

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-622847>

Оригинальное исследование



# Математическая модель поперечного сечения зерна пшеницы

В.В. Никитин, В.Н. Ожерельев, Н.В. Синяя

Брянский государственный аграрный университет, Брянск, Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** При исследовании оптимальной длины отверстий решетчатого днища наклонной камеры зерноуборочного комбайна, обеспечивающей предварительную сепарацию очесанного зернового вороха, поперечное сечение зерна пшеницы моделируется отдельно взятым шаром или конечным цилиндром. Последнее обстоятельство обусловлено формой зерновки, которая существенным образом упрощает описание технологического процесса. Однако, подобные модели поперечного сечения зерна весьма далеки от реальной формы объекта, поскольку спинная сторона зерновок выпуклая, а на брюшной стороне имеется продольная бороздка. Наиболее близкой поверхностью к реальной форме зерновки является математическая модель, представляющая собой улитку Паскаля. Для указанной модели определены координаты центра тяжести фигуры и получены уравнения для расчета площади ее поперечного сечения и моментов инерции для каждой из осей координат. Проверка полученных уравнений в программе «КОМПАС-3D» показала, что расхождение между реальными и теоретически предсказанными значениями координат центра тяжести фигуры составляет порядка 13%, что снижает адекватность расчетов и требует их уточнения.

**Цель исследований** — уточнение математической модели поперечного сечения зерна пшеницы, учитывающей геометрические свойства улитки Паскаля.

**Материалы и методы.** Объектом исследования является поперечное сечение зерна пшеницы, моделируемое улиткой Паскаля. При определении координат центра тяжести фигуры использовали методы теоретической механики, а проверку полученных выражений осуществляли в системе трехмерного моделирования «КОМПАС-3D».

**Результаты.** Получены математические выражения для аналитического нахождения координат центров тяжести для различных вариантов улитки Паскаля:  $a = b$  (кардиоида),  $a < b$  (улитка Паскаля без внутренней петли),  $a > b$  (улитка Паскаля содержит внутреннюю петлю). Проверка полученных выражений свидетельствует об их адекватности, поскольку сходимость теоретических и экспериментальных данных составляет 100%.

**Заключение.** Использование уточненных математических моделей поперечного сечения зерна пшеницы позволяет существенным образом упростить моделирование процесса сепарации очесанного вороха, а также повысить точность расчетов. Для упрощения описания этого процесса целесообразно использовать систему трехмерного моделирования «КОМПАС-3D».

**Ключевые слова:** поперечное сечение зерна пшеницы; улитка Паскаля; кардиоида; координаты центра тяжести; площадь поперечного сечения зерна.

## Как цитировать:

Никитин В.В., Ожерельев В.Н., Синяя Н.В. Математическая модель поперечного сечения зерна пшеницы // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 1. С. 91–99. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-622847>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-622847>

Original Study Article

# Mathematical model of the cross-section of wheat grain

Viktor V. Nikitin, Viktor N. Ozhereliev, Natalia V. Sinyaya

Bryansk State Agrarian University, Bryansk, Russian Federation

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** When studying the optimal length of the holes in the lattice bottom of the inclined chamber of a combine harvester, which ensures preliminary separation of the combed grain heap, the cross section of wheat grain was modeled in the shape of a separate ball or a cut cylinder. This is due to the fact that the description of the technological process is significantly simplified with this shape of grain. However, such models of the grain cross-section are very far from the real shape of the object, since the dorsal side of the grains is convex, and there is a longitudinal groove on the ventral side. The kind of surface closest to the real shape of the grain is the Pascal's snail mathematical model. For this model, the centroid coordinates are determined, and equations are obtained for calculating its cross-sectional area and moments of inertia for each coordinate axis. Verification of the obtained equations in the KOMPAS-3D software showed that the discrepancy between the real and theoretically predicted values of the centroid coordinates is about 13%, which reduces the adequacy of the calculations and requires their refinement.

**AIM:** Refinement of the mathematical model of the cross-section of wheat grain shaped as the Pascal's snail.

**METHODS:** The object of the study is a cross section of wheat grain shaped as the Pascal's snail. When determining the centroid coordinates, methods of theoretical mechanics were used, and the resulting expressions were verified in the KOMPAS-3D three-dimensional modeling software.

**RESULTS:** Mathematical expressions for analytical calculation of the centroid coordinates are obtained for different versions of the Pascal's snail:  $a = b$  (cardioid),  $a < b$  (the Pascal's snail without an internal loop),  $a > b$  (the Pascal's snail with an internal loop). Verification of the obtained expressions proves their adequacy, since the convergence of theoretical and experimental data is 100%.

**CONCLUSIONS:** The use of refined mathematical models of the cross-section of wheat grain can significantly simplify the modeling of the separation process of combed heaps, as well as to increase the accuracy of calculations. To simplify the description of this process, it is advisable to use the KOMPAS-3D three-dimensional modeling software.

**Keywords:** cross-section of wheat grain; Pascal's snail; cardioid; centroid coordinates; cross-sectional area of grain.

## To cite this article:

Nikitin VV, Ozhereliev VN, Sinyaya NV. Mathematical model of the cross-section of wheat grain. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(1):91–99. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-622847>

Received: 30.10.2023

Accepted: 25.01.2024

Published online: 06.03.2024

## ВВЕДЕНИЕ

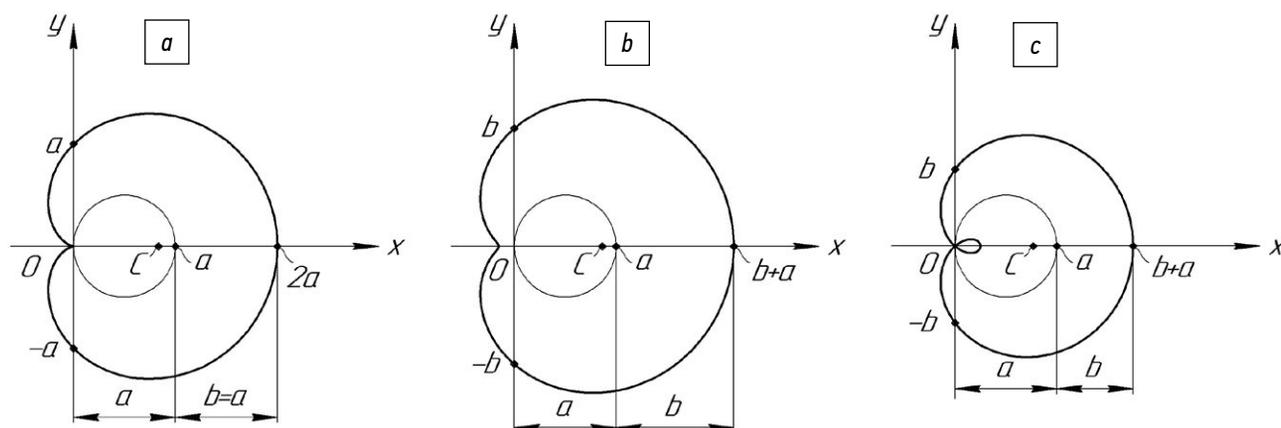
Требование реализации в Российской Федерации новых прогрессивных технологий уборочного процесса обусловлено постоянным ростом производства зерновых культур в нашей стране. Например, Министерство сельского хозяйства прогнозирует, что Россия сохранит лидерство в производстве пшеницы в 2024 году и доведет экспорт до 50 миллионов тонн зерновых. Однако, решение вопросов снижения трудоемкости, затрат энергии и повышения качества зерна и семян до требуемых параметров традиционными комбайновыми технологиями в настоящее время невозможно [1, 2]. Значительный расход горюче-смазочных материалов (до 7 литров на тонну убранного зерна), увеличение себестоимости продукции производства (до 12 тыс. рублей за тонну зерна), а также прямые и косвенные потери зерна до 30...50% [3, 4], от всего выращенного урожая диктуют необходимость перехода к современным методам ведения сельского хозяйства.

В частности, результаты многочисленных исследований и передовой производственный опыт свидетельствуют о том, что повысить производительность и энергоэффективность комбайна, а также снизить прямые и косвенные потери зерна, возможно, за счет применения комбайнового очеса. Сравнительные испытания позволяют утверждать о значительной (до 40%) экономии горючего на гектар и увеличении производительности в 1,3 раза, при использовании очесывающей жатки, по сравнению с прямоточной [5]. Одной из проблем указанной технологии уборки является то, что в очесанном ворохе содержится до 85% свободного зерна, поступление которого в молотильный зазор приводит к его повышенному дроблению (до 8%) рабочими органами молотильного барабана, и снижению его качественных показателей [6].

Для исключения этого негативного явления целесообразно производить предварительную сепарацию очесанного вороха с целью выделения из него свободного зерна и направления последнего на очистку, минуя молотильное устройство. При сложившейся компоновочной схеме зерноуборочного комбайна разместить дополнительное сепарирующее устройство можно в наклонной камере [7, 8]. При проведении теоретических исследований по определению оптимальной длины отверстий решетчатого днища наклонной камеры зерноуборочного комбайна, обеспечивающей предварительную сепарацию очесанного зернового вороха, поперечное сечение зерна пшеницы моделировали в виде отдельно взятого шара или обрезанного цилиндра [9–11]. Это обусловлено тем, что при такой форме зерновки существенным образом упрощается описание процесса сепарации. Однако, такие модели поперечного сечения зерна весьма далеки от реальной формы объекта, поскольку спинная сторона зерновок выпуклая, а на брюшной стороне имеется продольная бороздка. Вследствие этого установлено, что разница в скорости сепарации свободного зерна между теоретическими и экспериментальными данными составляет порядка 30% [12].

Наиболее близкой поверхностью к реальной форме поперечного сечения зерновки является математическая модель, разработанная И.А. Маяцкой, которая представляет собой улитку Паскаля (см. рис. 1) [13, 14]. Для этих моделей автором определены координаты центра тяжести фигуры, а также получены уравнения для расчета площади ее поперечного сечения и моментов инерции для каждой оси координат.

Однако, в результате построения указанных моделей поперечного сечения зерновки в программе «КОМПАС-3D» установлено, что расхождение между реальными и теоретически предсказанными значениями координат центра тяжести фигуры составляет порядка 13% [12], что снижает адекватность расчетов и требует их уточнения.



**Рис. 1.** Частные случаи поперечного сечения зерна пшеницы выполненной в виде улитки Паскаля: а)  $a = b$  (кардиоида); б)  $a < b$  (улитка Паскаля без внутренней петли); в)  $a > b$  (улитка Паскаля содержит внутреннюю петлю).

**Fig. 1.** Special cases of the cross-section of wheat grain shaped as the Pascal's snail: а)  $a = b$  (the cardioid); б)  $a < b$  (the Pascal's snail without an internal loop); в)  $a > b$  (the Pascal's snail with an internal loop).

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью исследования является уточнение математической модели поперечного сечения зерна пшеницы, выполненной в виде улитки Паскаля.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является поперечное сечение зерна пшеницы, выполненное в виде улитки Паскаля. При определении координат центра тяжести фигуры использовались методы теоретической механики, а проверку полученных выражений осуществляли в системе трехмерного моделирования «КОМПАС-3D».

## РЕЗУЛЬТАТ И ЕГО ОБСУЖДЕНИЕ

Запишем уравнение улитки Паскаля в прямоугольной системе координатах в общем виде [7]

$$(x^2 + y^2 - a \cdot x)^2 - b^2 \cdot (x^2 + y^2) = 0, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $b$  — геометрические параметры фигуры (рис. 1);  $x$ ,  $y$  — декартовы координаты.

Если  $a = b$ , то улитка Паскаля становится кардиоидой. Ее уравнение в полярных координатах ( $\varphi$ ;  $r$ ) ( $-\pi \leq \varphi \leq \pi$ ) может быть представлено в следующем виде:

$$r = a \cdot (1 + \cos \varphi), \quad (2)$$

где  $\varphi$  — полярный угол радиус-вектора текущей точки кривой.

Найдем центр тяжести фигуры, ограниченной кардиоидой — точку  $C(x_c; y_c)$  (см. рис. 1, а). Так как, в силу симметрии кардиоиды,  $y_c = 0$ , то необходимо найти только  $x_c$  — абсциссу точки  $C$ :

$$x_c = \frac{M_y}{S}, \quad (3)$$

где  $S$  — площадь, ограниченная кардиоидой;  $M_y$  — статический момент тела, ограниченного кардиоидой, относительно оси  $y$ .

Площадь  $S$  фигуры, ограниченной кардиоидой, определим следующим образом:

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} r^2(\varphi) d\varphi = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} [a \cdot (1 + \cos \varphi)]^2 d\varphi = \frac{3 \cdot \pi \cdot a^2}{2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Согласно своему определению, статический момент фигуры равен [15]:

$$M_y = \iint_S x dx dy. \quad (5)$$

Вычислим его, перейдя к полярным координатам для точек ( $x$ ;  $y$ ) указанной фигуры

$$\begin{aligned} x &= \rho \cos \varphi; \quad y = \rho \sin \varphi; \quad dx dy = \rho d\rho d\varphi; \\ -\pi &\leq \varphi \leq \pi; \quad 0 \leq \rho \leq a(1 + \cos \varphi). \end{aligned} \quad (6)$$

Тогда

$$\begin{aligned} M_y &= \iint_S x dx dy = \iint_S \rho \cos \varphi \rho d\rho d\varphi = \\ &= \int_{-\pi}^{\pi} \cos \varphi d\varphi \int_0^{a(1+\cos \varphi)} \rho^2 d\rho = \int_{-\pi}^{\pi} \cos \varphi d\varphi \cdot \frac{1}{3} \rho^3 \Big|_0^{a(1+\cos \varphi)} = \\ &= \frac{a^3}{3} \int_{-\pi}^{\pi} (1 + \cos \varphi)^3 \cos \varphi d\varphi = \frac{5\pi}{4} a^3. \end{aligned} \quad (7)$$

На основании (4) и (7) из (3) получаем:

$$x_c = \frac{5}{6} a. \quad (8)$$

Рассмотрим пример, в котором диаметр начальной окружности равен  $a = 20$  мм. Тогда согласно (8), центр тяжести кардиоиды будет находиться от начала координат на расстоянии  $x_c = 16,67$  мм.

Для подтверждения теоретических исследований, в программе «КОМПАС-3D» была построена кардиоида (см. рис. 2) и определена абсцисса центра тяжести фигуры  $x_c = 16,67$  мм, а также площадь ее поперечного сечения  $S = 1884,95$  мм<sup>2</sup>. Результаты построения свидетельствуют об адекватности полученных уравнений (4) и (8), поскольку сходимость теоретических и экспериментальных данных составляет 100%.

По аналогии с кардиоидой, найдем положение центра тяжести фигуры, ограниченной улиткой Паскаля для случая, когда  $\theta < a < b$  (рис. 1, б).

Уравнение улитки Паскаля в полярных координатах ( $\varphi$ ;  $r$ ) ( $-\pi \leq \varphi \leq \pi$ ) имеет следующий вид [7]:

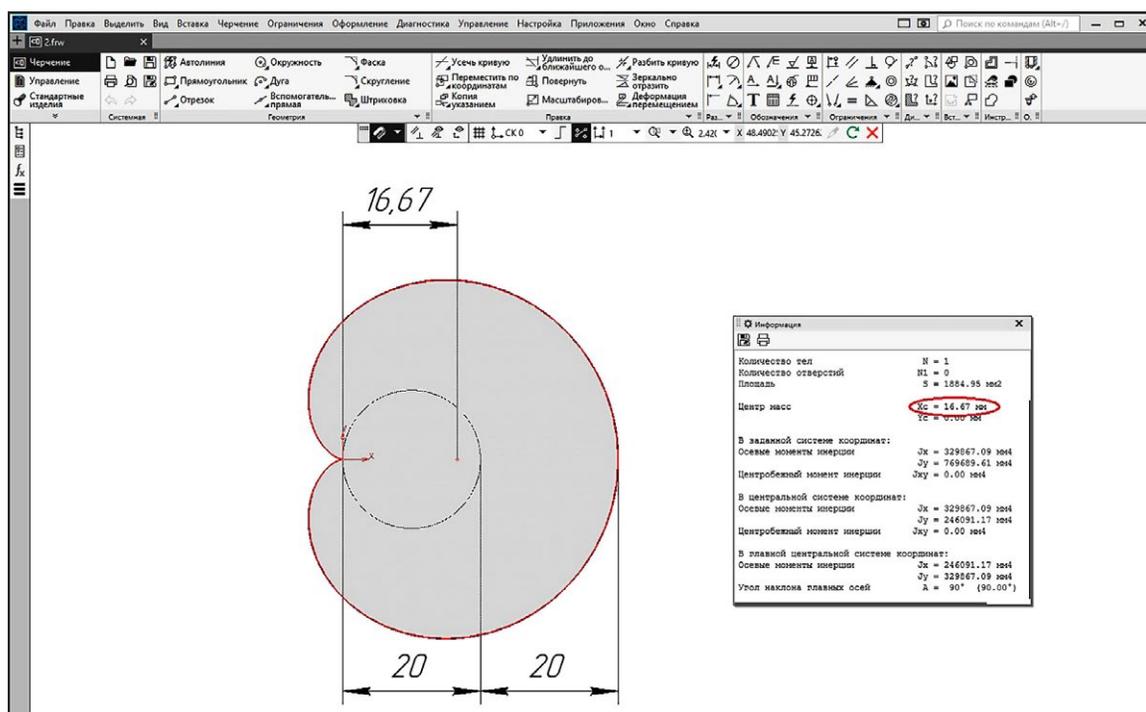
$$r = a \cdot \cos \varphi + b. \quad (9)$$

Площадь  $S$ , ограниченная улиткой Паскаля:

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} r^2(\varphi) d\varphi = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (a \cdot \cos \varphi + b)^2 d\varphi = \frac{\pi \cdot a^2}{2} + \pi \cdot b^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Вычислим статический момент фигуры, перейдя к полярным координатам для точек ( $x$ ;  $y$ ) указанной фигуры

$$\begin{aligned} x &= \rho \cos \varphi; \quad y = \rho \sin \varphi; \quad dx dy = \rho d\rho d\varphi; \\ -\pi &\leq \varphi \leq \pi; \quad 0 \leq \rho \leq a \cdot \cos \varphi + b. \end{aligned} \quad (11)$$



**Рис. 2.** Скриншот рабочего окна программы «КОМПАС-3D» при определении центра тяжести кардиоиды  $a = b = 20$  мм.  
**Fig. 2.** Screenshot of the working window of the KOMPAS-3D software when determining the centroid of the cardioid ( $a = b = 20$  mm).

Тогда

$$M_y = \iint_S x dx dy = \iint_S \rho \cos \varphi \cdot \rho d\rho d\varphi = \int_{-\pi}^{\pi} \cos \varphi d\varphi \int_0^{a \cdot \cos \varphi + b} \rho^2 d\rho = \int_{-\pi}^{\pi} \cos \varphi d\varphi \cdot \frac{1}{3} \rho^3 \Big|_0^{a \cdot \cos \varphi + b} =$$

$$= \frac{1}{3} \int_{-\pi}^{\pi} (a \cdot \cos \varphi + b)^3 \cos \varphi d\varphi = \frac{\pi \cdot a \cdot (a^2 + 4 \cdot b^2)}{4}.$$
(12)

На основании (10) и (11) из (3) получаем:

$$x_c = \frac{a \cdot (a^2 + 4 \cdot b^2)}{2 \cdot (a^2 + 2 \cdot b^2)}. \tag{13}$$

Рассмотрим пример, в котором исследуемый вариант улитки Паскаля имеет следующие исходные параметры:  $a = 20$  мм,  $b = 30$  мм. Тогда согласно (13), центр тяжести фигуры расположен на расстоянии от начала координат  $x_c = 18,18$  мм.

По этим же данным в программе «КОМПАС-3D» была построена улитка Паскаля и определена реальная координата центра тяжести фигуры  $x_c = 18,18$  мм (рис. 3). Результаты построения свидетельствуют об адекватности полученного уравнения (13). Сходимость теоретических и экспериментальных данных здесь также составляет 100%.

Рассмотрим третий частный случай, когда  $0 < b < a$ , улитка Паскаля содержит внутреннюю петлю рис. 4.

Запишем ее уравнение в полярных координатах ( $\varphi$ ;  $r$ ) [7]:

$$x = r \cdot \cos \varphi, \quad y = r \cdot \sin \varphi. \tag{14}$$

Тогда уравнение (1) примет вид:

$$(r^2 - a \cdot r \cdot \cos \varphi)^2 - b^2 \cdot r^2 = 0, \Rightarrow$$

$$\Rightarrow r = a \cdot \cos \varphi \pm b. \tag{15}$$

Исследуем это уравнение при различных знаках перед  $b$ .

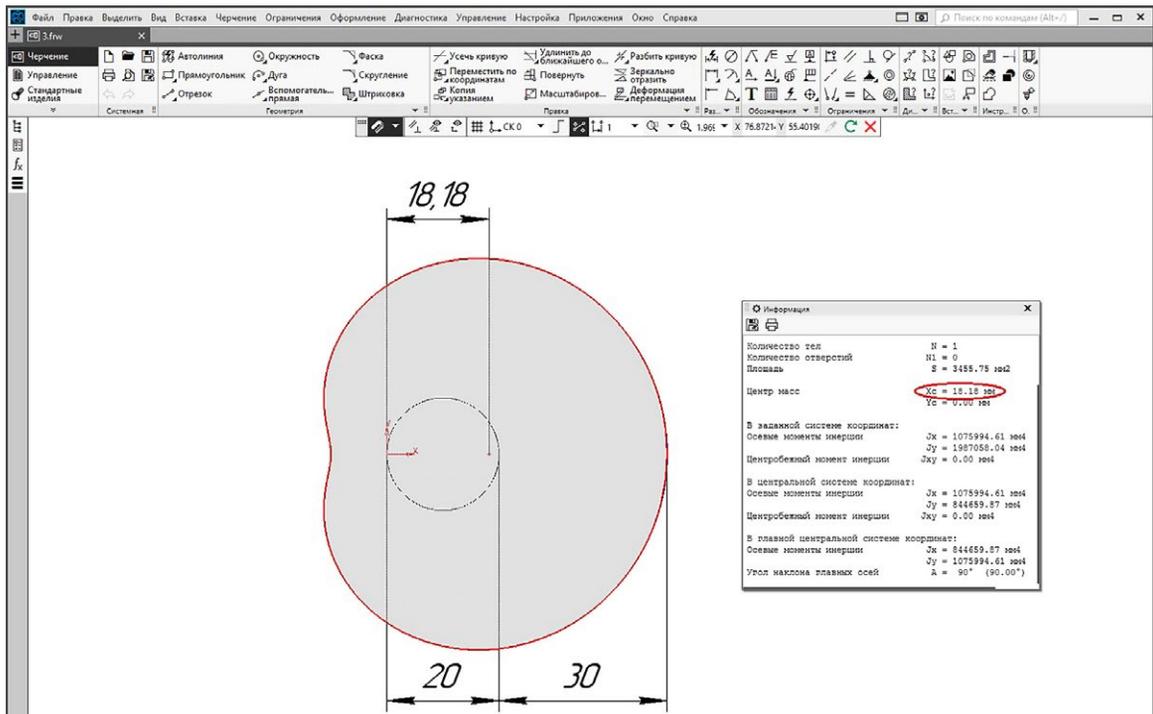
При знаке (-) имеем:

$$r = a \cdot \cos \varphi - b. \tag{16}$$

Условие  $r \geq 0$  дает:

$$a \cdot \cos \varphi - b \geq 0 \Rightarrow \cos \varphi \geq \frac{b}{a} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow -\alpha \leq \varphi \leq \alpha, \quad \text{где } \alpha = \arccos \frac{b}{a}. \tag{17}$$



**Рис. 3.** Скриншот рабочего окна программы «КОМПАС-3D» при определении центра тяжести улитки Паскаля при  $a = 20$  мм и  $b = 30$  мм.

**Fig. 3.** Screenshot of the working window of the KOMPAS-3D software when determining the centroid of the Pascal's snail at  $a = 20$  mm and  $b = 30$  mm.

То есть получаем:

$$r = a \cdot \cos \varphi - b \quad \left( -\alpha \leq \varphi \leq \alpha; \quad \alpha = \arccos \frac{b}{a} \right). \quad (18)$$

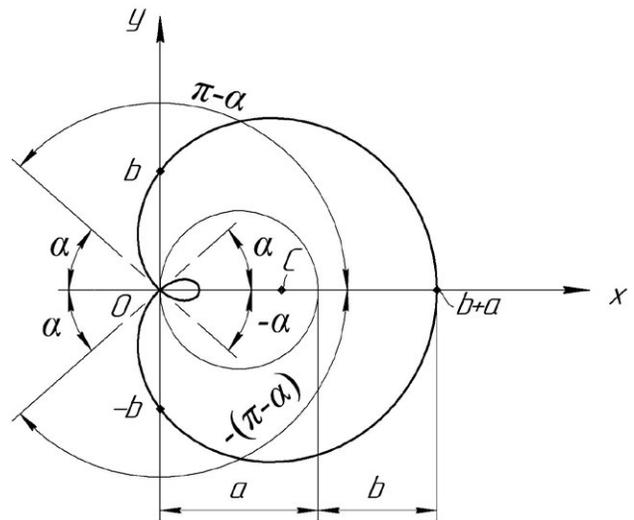
Уравнение (18) петли в полярных координатах соответствует рис. 4.

При знаке (+) в (15) получаем (опять при выполнении требования  $r \geq 0$ ):

$$r = a \cdot \cos \varphi + b \quad (-(\pi - \alpha) \leq \varphi \leq \pi - \alpha). \quad (19)$$

Уравнение (19) внешней линии улитки Паскаля в полярных координатах.

А теперь опираясь на уравнения (18) и (19), найдем центр тяжести улитки Паскаля. Для этого найдем площадь, ограниченную фигурой при отсутствии внутренней петли:



**Рис. 4.** Улитка Паскаля с внутренней петлей.  
**Fig. 4.** The Pascal's snail with an internal loop.

$$S = \int_{-(\pi-\alpha)}^{\pi-\alpha} d\varphi \int_0^{a \cdot \cos \varphi + b} \rho d\rho = \frac{1}{2} \int_{-(\pi-\alpha)}^{\pi-\alpha} (a \cdot \cos \varphi + b)^2 d\varphi = \int_0^{\pi-\alpha} (a \cdot \cos \varphi + b)^2 d\varphi = \left| \alpha = \arccos \frac{b}{a} \right| = \left( \frac{a^2}{2} + b^2 \right) \cdot (\pi - \alpha) + \frac{3}{2} \cdot b \cdot \sqrt{a^2 - b^2}. \quad (20)$$

Вычислим статический момент, перейдя к полярным координатам для точек (x; y) указанной фигуры:

$$x = \rho \cos \varphi; \quad y = \rho \sin \varphi; \quad dx dy = \rho d\rho d\varphi; \quad -\pi \leq \varphi \leq \pi; \quad 0 \leq \rho \leq a \cdot \cos \varphi + b. \quad (21)$$

Тогда:

$$M_y = \iint_S x dx dy = \iint_S \rho \cos \varphi \rho d\rho d\varphi = \int_{-(\pi-\alpha)}^{\pi-\alpha} \cos \varphi d\varphi \int_0^{a \cdot \cos \varphi + b} \rho^2 d\rho = \int_{-(\pi-\alpha)}^{\pi-\alpha} \cos \varphi d\varphi \cdot \frac{1}{3} \rho^3 \Big|_0^{a \cdot \cos \varphi + b} =$$

$$= \frac{2}{3} \int_0^{\pi-\alpha} (a \cdot \cos \varphi + b)^3 \cos \varphi d\varphi = \left| \alpha = \arccos \frac{b}{a} \right| = \frac{1}{4} \cdot a (a^2 + 4 \cdot b^2) (\pi - \alpha) + \frac{1}{12} \cdot \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \cdot b \cdot (13 \cdot a^2 + 2 \cdot b^2).$$
(22)

На основании (20) и (22) из (3) получаем:

$$x_c = \frac{\frac{1}{4} \cdot a (a^2 + 4 \cdot b^2) (\pi - \alpha) + \frac{1}{12} \cdot \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \cdot b \cdot (13 \cdot a^2 + 2 \cdot b^2)}{\left( \frac{a^2}{2} + b^2 \right) \cdot (\pi - \alpha) + \frac{3}{2} \cdot b \cdot \sqrt{a^2 - b^2}}.$$
(23)

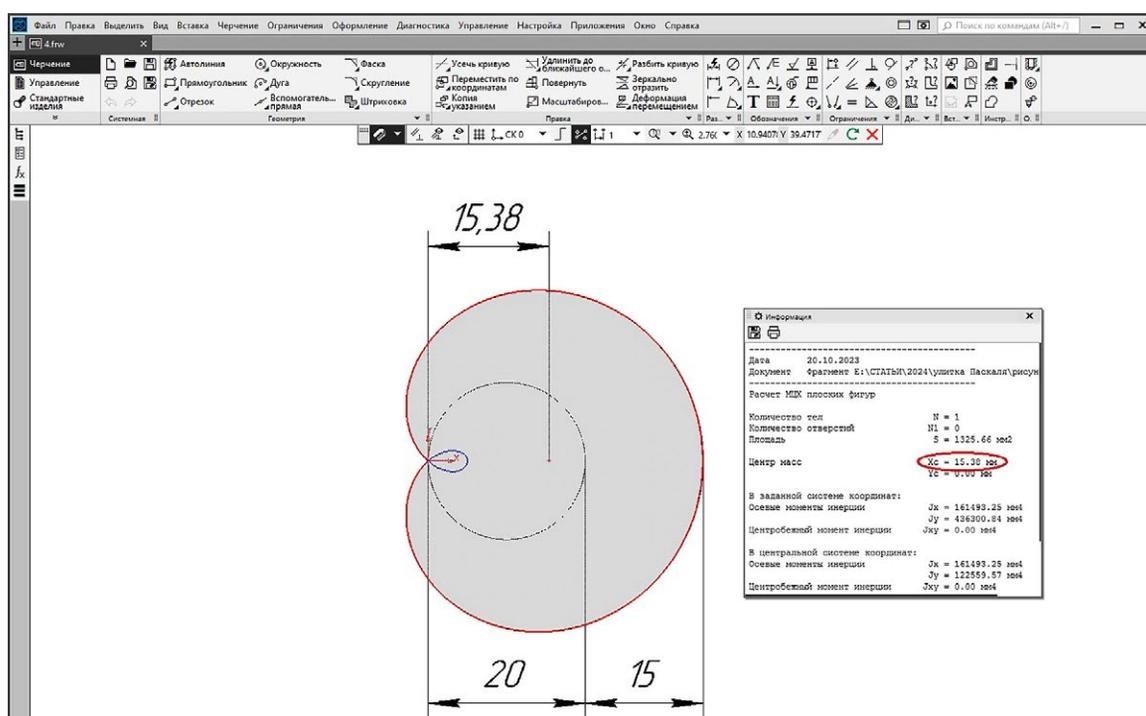
Рассмотрим пример, в котором исследуемый вариант улитки Паскаля имеет следующие исходные параметры:  $a = 20$  мм,  $b = 15$  мм. Тогда согласно (23), центр тяжести фигуры будет находиться на расстоянии от начала координат  $x_c = 15,38$  мм.

Построим тот же вариант улитки Паскаля. Используя пакет прикладных программ в системе трехмерного моделирования «КОМПАС-3D» определено реальное значение координаты центра тяжести фигуры  $x_c = 15,38$  мм (рис. 5). Результаты построения свидетельствуют об адекватности полученного уравнения (23). Сходимость теоретических и экспериментальных данных составляет 100%.

Таким образом, использование уточненных математических моделей поперечного сечения зерна пшеницы позволяет повысить точность расчетов процесса сепарации очесанного вороха на решетчатом днище наклонной камеры зерноуборочного комбайна. При этом, для упрощения описания указанного процесса целесообразно использовать систему трехмерного моделирования «КОМПАС-3D».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При выполнении теоретических исследований сепарации поперечное сечение зерна



**Рис. 5.** Скриншот рабочего окна программы «КОМПАС-3D» при определении центра тяжести улитки Паскаля при  $a = 20$  мм и  $b = 15$  мм.

**Fig. 5.** Screenshot of the working window of the KOMPAS-3D software when determining the centroid of the Pascal's snail at  $a = 20$  mm and  $b = 15$  mm.

- пшеницы целесообразно моделировать в виде улитки Паскаля.
- Получены математические выражения для аналитического нахождения координат центров тяжести для разных вариантов улитки Паскаля:  $a = b$  (кардиоид),  $a < b$  (улитка Паскаля без внутренней петли),  $a > b$  (улитка Паскаля содержит внутреннюю петлю). Проверка полученных выражений свидетельствует об их адекватности, поскольку сходимость теоретических и экспериментальных данных составляет 100%.
  - Использование уточненных математических моделей поперечного сечения зерна пшеницы позволяет повысить точность расчетов процесса сепарации очесанного вороха на решетчатом днище наклонной камеры зерноуборочного комбайна. При этом для упрощения описания указанного процесса целесообразно использовать систему трехмерного моделирования «КОМПАС-3D».

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** В.В. Никитин — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; В.Н. Ожерельев — экспертная оценка, редактирование текста рукописи, утверждение финальной версии; Н.В. Синяя — создание изображений, редактирование текста рукописи. Авторы подтверждают соответствие своего

авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** V.V. Nikitin — analysis of publications on the research topic, writing the text of the manuscript; V.N. Ozhereliev — expert opinion, editing the text of the manuscript, approval of the final version of the manuscript; N.V. Sinyaya — creating figures, editing the text of the manuscript. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Buryanov A.I., Chervyakov I.V. Using combines for cleaning grain crops by non-traditional technologies // *INMATEH — Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 59, N. 3. P. 27–32. doi: 10.35633/INMATEH-59-03
- Lachuga Yu.F., Buryanov A.I., Pakhomov V.I., et al. Adaptation of threshing devices to physical and mechanical characteristics of harvested crops // *Russian Agricultural Sciences*. 2020. Vol. 46, N. 2. P. 198–201. doi: 10.3103/S1068367420020111
- Жалнин Э.В. Технические инновации в сельскохозяйственном производстве и ресурс-собирающий эффект // *АгроСнабФорум*. 2017. № 3 (151). С. 14. EDN: YMDHKX
- Жалнин Э.В. Уборка с очесом на корню: за и против // *Сельский механизатор*. 2013. № 8. С. 10–12. EDN: RCFKAZ
- Леженкин А.М., Кравчук В.И., Кушнарв А.С. Технология уборки зерновых культур методом очесывания на корню: состояние и перспективы. Дослідницьке, 2010.
- Ожерельев В.Н., Никитин В.В. Результаты адаптации конструкции комбайна к работе с очесывающей жаткой // *Инженерные технологии и системы*. 2022. Т. 32. № 2. С. 190–206. EDN: RBNYLL doi: 10.15507/2658-4123.032.202202.190-206
- Ozhereliev V.N., Nikitin V.V., Belous N.M., et al. Perspectives of grain pile separation before it enters the thresh-ER // *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018, Vol. 7, N. 2.13. P. 114–116.
- Никитин В.В. Определение оптимальной длины днища наклонной камеры зерноуборочного комбайна при очесе // *Сельский механизатор*. 2018. № 5. С. 8–9. EDN: XWCSDZ
- Горячкин В.П. Собрание сочинений. В 3-х т. М.: Колос, 1968. Т. 1.
- Василенко В.В., Василенко С.В., Баскаков И.В. Рациональная схема питателя стационарной молотилки очесанного вороха // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2022. Т. 15. № 3 (74). С. 12–18. EDN: QWRCUX doi: 10.53914/issn2071-2243\_2022\_3\_12
- Ожерельев В.Н., Никитин В.В., Комогорцев В.Ф. Наклонная камера зерноуборочного комбайна // *Вестник Брянской ГСХА*. 2016. № 3. С. 65–70. EDN: VZRSIF
- Никитин В.В. Совершенствование технологической схемы зерноуборочного комбайна и параметров его рабочих органов: дисс. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2021. EDN: TRVVBB
- Маяцкая И.А. Разработка механико-математических моделей семян сельскохозяйственных культур, убираемых зернокомбайнами: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2000. EDN: ZKLDMX
- Маяцкая И.А., Демченко Б.М. Определение Миделева сечения растительных объектов различной формы // *Интернет-журнал Науковедение*. 2013. № 3 (16). С. 109. EDN: QZXZEB
- Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. М.: Высшая школа, 2010.

## REFERENCES

1. Buryanov AI, Chervyakov IV. Using combines for cleaning grain crops by non-traditional technologies. *INMATEH — Agricultural Engineering*. 2019;59(3):27–32. doi: 10.35633/INMATEH-59-03
2. Lachuga YuF, Buryanov AI, Pakhomov VI, et al. Adaptation of threshing devices to physical and mechanical characteristics of harvested crops. *Russian Agricultural Sciences*. 2020;46(2): 198–201. doi: 10.3103/S1068367420020111
3. Zhalnin EV. Technical innovations in agricultural production and resource-saving effect. *AgroSnabForum*. 2017;3(151):14. (in Russ.) EDN: YMDHKX
4. Zhalnin EV. Cleaning with a comb on the root: pros and cons. *Sel'skij mekhanizator*. 2013;8:10–12 (in Russ.) EDN: RCFKAZ
5. Lezhenkin AM, Kravchuk VI, Kushnarev AS. *Tekhnologiya uborki zernovyh kul'tur metodom ochesyvaniya na kornyu: sostoyanie i perspektivy*. Doslidnitskoe; 2010. (in Russ.)
6. Ozherelev VN, Nikitin VV. The results of the combine design adaptation to work with a stripper header. *Inzhenerye tekhnologii i sistemy*. 2022;32(2):190–206 (in Russ.) EDN: RBNYLL doi: 10.15507/2658-4123.032.202202.190-206
7. Ozherelyev VN, Nikitin VV, Belous NM, et al. Perspectives of grain pile separation before it enters the thresh-ER. *International Journal of ngineering and Technology (UAE)*. 2018;7(2.13):14–116.
8. Nikitin VV. Determination of the optimal length of the bottom of the inclined chamber of a combine harvester when weighing. *Sel'skij mekhanizator*. 2018;5:8–9 (in Russ.) EDN: XWCSOZ
9. Goryachkin VP. *Sobranie sochinenij*. 3 Vols. Moscow: Kolos; 1968;1. (in Russ.)
10. Vasilenko VV, Vasilenko SV, Baskakov IV. Rational scheme of a feeder of a stationary threshing machine of a combed heap. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022;15(74):12–18. (in Russ.)
11. Ozherelev VN, Nikitin VV, Komogortsev VF. Inclined chamber of a combine harvester. *Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii*. 2016;3:65–70. (in Russ.)
12. Nikitin VV. Sovershenstvovanie tekhnologicheskoy skhemy zernouborochnogo kombajna i parametrov ego rabochih organov [dissertation] Bryansk; 2021. (in Russ.) EDN: TRVVBB
13. Mayatskaya I.A. Development of mechanical and mathematical models of seeds of agricultural crops harvested by grain combines [abstract dissertation]. Rostov-on-Don; 2000. (in Russ.) EDN: ZKLDMX
14. Mayatskaya I. A., Demchenko B.M. Determination of the mid-section of plant objects of various shapes. *Internet-zhurnal Naukovedenie*. 2013;3(16):109. (in Russ.) EDN: QZXZEB
15. Targ S.M. *Kratkij kurs teoreticheskoy mekhaniki*. Moscow: Vysshaya shkola; 2010. (in Russ.)

## ОБ АВТОРАХ

### \* Никитин Виктор Васильевич,

доцент, д-р техн. наук,  
заведующий кафедрой «Технический сервис»;  
адрес: Российская Федерация, 243365, Брянская обл.,  
Выгоничский р-н, Кокино, ул. Советская, д. 2а;  
ORCID: 0000-0003-1393-2731;  
eLibrary SPIN: 5246-6938;  
e-mail: viktor.nike@yandex.ru

### Ожерельев Виктор Николаевич,

профессор, д-р с.-х. наук,  
профессор кафедры «Технические системы в агробизнесе,  
природообустройстве и дорожном строительстве»;  
ORCID: 0000-0002-2121-3481;  
eLibrary SPIN: 3423-0991;  
e-mail: vicoz@bk.ru

### Синяя Наталия Викторовна,

канд. техн. наук,  
доцент кафедры «Технический сервис»;  
ORCID: 0000-0002-1794-1347;  
eLibrary SPIN: 9225-4347;  
e-mail: sinzea@yandex.ru

## AUTHORS' INFO

### \* Viktor V. Nikitin,

Associate Professor, Dr. Sci. (Engineering),  
Head of the Technical Service Department;  
address: 2a Sovetskaya street, 243365 Kokino,  
Vygonichsky District of Bryansk Oblast, Russian Federation;  
ORCID: 0000-0003-1393-2731;  
eLibrary SPIN: 5246-6938;  
e-mail: viktor.nike@yandex.ru

### Viktor N. Ozhereliev,

Professor, Dr. Sci. (Agriculture),  
Professor of the Technical Systems in Agrobusiness,  
Environmental Management and Road Construction Department;  
ORCID: 0000-0002-2121-3481;  
eLibrary SPIN: 3423-0991;  
e-mail: vicoz@bk.ru

### Natalia V. Sinyaya,

Cand. Sci. (Engineering),  
Associate Professor of the Technical Service Department;  
ORCID: 0000-0002-1794-1347;  
eLibrary SPIN: 9225-4347;  
e-mail: sinzea@yandex.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author