

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНО-ЗЕРНОВОЙ СМЕСИ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ СЕМЕНОРУШКИ АЭРОМЕХАНИЧЕСКОГО ТИПА

Дамир Тагирович Халиуллин<sup>1</sup>  
Андрей Владимирович Дмитриев<sup>1</sup>  
Рамиль Наилович Хафизов<sup>1</sup>  
Михаил Николаевич Яровой<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный аграрный университет

<sup>2</sup>Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Подсолнечник является ведущей масличной культурой России, а продукты его переработки составляют большую часть выручки сельскохозяйственного экспорта. На протяжении многих лет в аграрных вузах России ведутся исследования по изысканию новых высокоэффективных технических решений для переработки семян различных культур в условиях сельхозтоваропроизводителя. Одной из таких разработок является машина для отделения плодовой оболочки от ядра (семенорушка) аэромеханического типа. Отличительной особенностью этой машины является применение в конструкции дополнительного рабочего органа, выполненного в виде сетчатого конфузора, расположенного в нагнетательном патрубке вентилятора-метателя. Целью работы является математическое моделирование движения семян в рабочих зонах семенорушки аэромеханического типа. При проведении исследования использованы положения газодинамики и аналитической геометрии. На величину и направление воздушного потока в рабочих зонах семенорушки влияют геометрические параметры основных рабочих органов. Согласно проведенным исследованиям, составляющие скорости воздушного потока в поперечном и продольном направлениях изменяются по длине конфузора, а на траекторию движения зерна в конфузоре семенорушки влияют аэродинамические свойства семян, параметры воздушного потока, а также конструктивно-технологические параметры основных рабочих органов и их поверхностей. Разработанные математические модели, описывающие движение воздушно-зерновой смеси в рабочей зоне, позволяют построить номограмму по расчету параметров сетчатого конфузора и сегмента сферы. Численные решения предложенных математических моделей позволяют графически изобразить траекторию перемещения семени подсолнечника в основных рабочих зонах семенорушки аэромеханического типа с учетом направления и скорости движения воздушного потока, физико-механических и технологических свойств самого семени и обосновать основные конструктивно-технологические параметры машины.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: семенорушка, шелушение, воздушно-зерновая смесь, аэромеханика, конфузор.

## INVESTIGATION OF AIR-GRAIN MIXTURE MOTION IN THE WORKING AREA OF AEROMECHANICAL HULLER

Damir T. Khaliullin<sup>1</sup>  
Andrey V. Dmitriev<sup>1</sup>  
Ramil N. Khafizov<sup>1</sup>  
Mikhail N. Yarovoy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Agrarian University

<sup>2</sup>Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

Sunflower is the leading oilseed crop in Russia, and its processed products make up the majority of agricultural export revenue. For many years, the staff scientists of different agrarian universities and institutions in Russia carry on investigations aiming at finding new highly effective technical solutions for processing seeds of various crops in the conditions of an agricultural producer. One of these developments is an aeromechanical machine (a huller) for separation of the oil fruit coat from the kernel. The distinction of this machine is an additional working body in the design made in the form of a meshed confuser located in the discharge pipe of the blower fan. The research was devoted to mathematic simulation of the motion of the sunflower seeds in the working areas of the airomechanical huller. The study was based on the concepts and essentials of gas dynamics and analytical geometry. As far as is known, the volume

and direction of the air flow in the working areas of the huller are affected by the geometric parameters of the main working bodies. The research has shown that the components of velocity of the air flow in the transverse and longitudinal directions change according to the length of the confuser, and the grain motion trajectory in the confuser is affected by the aerodynamic properties of seeds, airflow data, as well as structural and technological parameters of the main working bodies and their surfaces. The developed mathematical models describing air-grain mixture motion in the working area allow the authors to plot a nomogram for calculation the parameters of the mesh confuser and the sphere segment. Due to numerical calculations of the proposed mathematical models they graphically presented the sunflower seed motion trajectory in the main working bodies of an aeromechanical huller taking into account the direction and speed of the air flow, physical, mechanical and technological properties of the seed, and justify the main design and technological parameters of the device.

KEYWORDS: huller, grain scouring, air-grain mixture, aeromechanics, confuser.

### **В**ведение

На протяжении многих лет основной масличной культурой России является подсолнечник, ему принадлежит ведущая роль в формировании сырьевой базы отечественной масложировой промышленности: удельный вес растительного масла в общем объеме производства составляет 79,2%. Подсолнечник в структуре аграрного экспорта занимает второе место после зерна. При этом следует отметить, что если зерно вывозится как первичное сырье, то экспорт подсолнечника осуществляется в основном после глубокой переработки его семян в виде растительного масла [5, 8]. Однако уровень использования производственных мощностей при производстве растительных масел не отличается стабильностью и зависит от объемов производства сельскохозяйственного сырья, поэтому и в настоящее время актуальным является поиск резервов повышения рентабельности производства семян подсолнечника [5, 8, 9, 11, 12].

Продукты, полученные из подсолнечника, имеют важное значение и широко используются как в пищевой промышленности, так и при производстве кормов для сельскохозяйственных животных. В течение многих лет в аграрных вузах России, в том числе и в Казанском государственном аграрном университете, ведутся исследования по изысканию новых высокоэффективных технических решений для переработки зерна и семян различных сельскохозяйственных культур (в том числе и подсолнечника) в условиях сельхозтоваропроизводителя [2, 4, 6, 10].

При переработке семян подсолнечника одной из важных технологических операций, определяющей качество полученной продукции, является обрушивание – отделение наружных оболочек зерна от ядра. Существует множество машин для выполнения данной операции, отличающихся друг от друга как по способу воздействия на перерабатываемый продукт, так и по конструктивным особенностям рабочих органов [7]. Одной из таких разработок является семенорушка аэромеханического типа, отличительной особенностью которой является применение в конструкции дополнительного рабочего органа, выполненного в виде сетчатого конфузора, расположенного в нагнетательном патрубке вентилятора-метателя [6].

Теоретические аспекты движения зерна в воздушном потоке и взаимодействия с рабочими поверхностями нашли отражение в работах многих ученых [1, 3, 10, 13, 14, 15, 16]. При этом актуальным остается обоснование конструктивно-технологических параметров сетчатого конфузора, оказывающего влияние на эффективность обрушивания, так как недостаточно внимания уделено теории взаимодействия воздушно-зерновой смеси с его поверхностью.

**Целью** настоящей работы является теоретическое исследование процесса движения воздушно-зерновой смеси в рабочих зонах аэромеханической семенорушки, взаимодействия смеси с рабочими поверхностями конфузора и построение соответствующих математических моделей.

### **Материалы и методы**

При исследовании движения воздушно-зерновой смеси использованы положения газодинамики и аналитической геометрии.

В разработанной семенорушке аэромеханического типа, технологическая схема которой представлена на рисунке 1, процесс обрушивания происходит следующим образом. Семена из бункера 1, попадая на лопасти ротора вентилятора-метателя 2, разгоняются и взаимодействуют с рабочими поверхностями рабочих органов: сетчатого конфузора 6 и отражательной пластины 7 в виде сегмента сферы. Далее перерабатываемый материал выводится из машины через осадитель 5 для разделения по фракциям [10].

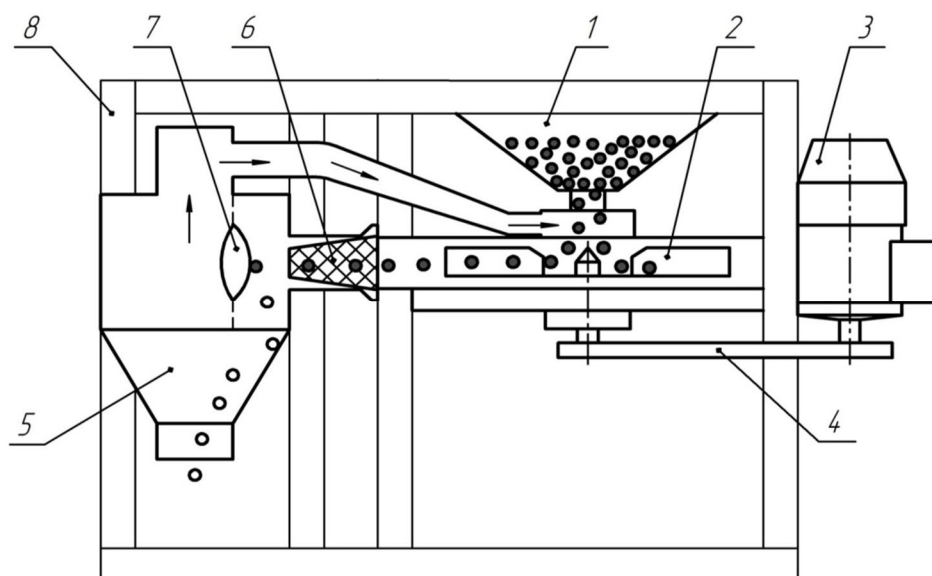


Рис. 1. Технологическая схема работы семенорушки аэромеханического типа:  
 1 – бункер для зернового материала; 2 – вентилятор-метатель; 3 – электродвигатель привода;  
 4 – ременная передача с вариатором; 5 – осадитель; 6 – удлинитель нагнетательного патрубка  
 с сетчатым конфузуром внутри; 7 – отражательная пластина в виде сегмента сферы;  
 8 – рама; ● – целые семена; ○ – рушанка; → – воздух

Значимым фактором, влияющим на качественные показатели процесса обрушивания (шелушения), являются силы, которые оказывают влияние на семена в рабочей зоне при их взаимодействии с поверхностями конфузора и зависят как от конструктивных параметров конфузора, так и от характера воздушного потока.

Для анализа траектории движения воздушно-зерновой смеси и ее взаимодействия с рабочими органами семенорушки аэромеханического типа необходимо провести исследование схемы движения семян подсолнечника в потоке воздуха после отражения от рабочих поверхностей конфузора (рис. 2).

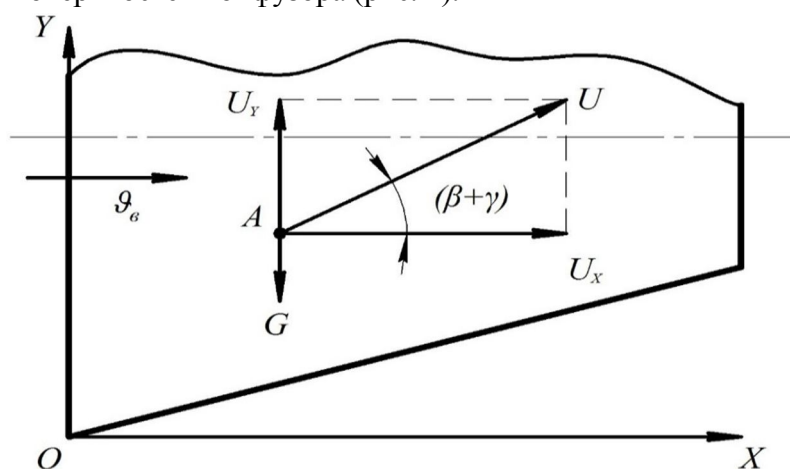


Рис. 2. К анализу движения семени подсолнечника в конфузуре семенорушки аэромеханического типа

Рассмотрим дифференциальные уравнения (1) и (2) движения семян подсолнечника в потоке воздуха и в неподвижной плоской системе координат  $XOY$  [3, 7]:

$$m_3 \frac{dU_x}{dt} = k_c F_c \rho_6 \frac{|\vartheta_x - U_x|(\vartheta_x - U_x)}{2}, \quad (1)$$

$$m_3 \frac{dU_y}{dt} = k_c F_c \rho_6 \frac{|\vartheta_y - U_y|(\vartheta_y - U_y)}{2} - m_3 g, \quad (2)$$

где  $m_3$  – масса одного семени, кг;

$F_c$  – площадь миделевого сечения семени,  $m^2$ ;

$\rho_6$  – плотность воздушного потока,  $kg/m^3$ ;

$k_c$  – коэффициент сопротивления семени подсолнечника;

$\vartheta_x$  – проекция скорости воздушного потока на ось  $OX$ ,  $m/c$ ;

$U_y$  – проекция скорости семени на ось  $OY$ ,  $m/c$ ;

$U_x$  – проекция скорости семени на ось  $OX$ ,  $m/c$ ;

$\vartheta_y$  – проекция скорости воздушного потока на ось  $OY$ ,  $m/c$ ;

$g$  – ускорение свободного падения,  $m^2/c$ .

Решим уравнения (1) и (2), учитывая начальные условия при  $t_0 = 0$  [3]:

$$U_{x0} = A = \frac{k_6 U_n \sin \beta}{\sin \gamma} \cos(\beta + \gamma), \quad (3)$$

$$U_{y0} = B = \frac{k_6 U_n \sin \beta}{\sin \gamma} \sin(\beta + \gamma), \quad (4)$$

где  $U_n$  – скорость семени в момент удара,  $m/c$ ;

$k_6$  – коэффициент восстановления семян при ударе;

$\gamma$  – угол между направлением скорости семени и гранью конфузора, град.;

$\beta$  – угол раскрытия конфузора, град.

В связи с тем что геометрическая форма семян подсолнечника не сферическая, то для дальнейших расчетов применяем понятие эквивалентного диаметра – диаметра сферического тела, объем которого равен объему одного семени. Кроме этого, в уравнениях (1) и (2) (в правой части) находятся абсолютные значения относительных скоростей семян, а после их преобразования необходимо учитывать соотношение скорости семян и скорости воздушного потока. Так как воздушный поток может способствовать не только увеличению скорости семян, но и замедлению, то при раскрытии соответствующих модулей введем обозначение  $k_n$  – коэффициент парусности

$$k_n = \mp \frac{3 k_c \rho_6}{4 d \rho_3}.$$

С учетом вышеизложенного уравнения (1) и (2) примут вид:

$$\frac{dU_x}{dt} = k_n (\vartheta_x - U_x)^2, \quad (5)$$

$$\frac{dU_y}{dt} = k_n (\vartheta_y - U_y)^2 - g. \quad (6)$$

При перемещении семян подсолнечника в воздушном потоке, направление движения которого совпадает с направлением движения семян (т. е. когда  $U_x < \vartheta_x$ ,  $U_y < \vartheta_y$ ), коэффициент парусности стоит со знаком плюс, в противном случае – со знаком минус.

Проведем интегрирование этих уравнений. Переменные уравнения (5) разделяются

$$\frac{dU_x}{k_n (\vartheta_x - U_x)^2} = dt. \quad (7)$$

После интегрирования уравнения (7) получим

$$\frac{1}{k_n(\vartheta_x - U_x)} = t + C_1. \quad (8)$$

Постоянная интегрирования  $C_1$  определяется из начального условия (3). После применения условия (3) имеем

$$C_1 = \frac{1}{k_n(\vartheta_x - A)},$$

где  $A = \frac{k_a U_n \sin \beta}{\sin \gamma} \cos(\beta + \gamma)$ .

Тогда уравнение (8) запишется как

$$\frac{1}{k_n(\vartheta_x - U_x)} = t + \frac{1}{k_n(\vartheta_x - A)}. \quad (9)$$

После несложных преобразований находим

$$U_x = \vartheta_x - \frac{\vartheta_x - A}{k_n t (\vartheta_x - A) + 1}. \quad (10)$$

Теперь проинтегрируем уравнение (6). Из-за незначительности влиянием силы тяжести можно пренебречь. Кроме того, считаем, что  $\vartheta_y = 0$ . Тогда уравнение (6) запишется в виде

$$\frac{dU_y}{dt} = k_n (\vartheta_y - U_y)^2. \quad (11)$$

Интегрируя это уравнение методом разделения переменных, имеем

$$\frac{1}{k_n(\vartheta_y - U_y)} = t + C_2. \quad (12)$$

Из начального условия (4) определим постоянную интегрирования

$$C_2 = \frac{1}{k_n(\vartheta_y - B)},$$

где  $B = \frac{k_a U_n \sin \beta}{\sin \gamma} \sin(\beta + \gamma)$ .

Подставляя в уравнение (12) значение  $C_2$ , получим

$$U_y = \vartheta_y - \frac{\vartheta_y - B}{k_n t (\vartheta_y - B) + 1}. \quad (13)$$

По известным скоростям семян их траекторию движения можно определить из системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = U_x, \\ \frac{dy}{dt} = U_y. \end{cases} \quad (14)$$

Эти уравнения решаются при следующих начальных условиях:  $t = 0$ ,  $x = x_0$ ,  $y = 0$ .

Если скорость воздушного потока считать постоянной ( $\vartheta_e = const$ ) и направленной по оси  $X$  ( $\vartheta_x = \vartheta_e$ ,  $\vartheta_y = 0$ ), тогда уравнения (5) и (6) решаются аналитически.

Проведем разделение переменных первого уравнения системы (14)

$$dx = \mathcal{G}_e dt - \frac{(\mathcal{G}_e - A) dt}{k_n t (\mathcal{G}_e - A) + 1}. \quad (15)$$

Проинтегрировав выражение (15), получим

$$x = \mathcal{G}_e t - \frac{1}{k_n} \ln |k_n t (\mathcal{G}_e - A) + 1| + C_3. \quad (16)$$

При начальных условиях  $t = 0, x_0 = 0$  имеем  $C_3 = 0$ . Тогда уравнение (16) запишется в следующем виде:

$$x = \frac{1}{k_n} \left( \ln \left| t + \frac{1}{A - \mathcal{G}_e} \right| - \ln \left| \frac{1}{A - \mathcal{G}_e} \right| \right) + \mathcal{G}_e t. \quad (17)$$

Теперь проведем интегрирование второго уравнения системы (14), которое после разделения переменных записывается как

$$dy = \frac{B dt}{1 - k_n B t}. \quad (18)$$

Проинтегрировав уравнение (18), получим

$$y = -\frac{1}{k_n} \ln |1 - k_n B t| + C_4. \quad (19)$$

При начальных условиях  $t = 0, y_0 = 0$  имеем  $C_4 = 0$ .

Тогда окончательно уравнение (19) запишется в виде

$$y = -\frac{\ln |1 - k_n B t|}{k_n}. \quad (20)$$

Из уравнений (17) и (20) можно исключить время, взяв  $t$  из уравнения (20)

$$t = \frac{1 - e^{-y k_n}}{k_n B}. \quad (21)$$

Подставив равенство (21) в уравнение (17), получим зависимость, которая позволяет рассчитать траекторию семянки

$$x = \frac{1}{k_n} \left( \ln \left| \frac{1 - e^{-y k_n}}{k_n B} + \frac{1}{A - \mathcal{G}_e} \right| - \ln \left| \frac{1}{A - \mathcal{G}_e} \right| \right) + \mathcal{G}_e \frac{1 - e^{-y k_n}}{k_n B}. \quad (22)$$

Величина и направление компонентов скорости воздушного потока изменяются по длине конфузора в зависимости от его геометрических параметров (рис. 3).

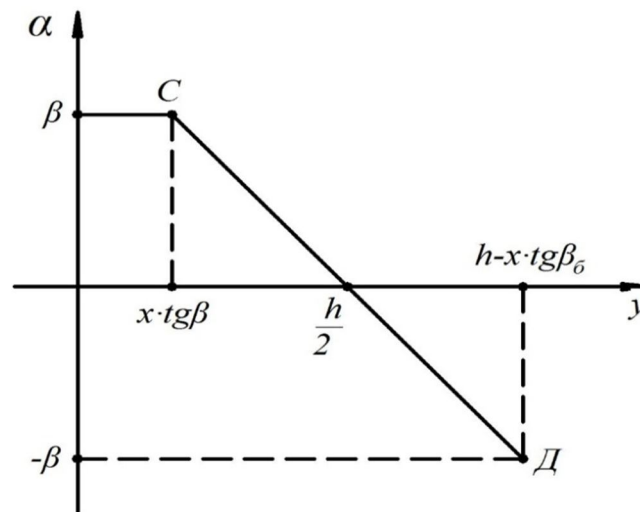


Рис. 3. К определению значений угла наклона направления скорости воздушного потока

Исследуем характер взаимодействия воздушного потока с гранями конфузора (верхней и нижней) в некотором сечении  $x$ . В этом сечении область взаимодействия воздушного потока с гранями конфузора находится в интервалах от  $(x \operatorname{tg} \beta)$  до  $(h - 2x \operatorname{tg} \beta)$ . Здесь направление скорости воздушного потока отклоняется на определенный угол  $\alpha$ , который изменяется от  $\beta$  до  $-\beta$ , а в центральной части канала равен нулю [10].

В дальнейших расчетах изменение значения угла  $\alpha$  примем пропорциональным.

Рассмотрим прямую, проходящую через точки  $C$  и  $D$  (рис. 3), и запишем ее уравнение

$$\frac{y - x \operatorname{tg} \beta}{h - 2x \operatorname{tg} \beta} = \frac{\alpha - \beta}{-2\beta}. \quad (23)$$

Решив уравнение (23), получим значение угла  $\alpha$

$$\alpha = \frac{h - 2y}{h - 2x \operatorname{tg} \beta} \beta. \quad (24)$$

Запишем уравнения для определения продольных и поперечных компонентов воздушного потока в конфузоре:

$$\vartheta_x = \vartheta(x) \cos \alpha; \quad \vartheta_y = \vartheta(x) \sin \alpha. \quad (25)$$

Так как  $\sin(-\alpha) = -\sin(\alpha)$  и  $\cos(-\alpha) = \cos(\alpha)$ , то выражения (24) и (25) достоверны от нижней поверхности конфузора до верхней, т. е. по всему поперечному сечению. В нижней части конфузора изменение угла направления скорости воздушного потока происходит от максимального значения  $\beta$  до нуля, причем  $\vartheta_y > 0$ . В верхней части конфузора угол направления скорости воздушного потока – от нуля до минимального значения  $(-\beta)$  и сопровождается отрицательным значением составляющей  $\vartheta_y < 0$ .

Изучим перемещение воздушного потока в произвольном сечении патрубка сменнорушки аэромеханического типа, внутри которого установлен конфузор. Данное сечение образовано стенками патрубка и стенками конфузора. При исследовании учитываем прохождение воздуха (фильтрацию) через стенки конфузора (рис. 4) [10].

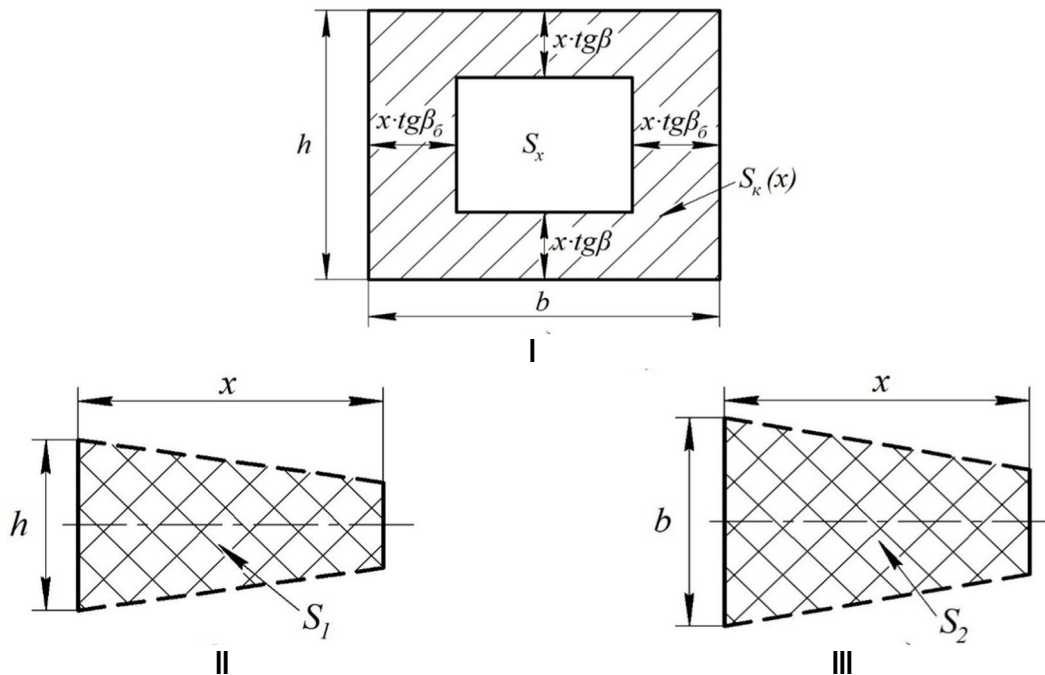


Рис. 4. Схемы произвольных сечений патрубка с конфузуром:  
 I – поперечное сечение патрубка с установленным внутри конфузуром;  
 II – продольное сечение конфузурора в вертикальной плоскости;  
 III – продольное сечение конфузурора в горизонтальной плоскости

Сужение канала конфузора необходимо для увеличения средней скорости воздушного потока, перемещающегося в нем. Изменение средней скорости воздушного потока при движении в конфузоре, с учетом его прямоугольного основания, проницаемых боковых граней и постоянстве воздушного потока, можно определить по следующей формуле:

$$\vartheta_n S_n = \vartheta(x) S_x + \vartheta_\phi S_n, \quad (26)$$

де  $\vartheta_n$  – скорость воздушного потока у основания конфузора, м/с;  
 $S_n$  – площадь поперечного сечения у основания конфузора, м<sup>2</sup>;  
 $\vartheta(x)$  – скорость воздушного потока в конфузоре на расстоянии  $x$  от его основания, м/с;  
 $S_x$  – площадь поперечного сечения конфузора на расстоянии  $x$ , м<sup>2</sup>;  
 $\vartheta_\phi$  – средняя скорость прохождения воздушного потока через боковые грани конфузора, м/с;  
 $S_n$  – площадь боковой грани конфузора на участке от его начала до точки  $x$ , м<sup>2</sup>.

Площадь поперечного сечения конфузора  $S_x$  зависит от углов у основания конфузора и определяется по следующей формуле:

$$S_x = (h - 2xtg\beta)(b - 2xtg\beta_\phi), \quad (27)$$

где  $h$  – высота сечения у основания конфузора ( $h = h_n$ , где  $h_n$  – высота нагнетательного патрубка вентилятора-метателя, м);  
 $\beta_\phi$  – угол наклона боковых граней конфузора, град.;  
 $b$  – ширина основания конфузора ( $b = B_n$ , где  $B_n$  – ширина нагнетательного патрубка вентилятора-метателя, м);  
 $\beta$  – угол наклона нижней и верхней граней конфузора, град.

Запишем уравнение скорости воздушного потока в конфузоре на некотором расстоянии  $x$  от его основания

$$\vartheta(x) = \frac{\vartheta_n S_n - S_n \vartheta_\phi}{(h - 2xtg\beta)(b - 2xtg\beta_\phi)}. \quad (28)$$

Расход воздушного потока  $Q_k(x)$ , проходящего через данное сечение конфузора, можно определить как

$$Q_k(x) = S_k(x) \vartheta_k(x), \quad (29)$$

где  $S_k(x)$  – площадь кольцевого сечения канала на расстоянии  $x$  от основания, м<sup>2</sup>;  
 $\vartheta_k(x)$  – скорость воздушного потока в кольцевом сечении  $x$ , м/с (определяется экспериментально).

Определим площадь кольцевого сечения  $x$  канала

$$S_k(x) = hb - (h - 2xtg\beta)(b - 2xtg\beta_\phi) = 2x(htg\beta_\phi + btg\beta - 2xtg\beta tg\beta_\phi). \quad (30)$$

Расход воздуха, проходящего через поверхности конфузора, определяется с учетом его площади живого сечения

$$Q_\phi(x) = \vartheta_\phi(x) x k_{ж.с.} [h + b + x(tg\beta_\phi + tg\beta)]. \quad (31)$$

Скорость воздушного потока в кольцевом канале  $\vartheta_k$  находим в определенных сечениях конфузора  $x_i$ . Скорость фильтрации воздуха также находится для отдельных конкретных зон  $[x_{i-1}, x_i]$ .

Приравняв эти расходы, определяем осредненную скорость фильтрации на выходе из канала

$$\vartheta_\phi = \frac{2(htg\beta_\phi + btg\beta - 2Ltg\beta tg\beta_\phi) \vartheta_k}{k_{ж.с.} [h + b + L(tg\beta_\phi + tg\beta)]}, \quad (32)$$

где  $L$  – длина конфузора, м.



Тогда из равенства (13), подставив выражение (17), получаем

$$g(x) = \frac{g_n bh}{(h - 2xtg\beta)(b - 2xtg\beta_0)} - \frac{2xg_n [h + b + x(tg\beta_0 + tg\beta)](htg\beta_0 + btg\beta - 2Ltg\beta tg\beta_0)}{k_{ж.с.} (h - 2xtg\beta)(b - 2xtg\beta_0)[h + b + L(tg\beta_0 + tg\beta)]} \quad (33)$$

Таким образом, с учетом воздействия параметров конфузора компоненты скорости воздушного потока могут быть вычислены с помощью следующих выражений:

$$g_x = \frac{g_n bh - S_n g_\phi}{(h - 2xtg\beta)(b - 2xtg\beta_0)} \cos\left(\frac{h - 2y}{h - 2xtg\beta} \beta\right), \quad (34)$$

$$g_y = \frac{g_n bh - S_n g_\phi}{(h - 2xtg\beta)(b - 2xtg\beta_0)} \sin\left(\frac{h - 2y}{h - 2xtg\beta} \beta\right). \quad (35)$$

### Результаты и их обсуждение

Анализ вышеизложенного показывает, что составляющие скорости воздушного потока в поперечном и продольном направлениях изменяются по длине конфузора в зависимости от его геометрических параметров.

Тогда математические зависимости для определения параметров движения семян в рабочих зонах аэромеханической семенорушки запишутся в виде:

$$\frac{dx}{dt} = g_x - \frac{g_x - A}{k_n t (g_x - A) + 1}, \quad (36)$$

$$\frac{dy}{dt} = g_y - \frac{g_y - B}{k_n t (g_y - B) + 1}. \quad (37)$$

Эти уравнения могут быть решены только численным методом на компьютере с использованием специального программного обеспечения, которое позволяет получать графические изображения траектории движения семян в сетчатом конфузоре.

В результате численных решений уравнений (36) и (37) выполнены графические изображения траекторий движения семян подсолнечника (рис. 5).

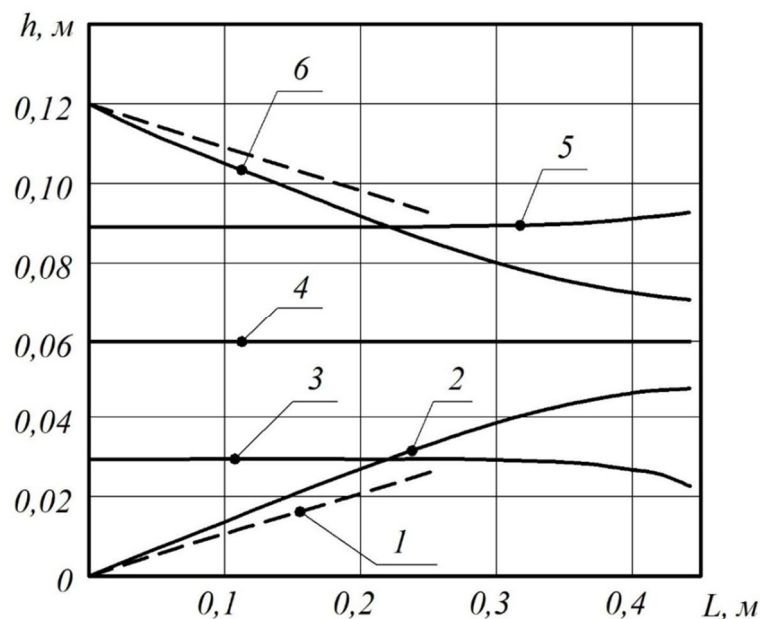


Рис. 5. К анализу траекторий движения семян в конфузоре семенорушки аэромеханического типа: 1 – грани конфузора; 2, 3, 4, 5 и 6 – траектории движения соответственно при следующих значениях  $h$ : 0; 0,03; 0,06; 0,09; 0,12

Таким образом, проведенное исследование движения воздушно-зерновой смеси в рабочей зоне семенорушки аэромеханического типа и взаимодействия семян с рабочими поверхностями конфузора позволило получить соответствующие уравнения движения, что дало возможность отобразить траекторию семян графически.

Анализируя полученные траектории движения семян подсолнечника в конфузоре семенорушки аэромеханического типа, необходимо отметить снижение скорости движения семян на расстоянии 0,3–0,4 м от основания конфузора, причем это расстояние не зависит от зоны вхождения семян в конфузор. Следовательно, длину конфузора рекомендуется использовать до 0,25–0,35 м с учетом необходимости вылета семени из него и удара об отражательную пластину в виде сегмента сферы.

### **Выводы**

Выведены зависимости, характеризующие направление и характер движения семян подсолнечника и воздушного потока в конфузоре, а также устанавливающие взаимосвязь скорости воздушного потока с конструктивными параметрами конфузора и некоторыми физико-механическими свойствами семян подсолнечника.

Полученные на основе численного решения математических моделей графические отображения траекторий движения семян подсолнечника в конфузоре семенорушки аэромеханического типа позволяют определить основные конструктивно-технологические параметры аэромеханической семенорушки.

---

### **Библиографический список**

1. Бадретдинов И.Д. Оптимизация параметров пневматической системы зерноочистительной машины / И.Д. Бадретдинов, С.Г. Мударисов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011. – № 1. – С. 6–7.
2. Движение вороха семян сахарной свеклы на гравитационном сепараторе с заданной криволинейной поверхностью / К.Р. Казаров, В.К. Астанин, В.А. Черников, О.Н. Щербаков, В.П. Евсюкова, А.А. Одиноких // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2011. – № 4 (31). – С. 51–54.
3. Ибяттов Р.И. Исследование движения зерна в рабочем пространстве пневмомеханического шелушителя / Р.И. Ибяттов, А.В. Дмитриев, Р.Ш. Лотфуллин // Техника и оборудование для села. – 2018. – № 2. – С. 18–21.
4. К вопросу шелушения зерна в пневмомеханическом шелушителе / Р.Ш. Лотфуллин, Р.И. Ибяттов, А.В. Дмитриев, Б.Г. Зиганшин // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2016. – Т. 11, № 4. – С. 84–88.
5. Низамов Р.М. История, современное состояние и перспективы возделывания подсолнечника как масличной культуры в Российской Федерации и Республике Татарстан / Р.М. Низамов, С.Р. Сулейманов, Р.Б. Зиганшин // Зерновое хозяйство России. – 2017. – № 2 (50). – С. 63–66.
6. Нуруллин Э.Г. Обоснование параметров вентилятора-метателя пневмомеханической семенорушки / Э.Г. Нуруллин, Д.Т. Халиуллин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 10. – С. 7–8.

7. Нуруллин Э.Г. Пневмомеханические шелушители зерна (теория, конструкция, расчет) : монография / Э.Г. Нуруллин. – Казань : Изд-во Казанского ун-та, 2011. – 308 с.
8. Перспективы развития регионального производства маслосемян подсолнечника / Н.Р. Александрова, А.К. Субаева, А.Р. Валиев, М.М. Низамутдинов, Б.Г. Зиганшин // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2019. – Т. 14, № 1 (52). – С. 113–119.
9. Управление работоспособностью техники с учетом условий аграрного производства / И.Г. Галиев, А.А. Мухаметшин, И.Р. Исхаков, А.Р. Шамсутдинов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2010. – Т. 5, № 3 (17). – С. 86–88.
10. Халиуллин Д.Т. Исследование движения зерна в конфузоре пневмомеханического обрушивателя семян подсолнечника / Д.Т. Халиуллин, Э.Г. Нуруллин // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2010. – Т. 5, № 4 (18). – С. 122–124.
11. Хафизов К.А. Выбор технологий и их техническое обеспечение для устойчивого развития АПК Татарстана в условиях введения экономических санкций / К.А. Хафизов, Р.Н. Хафизов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2014. – Т. 9, № 4 (34). – С. 88–94.
12. Хафизов К.А. Основные направления развития технического сервиса в АПК Татарстана / К.А. Хафизов, Р.Н. Хафизов, Н.Р. Адигамов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2014. – Т. 9, № 4 (34). – С. 95–102.
13. Шевченко А.П. Движение зерновоздушной смеси в плоском распределителе семян / А.П. Шевченко, И.О. Коробкин // Техника и оборудование для села. – 2013. – № 1. – С. 104–106.
14. Determination of speed of movement of the particle on the rotating cone with shovels / D.N. Kotov, Yu.M. Isaev, N.P. Kryuchin, N.M. Semashkin, A.N. Kryuchin // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). – 2019. – Vol. 10, Issue 2. – Pp. 1507–1514.
15. Mathematical model of interaction of seeds with the internal surface of sowing block of seed drill / N.I. Seomushkin, B.G. Ziganshin, S.M. Yakhin, B.A. Gayfullin, R.E. Vlasov // Science, Technology and Higher Education. – Westwood, Canada : Strategic Studies Institute, 2012. – Pp. 531–535.
16. Specifying Two-Phase Flow in Modeling Pneumatic Systems Performance of Farm Machines / S. Mudarisov, E. Khasanov, Z. Rakhimov, I. Gabitov, I. Badretdinov, I. Farchutdinov, F. Gallyamov, M. Davletshin, R. Aipov, R. Jarullin // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. – 2017. – Vol. 40, No. 4. – Pp. 706–715.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Дамир Тагирович Халиуллин – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования в агробизнесе ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», Россия, г. Казань, e-mail: damirtag@mail.ru.

Андрей Владимирович Дмитриев – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования в агробизнесе ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», Россия, г. Казань, e-mail: avd-work@mail.ru.

Рамиль Наильевич Хафизов – кандидат технических наук, доцент кафедры тракторы, автомобили и энергетические установки ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», Россия, г. Казань, e-mail: ramilajz@mail.ru.

Михаил Николаевич Яровой – доцент кафедры технологического оборудования, процессов перерабатывающих производств, механизации сельского хозяйства и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: jromi@mail.ru.

Дата поступления в редакцию 10.11.2019

Дата принятия к печати 23.12.2019

### AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Damir T. Khaliullin, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Machinery and Equipment in Agribusiness, Kazan State Agrarian University, Russia, Kazan, e-mail: damirtag@mail.ru.

Andrey V. Dmitriev, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Machinery and Equipment in Agribusiness, Kazan State Agrarian University, Russia, Kazan, e-mail: avd-work@mail.ru.

Ramil N. Khafizov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Tractors, Automobiles and Electric Power Facilities, Kazan State Agrarian University, Russia, Kazan, e-mail: ramilajz@mail.ru.

Mikhail N. Yarovoy, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Technological Equipment, Processing Plants' Processes, Agricultural Engineering, Health and Safety, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: jromi@mail.ru.

Received November 10, 2019

Accepted after revision December 23, 2019