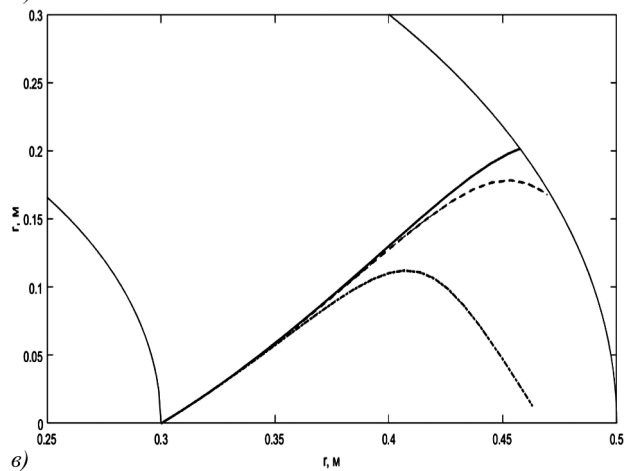
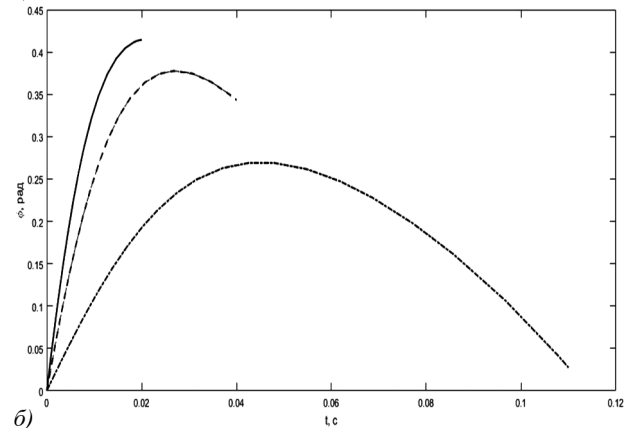
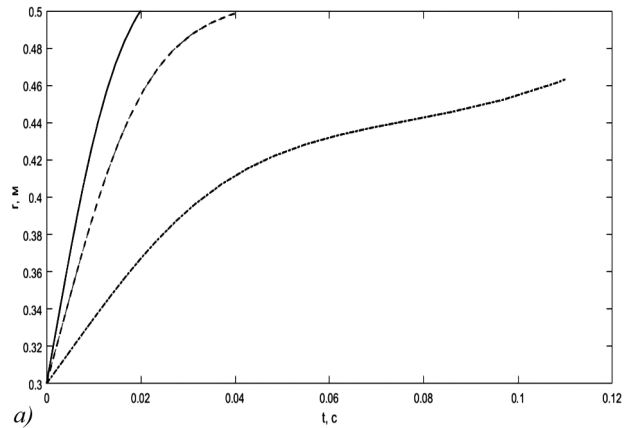


Рис. 2. Изменение радиальной (а) и угловой (б) координат зерновки, а также траектории зерна (в) при различных скоростях вращения диска для $\omega_2 = -15 \text{ с}^{-1}$, $\beta = 45^\circ$, $k=7$: сплошная линия – $\omega_1 = 60 \text{ с}^{-1}$, пунктирная линия – $\omega_1 = 40 \text{ с}^{-1}$, штрихпунктирная линия – $\omega_1 = 15 \text{ с}^{-1}$.

$$\frac{dr_1}{dt} = V_B + u \cos \alpha.$$

Движение зерновки в тангенциальном направлении сопровождается ее удалением от центра вращения. Для вычисления вклада тангенциальной составляющей скорости зерновки в ее перемещение по радиальному направлению можно использовать уравнение [7]:

$$\frac{dr_2}{dt} = (W_B + u \sin \alpha) \frac{\sin \varphi}{\cos^2 \varphi}.$$

Перемещения по радиальной координате, вызванные радиальными и тангенциальными составляющими скоростей зерновки, складываются: $r = r_1 + r_2$. Поэтому

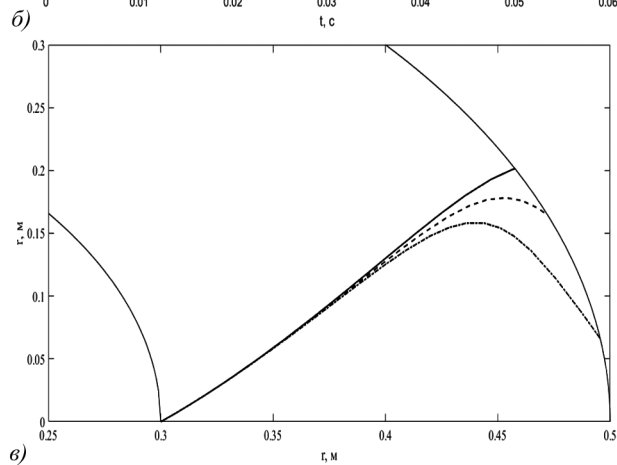
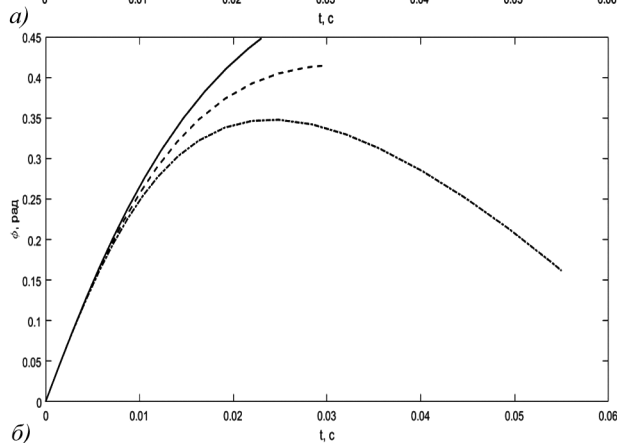
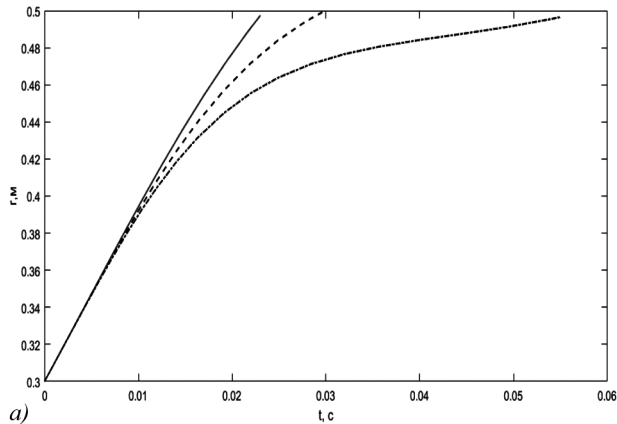


Рис. 3. Изменение радиальной (а) и угловой (б) координат зерновки, а также траектории ее движения (в) при различных скоростях вращения деки для $\omega_1 = 40 \text{ с}^{-1}$, $\beta = 45^\circ$, $k=7$: сплошная линия – $\omega_2 = -10 \text{ с}^{-1}$, разрывная линия – $\omega_2 = -15 \text{ с}^{-1}$, штрихпунктирная линия – $\omega_2 = -20 \text{ с}^{-1}$.

для расчета движение зерновки по радиальному направлению получим уравнение:

$$\frac{dr}{dt} = V_B + u \cos \alpha + (W_B + u \sin \alpha) \frac{\sin \varphi}{\cos^2 \varphi}. \quad (9)$$

Уравнения (8) и (9) решаются при следующих начальных условиях:

$$t = 0: \quad r = R_1, \quad V_3 = V_3(0) + u(0) \cos \alpha(0), \quad (10)$$

$$\varphi = \varphi_{\text{вр}}, \quad W_3 = \omega_1 R_1 + u(0) \sin(\alpha(0)).$$

Таким образом, траектория движения зерновки может быть рассчитана с использованием системы обыкновенных дифференциальных уравнений (3), (4),

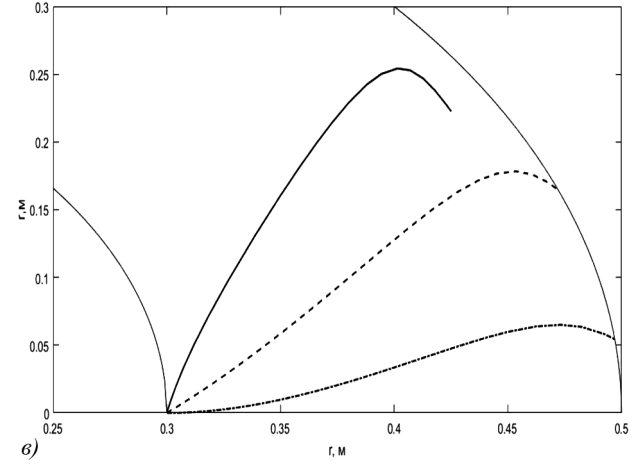
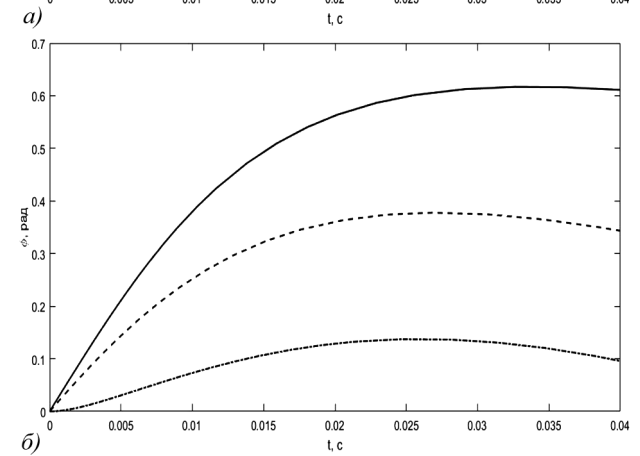
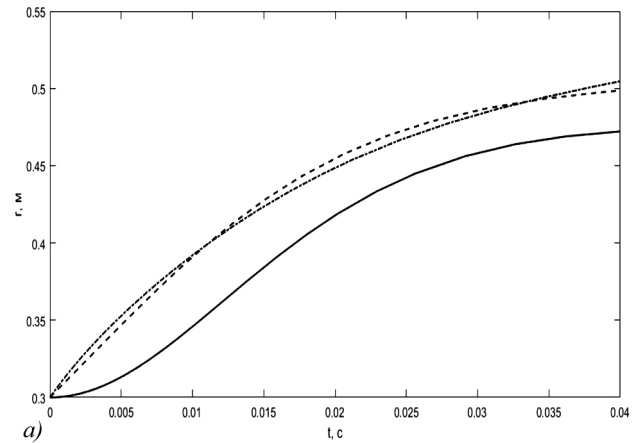


Рис. 4. Изменение радиальной (а) и угловой (б) координат зерновки, а также траектории ее движения (в) при различных значениях угла срыва для $\omega_1 = 40 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = -15 \text{ с}^{-1}$, $k=7$: сплошная линия – $\beta = 90^\circ$, пунктирная линия – $\beta = 45^\circ$, штрихпунктирная линия – $\beta = 0^\circ$.

(8) и (9) при начальных условиях (5), (7), (10), которые могут быть решены численно.

Результаты и обсуждение. Численными расчетами были определены изменения радиальных и угловых координат, а также характерные формы траектории движения зерновки, в зависимости от скоростей вращения диска и деки, угла срыва и коэффициента парусности зерна. Согласно расчетам, проведенным по уравнениям (8) и (9), параметры движения зерновки зависят, прежде всего, от скорости вращения диска. На начальном участке движения, чем больше скорость вращения, тем быстрее растут координаты r и φ (рис. 2). Однако после попадания в зону движения воздушного потока в обратном направлении, интенсивность удаления зерновки от центра замедляется. При небольших скоростях вращения диска угловая координата начинает уменьшаться (см. рис. 2б), следовательно, зерновка увлекается воздушным потоком в обратном направлении.

При больших значениях скорости вращения диска ω_1 траектория доходит до стенки деки без значительных искривлений (рис. 2в). Искривление траектории связано с наличием обратного потока воздушной массы, интенсивность которого зависит от скорости вращения деки.

Анализ зависимости формы траектории и координат местоположения зерновки от скорости вращения деки ω_2 указывает на то, что при ее увеличении искривления координатных линий r и φ усиливаются (рис. 3), соответственно, меняется угол наклона вектора скорости зерновки в момент ее соударения со стенкой деки.

На поведение зерновки в рабочей зоне шелушителя сильно влияет угол срыва β (рис. 4). Особенно сильные изменения происходят с угловой координатой φ . Путем подбора угла β можно регулировать величину угла соударения зерновки с декой. Следовательно, конструктивный параметр β и режимный параметр ω_2 могут быть использованы как параметры оптимизации пневмомеханического шелушителя.

Результаты проведенного анализа показывают, что движения и угол соударения зерновки с декой могут сильно меняться при изменении ее физических параметров, которые в математической модели участвуют через коэффициент парусности k . По мере его увеличения возрастает искривление траектории (рис. 5). При этом степень влияния парусности зер-

новки увеличивается по мере роста угла срыва β . Это объясняется тем, что при больших углах срыва время нахождения и размер участка траектории зерновки в зоне обратного потока увеличивается.

Таким образом, при увеличении угловой скорости вращения деки ω_2 меняется угол наклона вектора скорости зерновки α при её соударении со стенкой деки. На зерновку, находящуюся в рабочей зоне шелушителя сильное влияние оказывает угол срыва β . Изменяя его величину можно регулировать угол соударений зерновки с декой. Необходимо отметить зависимость скорости движения зерновки и угла её соударения с декой и от физических параметров самой зерновки. Поэтому угол срыва β и угловая скорость вращения деки ω_2 могут быть использованы как параметры оптимизации пневмомеханического шелушителя.

Литература.

1. Анисимов А.В., Рудик Ф.Я. Результаты теоретического определения конструктивных и кинематических параметров рабочих органов шелушительной машины // *Инженерные технологии и системы*. 2020. Т. 30. № 4. С. 594–608.
2. Моделирование в среде SolidWorks Flow Simulation гидродинамики процессов шелушения и шлифования при переработке зерна / Э.П. Дяченко, Л.М. Титова, Н.П. Дяченко и др. // *Вестник машиностроения*. 2016. № 2. С. 55–58.
3. Салыхов Д.В., Невзоров В.Н., Мацкевич И.В. Совершенствование технологии переработки зерна пшеницы на роторно-лопастном шелушителе // *Вестник КрасГАУ*. 2020. № 3(156). С. 157–163.
4. Тишанинов К.Н. Теория взаимодействия частиц потока зерна // *Наука в центральной России*. 2015. № 1(13). С. 76–87.
5. Курманов А.К., Камышева Н.А. Математическая модель процесса дробления зерна в измельчителе ударно-центробежного типа // *Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева*. 2020. № 4. С. 131–135.
6. Ибятов Р.И., Дмитриев А.В., Лотфуллин Р.Ш. Исследование движения зерна в рабочем пространстве пневмомеханического шелушителя // *Техника и оборудование для села*. 2018. №2. С. 18–21.
7. Моделирование траектории движения зерна по рабочим органам пневмомеханического шелушителя / Ю.Ф. Лачуга, Р.И. Ибятов, Б. Г. Зиганшин и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2020. № 4. С. 73–76.
8. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Лаптева Е.А. Турбулентная миграция тонкодисперсных частиц в эмульсиях и суспензиях в напорных гидроциклонах // *Инженерно-физический журнал*. 2020. Т. 93. № 4. С. 819–824.
9. Лаптев А.Г., Башаров М.М. Математическая модель переноса и осаждения тонкодисперсных частиц в турбулентном потоке эмульсий и суспензий // *Инженерно-физический журнал*. 2018. Т. 91. № 2. С. 377–386.
10. Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Ч.1. 464 с.
11. Движение частицы при нелинейных колебаниях газа в открытой трубе в безударно-волновом режиме / Д.А. Губайдуллин, Р.Г. Зарипов, Л.А. Ткаченко и др. // *Инженерно-физический журнал*. 2015. Т. 88. № 4. С. 843–847.

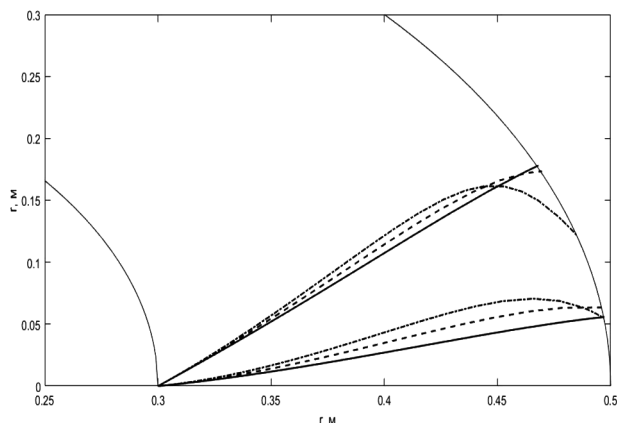


Рис. 5. Зависимость траектории зерна от коэффициента парусности для $\omega_1 = 30 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 15 \text{ с}^{-1}$: сплошная линия – $k=2$, пунктирная линия – $k=4$, штрихпунктирная линия – $k=6$ (в верхней группе $\beta=45^\circ$, в нижней – $\beta=10^\circ$).

12. Губайдуллин Д.А., Осипов П.П., Закиров А.Н. Диаграммы направления дрейфа частицы в стоячей волне с учетом силы Бассэ // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 3. С. 601–608.
13. Метод расчета траектории движения зерна в пневмомеханическом шлушителе / Ю.Ф. Лачуга, Р.И. Ибяттов, Ю.Х. Шогенов и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 6. С. 64–67.
14. Некрасов А.К., Некрасова Е.И., Холтанов Л.П. Математическое моделирование динамики дисперсной фазы при неизотермической свободной конвекции гетерогенной среды в вертикальном цилиндрическом реакторе // Теоретические основы химической технологии. 2008. Т. 42. № 2. С. 152–160.
15. Упрощенная модель движения капли в газовом потоке / А.М. Бренер, Н.П. Болгов, М.Т. Казиев и др. // Теоретические основы химической технологии. 1987. Т. 21. № 1. С. 126–130.

Поступила в редакцию 17.05.2022
После доработки 03.07.2022
Принята к публикации 22.08.2022