

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.331.53

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-32-41>

Определение параметров перемещения семян зерновых и зернобобовых культур в центробежном распределителе селекционной сеялки

М.Е. Чаплыгин¹, К.А. Степанов², А.С. Чулков³, А.Л. Мнацаканян⁴^{1,2,3,4} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹ misha2728@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>² 89999878895@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-1511-4307>³ andrei.chulkov@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-1178-451X>⁴ anahit-mal@mail.ru

Аннотация. Разработка селекционных сеялок возможна при детальном изучении закономерности перемещения семян в центробежном распределителе на основе исследования скорости, времени и углового перемещения семян. Оптимальные параметры перемещения семян в центробежном распределителе должны обеспечить точное и бесперебойное распределение семян по патрубкам в семяпроводы для равномерного высева семян в борозду при рядовом посеве. Целью исследований являлось определение параметров перемещения семян в центробежном распределителе селекционной сеялки при взаимодействии его лопаток с потоком семян зерновых или зернобобовых культур. Методология исследований включала в себя анализ физико-математических зависимостей и имитационное моделирование процесса выпадения семян в центробежном распределителе сеялки типа Wintersteiger Plotseed S-ВИМ с частотой вращения распределителя до 3100 об/мин. Разработанная 3D-модель процесса движения семян в центробежном распределителе позволила установить нелинейную зависимость коэффициента трения семян о материал лопаток на динамику процесса. При увеличении коэффициента трения с 0,2 до 0,38 скорость семян при сходе с лопатки снижается с 8,59 до 6,3 м/с (на 36%), время движения по лопатке возрастает с 0,0065 до 0,0086 с (на 32%), а угловое перемещение увеличивается с 1,59 до 2,24 рад (на 40%). Дальнейший рост коэффициента трения до 0,57 приводит к дополнительному снижению скорости на 8% и увеличению времени движения на 54%. Угол схода семян линейно возрастал с 54 до 68 град. Установлено, что качественный посев семян зерновых и зернобобовых культур для сеялки Wintersteiger Plotseed S-ВИМ возможен при условии, когда коэффициент трения семян о материал лопатки равен 0,38, угол схода семени с лопатки соответствует 62,5 град. и скорость семени при сходе достигает 6,3 м/с. Разработанная 3D-модель процесса движения семян в центробежном распределителе поможет в дальнейшем разработать высевающий аппарат с электроприводом для сеялки 3-го этапа селекционных работ с роботизированным кассетным загрузочным устройством.

Ключевые слова: семя; семена; селекционная сеялка; электропривод; высевающий аппарат; центробежный распределитель; коэффициент трения семян; посев семян зерновых и зернобобовых культур

Финансирование. Исследования выполнены в рамках государственного задания FGUN-2025-0007 «Разработать научные основы создания цифровых интеллектуальных систем управления технологическими процессами, инновационные технические средства для селекции, семеноводства и производства зерновых, зернобобовых и масличных культур».

Для цитирования: Чаплыгин М.Е., Степанов К.А., Чулков А.С., Мнацаканян А.Л. Определение параметров перемещения семян зерновых и зернобобовых культур в центробежном распределителе селекционной сеялки // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 4. С. 32-41. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-32-41>

ORIGINAL ARTICLE

Parameters of moving grain and leguminous crop seeds in a centrifugal distributor of a breeding seeder

M.E. Chaplygin¹✉, K.A. Stepanov², A.S. Chulkov³, A.L. Mnatsakanyan⁴

^{1, 2, 3, 4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia

¹ misha2728@yandex.ru✉; <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>

² 89999878895@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-1511-4307>

³ andrei.chulkov@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-1178-451X>

⁴ anahit-mal@mail.ru

Abstract. The development of breeding seeders is possible through a detailed study of seed movement patterns in a centrifugal distributor, based on the investigation of seed velocity, time, and angular displacement. The optimal parameters of seed movement in the centrifugal distributor should ensure accurate and uninterrupted distribution of seeds through the nozzles into the seed tubes for uniform seeding into the furrow during row sowing. The study aimed to determine the seed movement parameters in the centrifugal distributor of a breeding seeder during the interaction of its blades with the seed flow of grain or leguminous crops. The research methodology included an analysis of physical and mathematical relationships and simulation modeling of the seed release process in the centrifugal distributor of the Wintersteiger Plotseed S-VIM seeder, with a distributor speed of up to 3100 rpm. The developed 3D model of seed movement in the centrifugal distributor made it possible to establish a nonlinear dependence of the coefficient of friction between seeds and the blade material on the process dynamics. As the coefficient of friction increased from 0.2 to 0.38, the seed velocity at the blade exit decreased from 8.59 to 6.3 m/s (by 36%), the travel time along the blade increased from 0.0065 to 0.0086 s (by 32%), and the angular displacement increased from 1.59 to 2.24 rad (by 40%). A further increase in the coefficient of friction to 0.57 led to an additional 8% reduction in velocity and a 54% increase in travel time. The seed release angle increased linearly from 54 to 68 degrees. It was established that high-quality sowing of grain and leguminous crops for the Wintersteiger Plotseed S-VIM seeder is possible provided the coefficient of friction between seeds and the blade material is 0.38, the seed release angle is 62.5 degrees, and the seed velocity at release reaches 6.3 m/s. The developed 3D model of seed movement in the centrifugal distributor will facilitate the future development of an electric-driven seeding unit for a third-stage breeding seeder with a robotic cassette loading device.

Keywords: seeds; breeding seeder; electric drive; seeding unit; centrifugal distributor; seed friction coefficient; grain and leguminous crop seeding

Funding: The research was carried out as part of the fulfillment of the State Assignment FGUN-2025-0007 “Developing the scientific foundations for designing digital intelligent process control systems, innovative technical means for breeding, seed production and production of grain, leguminous and oilseeds.”

For citation: Chaplygin M.E., Stepanov K.A., Chulkov A.S., Mnatsakanyan A.L. Parameters of moving grain and leguminous crop seeds in a centrifugal distributor of a breeding seeder. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(4):32-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-32-41>

Введение

Интеллектуальные технологии и роботизированные средства применяются при разработке посевных машин [1-3]. Так, с их помощью определены конструктивно-технологические параметры высевяющего аппарата конусного типа с центральным распределением семян [4] и осуществляется разработка данного высевяющего аппарата с электроприводом для сеялки 3-го этапа селекционных работ с роботизированным кассетным загрузочным устройством [5, 6].

Высевяющий аппарат селекционной сеялки на 3-м этапе работ включает в себя центробежный распределитель, который направляет поступающий поток семян по патрубкам в семяпроводы. Согласованная

работа центробежного распределителя в соответствии с ОСТ 46 73-78 должна обеспечить качественный рядовой посев семян зерновых и зернобобовых культур с количеством высевяемых рядов от 3 до 10 и длиной селекционной делянки от 2 до 20 м.

Разработка селекционных сеялок требует детального изучения закономерности перемещения семян в рабочих органах на основе исследования скорости, времени и углового перемещения семян. Закономерности перемещения семян в центробежных распределителях исследовали X.P. Cheng [7], A.A. Shwartz [8], S.R. Cool [9], M. Ou [10], V. Bivainis [11], Z. Guan [12], В.А. Черновол [13] и др., однако в этих работах не рассмотрены современные методы визуализации параметров перемещения семенного материала.

Научная новизна данных исследований заключается в установлении количественных зависимостей параметров движения семян (скорости, времени, угловых перемещений) от коэффициента трения семян о лопатки с использованием имитационного моделирования, что позволяет обосновать конструктивные решения в проектируемых роботизированных сеялках.

Цель исследований: определение параметров перемещения семян в центробежном распределителе селекционной сеялки для 3-го этапа работ при взаимодействии его лопаток с потоком семян зерновых или зернобобовых культур.

Материалы и методы

Параметры перемещения определены на основе известных физико-математических зависимостей и технологического процесса работы центробежного распределителя сеялки. Рассмотрено перемещение семян при падении и отбрасывании тарелкой с лопатками в направлении патрубков, соединенных с семяпроводами.

Ученые ФГБНУ ФНАЦ ВИМ осуществляют разработку роботизированной сеялки путем интеграции в сеялку Wintersteiger Plotseed S-ВИМ¹ (рис. 1) роботизированного кассетного загрузочного устройства. В связи с этим расчет параметров перемещения семян в центробежном распределителе производили для данной модели. Для определения параметров перемещения семян при посеве рассмотрим более подробно его центробежный распределитель.

При посеве семена, сходящие с конуса высевающего аппарата центрального распределения,



Рис. 1. Селекционная сеялка Wintersteiger Plotseed S-ВИМ

Fig. 1. Wintersteiger Plotseed S-VIM breeding seeder

¹ Селекционная сеялка Plotseed S – ВИМ Wintersteiger – ВИМ: сайт ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. <https://vim.ru/product/technics/9/242/>

поступают в центробежный распределитель, откуда по лопаткам перемещаются в семяпроводы, из которых попадают в открытые сошниками борозды и заделываются почвой при помощи загортателей. В распределителе семена совершают сложное движение, которое может изменяться в зависимости от условий движения. Описание этих условий и самого движения применительно к распределителю селекционной сеялки является задачей текущего исследования.

Для вращения центробежного распределителя используется электродвигатель с частотой вращения до 3100 об/мин.

3D-модель распределителя представлена на рисунке 2. В корпусе распределителя 1 с патрубками, в подшипнике 2 фланца 3 размещено вращающееся основание 4, на котором закреплена тарелка с лопатками 5, отвечающая за распределение семян по патрубкам 6, через входные окна которых семена попадают в семяпроводы сеялки. Попадание семян точно в патрубки без ударений о промежуточные стенки корпуса является ключевым показателем равномерности распределения семян.

3D-модель тарелки распределителя с лопатками 5, наклоненными вперед по направлению движения, изображена на рисунке 3. Конструктивное расстояние от конуса до лопаток тарелки исследуемой сеялки – $h_k = 0,2$ м.

Схема сил, действующих на семена при движении по наклоненной вперед лопатке, и параметры углового перемещения семени массой $m_c = 4 \cdot 10^{-6}$ кг по диску центробежного распределителя с наружным

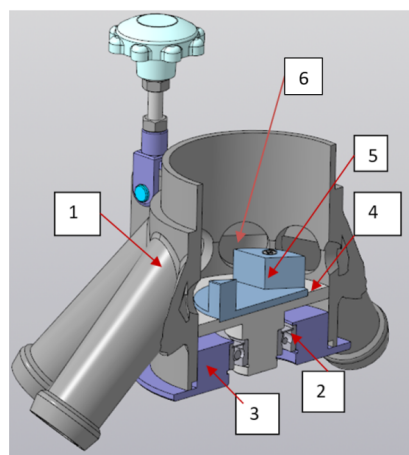


Рис. 2. Общий вид центробежного распределителя селекционной сеялки Wintersteiger Plotseed S-ВИМ:

1 – распределитель; 2 – подшипник; 3 – фланец; 4 – вращающееся основание; 5 – тарелка с лопаткой; 6 – входное окно патрубков распределителя

Fig. 2. General view of the centrifugal distributor of the Wintersteiger Plotseed S-VIM breeding seeder:

1 – distributor; 2 – bearing; 3 – flange; 4 – rotating base; 5 – disc with a blade; 6 – inlet port of the distributor pipes

радиусом $R = 0,3$ м, вращающегося с угловой скоростью $\omega = 324$ рад/с (3100 об/мин), представлена на рисунке 4.

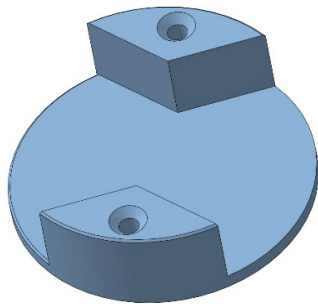


Рис. 3. 3D-модель конструкции тарелки распределителя с наклоненными вперед лопатками
Fig. 3. 3D model of the distributor disc design with forward-inclined blades

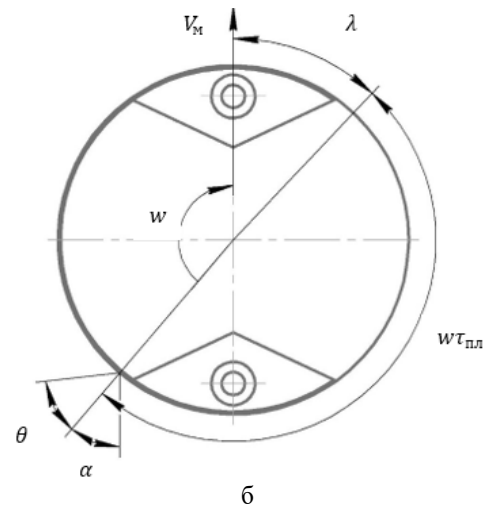
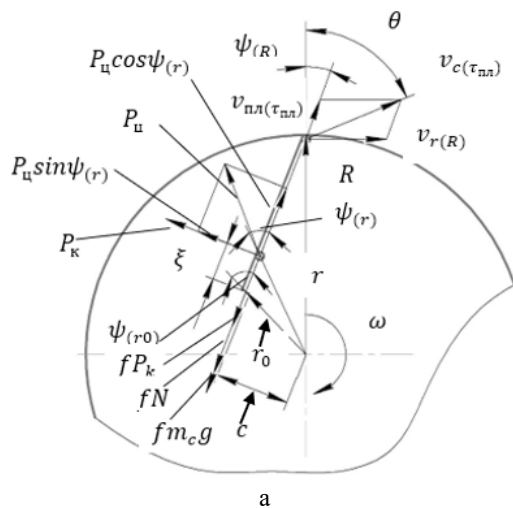


Рис. 4. Схема сил (а) и параметры углового перемещения семян по диску центробежного распределителя (б):
 R – наружный радиус диска распределителя; ω – угловая скорость вращения диска; r_0 – точка-радиус столкновения семян;
 r – текущая точка-радиус семян; c – расстояние от плоскости лопатки до оси вращения диска;
 v_m – вектор скорости движения сеялки; ξ – линейное движение семян по лопатке; λ – угол столкновения семян к вектору v_m ;
 $f \cdot m_c \cdot g$ – сила трения, возникающая от действия силы тяжести семян; P_k – Кориолисова сила инерции;
 $f \cdot P_k$ – сила трения, возникающая от Кориолисовой силы инерции; P_u – центробежная сила инерции;
 $\psi_{(r)}$ – угол наклона радиус-вектора от оси вращения до точки схода семян с лопаткой к поверхности лопатки;
 $P_u \cdot \cos \psi_{(r)}$ – касательная реакция; $P_u \cdot \sin \psi_{(r)}$ – нормальная реакция; $v_{пл(\tau_{пл})}$ – скорость семян при движении по лопатке;
 $v_{r(R)}$ – окружная скорость семян после их схода с лопатки; $v_{c(\tau_{пл})}$ – абсолютная скорость семян после их схода с лопатки;
 $w \cdot \tau_{пл}$ – угловое перемещение по диску; θ – угол схода семян с лопатки;
 α – угол, соответствующий углу схода семян с лопатки относительно вектора скорости движения машины v_m

Fig. 4. Force diagram (a) and parameters of angular movement of seeds on the centrifugal distributor disc (b):

R – outer radius of the distributor disc; ω – angular velocity of disc rotation; r_0 – collision radius point of seeds;
 r – current radius point of seeds; c – distance from the blade plane to the disc rotation axis; v_m – vector of the seeder travel speed;
 ξ – linear movement of seeds along the blade; λ – angle of seed collision relative to vector v_m ;
 $f \cdot m_c \cdot g$ – friction force arising from the action of seed gravity; P_k – Coriolis inertial force;
 $f \cdot P_k$ – friction force arising from the Coriolis inertial force; P_u – centrifugal inertial force; $\psi_{(r)}$ – angle of inclination of the radius vector from the rotation axis to the point of seed discharge from the blade relative to the blade surface;
 $P_u \cdot \cos \psi_{(r)}$ – tangential reaction; $P_u \cdot \sin \psi_{(r)}$ – normal reaction; $v_{пл(\tau_{пл})}$ – seed velocity during movement along the blade;
 $v_{r(R)}$ – peripheral velocity of seeds after their discharge from the blade;
 $v_{c(\tau_{пл})}$ – absolute velocity of seeds after their discharge from the blade; $w \cdot \tau_{пл}$ – angular displacement along the disc;
 θ – angle of seed discharge from the blade; α – angle corresponding to the angle of seed discharge from the blade relative to the machine travel speed vector v_m

Результаты и их обсуждение

Оптимальные параметры перемещения семян (скорость, угол схода) в разрабатываемом центробежном распределителе должны обеспечить точное и бесперебойное распределение семян по патрубкам в семяпроводах для равномерного высева семян в борозду при рядовом посеве.

Рассмотрим взаимодействие потока семян с лопатками центробежных распределителей. Точка столкновения лопатки с семенами имеет координаты: $r_0 = 0,02$ м и угол $\psi_{(r_0)}$. Здесь $\psi_{(r_0)}$ – угол наклона радиус-вектора от оси вращения до точки столкновения семян с лопаткой к поверхности лопатки.

Семена массой m_c сталкиваются с лопаткой под углом λ ($0,17$ рад, или $\sim 10^\circ$) к вектору скорости сеялки v_m . После удара семена перемещаются вдоль лопатки на расстояние ξ_{lim} (м) с относительной

скоростью $v_{nl(t)}$ (м/с). При этом на семена действуют следующие силы:

- центробежная сила инерции $P_u = m_c \cdot \omega^2 \cdot R$ (Н);
- ее составляющая $P_u \cos \psi_{(r)}$ (Н) и нормальная реакция $N = P_u \sin \psi_{(r)}$ (Н);
- сила Кориолиса $P_k = 2m_c \cdot \omega^2 \cdot v_{\xi}(t^*)$ (Н);
- силы трения скольжения от силы тяжести $F_{mp.g} = f \cdot m_c \cdot g$ (Н), от нормальной реакции $F_{mp.N} = f \cdot N$ (Н) и от силы Кориолиса $f \cdot P_k$ (Н), где f – коэффициент трения скольжения.

Лопатка в процессе взаимодействия с семенами поворачивается на угол $\omega \cdot \tau_{nl}$ (рад). Затем семена сходят с лопатки. Положение точки схода характеризуется углом ψ между радиус-вектором (от оси вращения до точки схода) и поверхностью лопатки: $\psi_{(R)} \approx 1$ рад ($\sim 57,5^\circ$). Абсолютная скорость семян в момент схода образует с радиус-вектором угол θ (рад), который равен углу схода семян относительно вектора скорости сеялки v_m .

Таким образом, основным параметром перемещения семян в центробежном распределителе рационально принять время τ_{up} (с):

$$\tau_{up} = \tau_n + \tau_{nl} + \tau_{ol}, \quad (1)$$

где τ_n – время прохождения семян вертикального участка семяпровода от основания конуса до дна центробежного распределителя, с; τ_{nl} – время движения по лопатке распределителя, с; τ_{ol} – время пролета семян от лопатки до одного из отверстий патрубков распределителя, с.

Время падения семян τ_n (с) в вертикальном семяпроводе длиной h_k определяется по формуле:

$$\tau_n = \sqrt{2 \cdot h_k / g}, \quad (2)$$

где h_k – высота падения семян от конуса до лопаток распределителя, $h_k = 0,2$ м; g – ускорение свободного падения, $g \approx 9,81$ м/с².

Время выброса крыльчаткой центробежного распределителя всех семян, поступивших из загрузочного стакана, в каналы должно совпадать со временем прохождения сеялкой длины делянки L_d (м).

Время движения семени по лопатке τ_{nl} до схода можно определить графически. Для этого строят график зависимости перемещения семени от времени $\xi_{nl(\tau_{nl})}$ и находят на нем точку, в которой $\xi_{nl(\tau_{nl})} = \xi_{lim}$. Абсцисса этой точки равна искомому τ_{nl} . Точка пересечения графиков в проекции оси времени позволит определить время движения семян по лопатке. Рассчитывается ξ_{lim} (м) по формуле:

$$\xi_{lim} = R \cdot \cos \psi_{(r)} - r_0 \cdot \cos \psi_{(r_0)}, \quad (3)$$

где R – наружный радиус на диске при дальней точке лопатки, м ($R = 0,03$ м); $\psi_{(r)}$ – угол наклона радиус-вектора от оси вращения до точки схода семян с лопаткой к поверхности лопатки. Тогда $\xi_{lim} = 0,018$ м.

Условие начала движения семян по лопатке, наклоненной вперед по ходу движения, запишем следующим образом:

$$\psi_{(r_0)} < 1,57 - \varphi. \quad (4)$$

$\psi_{(r_0)}$ (рад) определяется по формуле:

$$\psi_{(r_0)} = \arcsin\left(\frac{c}{r_0}\right), \quad (5)$$

где c – расстояние от плоскости лопатки до оси вращения диска, м ($c = 0,016$ м).

Угол трения φ (рад) –

$$\varphi = \arctg f. \quad (6)$$

Значения коэффициента трения скольжения f семян по материалу лопаток (алюминий, пластик) выбраны в диапазоне $0,2 \dots 0,57$. Такой диапазон охватывает типичные значения для семян зерновых (пшеница, ячмень) и зернобобовых (соя) культур [14, 15]. Варьирование коэффициента трения в модели соответствует различным сочетаниям культур и материалов лопаток (например, для сои по алюминию коэффициент может составлять $0,26 \dots 0,39$ [14]).

На движущееся по лопатке семя действуют внешние силы и их составляющие (рис. 4б). Если условие соблюдается, то линейное перемещение по лопатке $\xi_{nl(\tau_{nl})}$ и угловое перемещение по диску $\omega \cdot \tau_{nl}$ как в момент условно введенного времени $\tau_{nl}^* = 0,001$ с, так и в любой другой момент времени движения τ_{nl} приближенно можно описать траекторией архимедовой спирали [16]. Тогда линейное движение по лопатке (ξ , м/с) можно записать в виде уравнения:

$$\xi = \left(r_0 \cdot \frac{\cos(\psi_{(r_0)} + \varphi)}{\cos \varphi} - \frac{f \cdot g}{\omega^2} \right) \times \left(\frac{(-1) \frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega \cdot e^{\frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega \cdot t}}{(-1) \frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega - \frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega} - \frac{\frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega \cdot e^{\frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega \cdot t}}{(-1) \frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega - \frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega} \right). \quad (7)$$

Зависимость скорости перемещения семян $v_{nl(\tau_{nl})}$ (м/с) вдоль лопатки от времени –

$$v_{nl(\tau_{nl})} = \left(r_0 \cdot \frac{\cos(\psi_{(r_0)} + \varphi)}{\cos \varphi} - \frac{f \cdot g}{\omega^2} \right) \times \left(\frac{\frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega \cdot (-1) \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega}{(-1) \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega - \frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega} \cdot \left(e^{\frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega \cdot \tau_{nl}} - e^{\frac{(-1) \frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} \cdot \omega \cdot t}{\cos \varphi}} \right) \right). \quad (8)$$

Величина абсолютной скорости семян $v_{c(\tau_{nl})}$ (м/с) после их схода с лопатки определяется

по приведенной ниже зависимости. При этом действием силы тяжести можно пренебречь:

$$v_{c(\tau_{пл})} = \frac{v_{пл(\tau_{пл})} \cdot \sin \psi_{(r)} + v_{r(R)}}{\sin \theta}. \quad (9)$$

Угол θ (рад) между вектором абсолютной скорости $v_{c(\tau_{пл})}$ и радиус-вектором R определяется по формуле:

$$\theta = \arctg \frac{v_{r(R)}}{v_{пл(\tau_{пл})} \cdot \cos \psi_{(R)}}. \quad (10)$$

Для визуализации движения семян введем угол α , рад, соответствующий углу схода семян с лопатки относительно вектора скорости движения машины v_m . Тогда согласно рисунку 4

$$\alpha = \lambda + w \cdot \tau_{пл} + \theta - \pi, \quad (11)$$

где $w \cdot \tau_{пл}$ – угловое перемещение семян в абсолютном движении до момента схода с лопатки, рад:

$$w \cdot \tau_{пл} = \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \cdot \ln \frac{2 \cdot (r_0 \cdot \cos(\varphi + \psi_{(r0)}) + \xi_{пл} \cdot \cos \varphi)}{r_0 \cdot (1 + \sin \varphi) \cdot \cos(\varphi + \psi_{(r0)})}. \quad (12)$$

Таким образом, изменение перемещения семени вдоль вращающейся лопатки, скорость и углы схода семян с лопатки следует считать дополнительными параметрами перемещения семян, которые согласно уравнениям (1)–(12) существенно зависят от коэффициента трения семян и материала лопаток f .

Условие попадания семени во входное окно патрубка (для сеялки Wintersteiger Plotseed S-ВИМ) заключается в том, что угловое перемещение $w \cdot \tau_{пл}$ и угол схода θ должны находиться в следующих пределах:

$$w \cdot \tau_{пл} \in [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]; \quad (13)$$

$$\theta \in [\theta_{\min}, \theta_{\max}]. \quad (14)$$

В соответствии с формулой (2) время падения семян $\tau_{п}$ в вертикальном семяпроводе составляет

$$\tau_{п} = \sqrt{2 \cdot 0,2 / 9,81} = 0,2 \text{ с}$$

Угол наклона радиус-вектора от оси вращения до точки столкновения семян с лопаткой к поверхности лопатки $\psi_{(r0)}$ можно рассчитать по формуле (5):

$$\psi_{(r0)} = \arcsin \left(\frac{0,016}{0,02} \right) \approx 0,92 \text{ рад } (54^\circ).$$

По формуле (6) при $f=0,2$

$$\varphi = \arctg(0,2) = 0,19 \text{ рад } (11^\circ);$$

при $f=0,38$

$$\varphi = \arctg(0,38) = 0,36 \text{ рад } (21^\circ);$$

при $f=0,57$

$$\varphi = \arctg(0,57) = 0,51 \text{ рад } (29^\circ).$$

Тогда согласно формуле (4) условие движения выполняется:

при $f=0,2$

$$0,92 < 1,57 - 0,19 = 1,38;$$

при $f=0,38$

$$0,92 < 1,57 - 0,36 = 1,21;$$

при $f=0,57$

$$0,92 < 1,57 - 0,51 = 1,06.$$

Наконец, определим длину участка движения семян по лопатке $\xi_{\lim}$ согласно формуле (3):

$$\xi_{\lim} = 0,3 \cdot \cos(1) - 0,02 \cdot \cos(0,92) = 0,018 \text{ м}.$$

Для нахождения времени перемещения семян по лопатке $\tau_{пл}$ воспользуемся уравнением (7) с заданными коэффициентами трения f и построим линии перемещения в зависимости от времени t (рис. 5). Коэффициент трения может меняться в зависимости от шероховатости семян (культура, сорт, положение в пространстве, форма) и износа материала лопаток. Зная длину пути семян по лопатке $\xi_{\lim}$, спроецируем ее значение на график рисунка в виде прямой линии. Точки пересечения с линиями $\tau_{пл}(f)$ дадут искомое

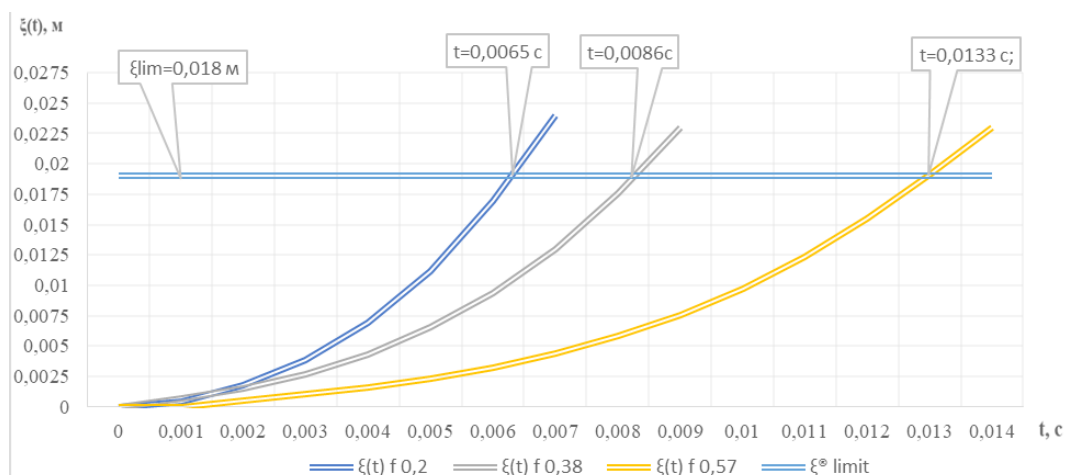


Рис. 5. Пройденный семенами путь по лопатке $\xi_{пл(t)}$ в зависимости от времени и коэффициента трения f

Fig. 5. Path traveled by seeds along the blade $\xi_{пл(t)}$ as a function of time and friction coefficient f

значение $\tau_{пл}$. На основании данных рисунка 5 изменение времени движения по лопатке $\tau_{пл}$ в зависимости от коэффициента трения f можно представить в виде графика (рис. 6). Точками показаны расчетные значения, сплошная линия – аппроксимация – квадратичной функцией.

Формулу времени движения по лопатке $\tau_{пл}$ (с) можно описать нелинейной зависимостью:

$$\tau_{пл} = 0,007 - 0,01 \cdot f + 0,03 \cdot f^2. \quad (15)$$

Изменение скорости $v_{пл(\tau_{пл})}$ от времени $\tau_{пл}$ при различных коэффициентах трения, определяемое по формуле (8) и данным рисунка 5, показано на рисунке 7.

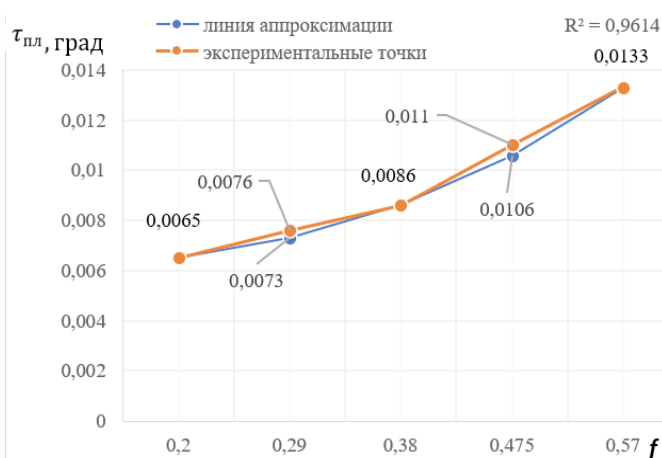


Рис. 6. Изменение времени движения семян по лопатке $\tau_{пл}$ в зависимости от коэффициента трения f

Fig. 6. Change in seed travel time along the blade $\tau_{пл}$ as a function of friction coefficient f

Согласно рисункам 5-7 при коэффициенте трения $f=0,2$ семена проходят расстояние $\xi_{lim}=0,018$ м за время $\tau_{пл}=0,0065$ с, достигая скорости $v_{пл(\tau_{пл_{lim}})}=8,59$ м/с; при $f=0,38$ $\tau_{пл}=0,0086$ с, а $v_{пл(\tau_{пл_{lim}})}=6,3$ м/с; при $f=0,57$ $\tau_{пл}=0,013$ с, $v_{пл(\tau_{пл_{lim}})}=5,83$ м/с.

Аналогично скорость семян при сходе с лопатки $v_{пл(\tau_{пл})}$ (м/с) можно описать нелинейной зависимостью на основании данных рисунка 6 и формулы (8):

$$v_{пл(\tau_{пл})} = 13,24 - 28,78 \cdot f + 27,7 \cdot f^2. \quad (16)$$

Результаты изменения углового перемещения семян в абсолютном движении до схода с лопатки $w \cdot \tau_{пл}$ в зависимости от коэффициента трения f представлены на рисунке 8. Точками показаны расчетные значения, сплошная линия – аппроксимация – квадратичной функцией.

Основываясь на данных рисунка 7, формулу (13) изменения $w \cdot \tau_{пл}$ (град.) с предложенными исходными данными можно описать нелинейной зависимостью:

$$w \cdot \tau_{пл} = 99,51 - 169,37 \cdot f + 646,43 \cdot f^2. \quad (17)$$

Изменение угла схода семян с лопатки θ в зависимости от коэффициента трения f с учетом формулы (17) показано на рисунке 9.

Изменение угла схода семян с лопатки θ (рад) представим в линейном виде:

$$\theta = 47,02 + 37,75 \cdot f. \quad (18)$$

3D-модель процесса выпадения семян в центробежном распределителе, разработанная по формулам (16)-(18) с помощью имитационного моделирования, (рис. 10) показывает выпадение семян на тарелку распределителя, движение по лопаткам, сход

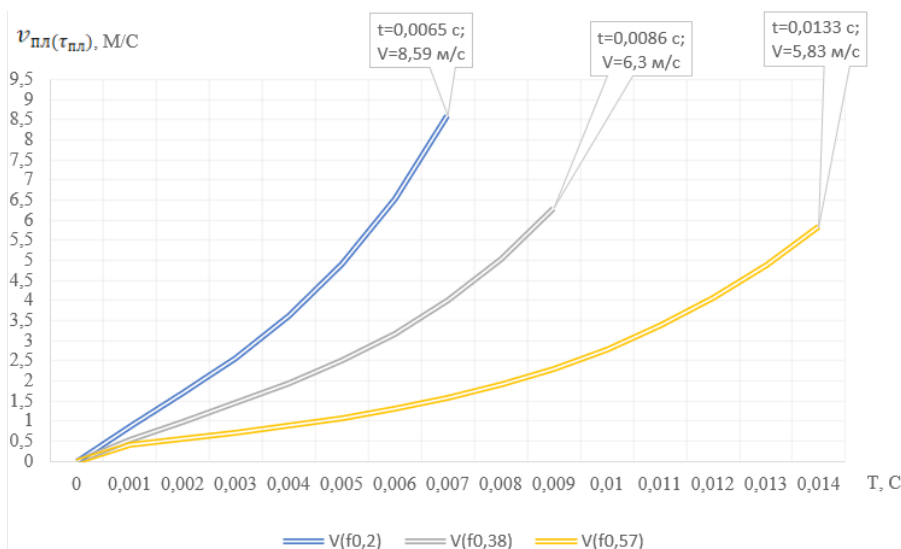


Рис. 7. Изменение скорости семян $v_{пл(\tau_{пл})}$ в зависимости от времени движения его по лопатке распределителя $\tau_{пл}$ при различных коэффициентах трения f

Fig. 7. Change in seed velocity $v_{пл(\tau_{пл})}$ as a function of travel time along the distributor blade $\tau_{пл}$ at various friction coefficients f

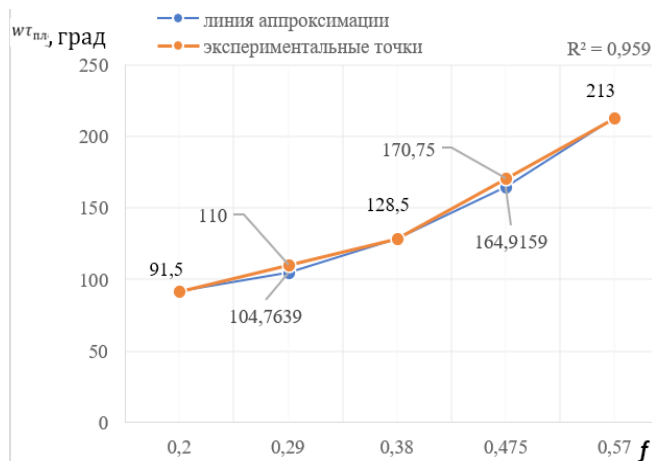


Рис. 8. Изменение углового перемещения семян в абсолютном движении w_{t_n} до момента схода с лопатки в зависимости от коэффициента трения f

Fig. 8. Change in angular displacement of seeds in absolute motion w_{t_n} up to the moment of discharge from the blade as a function of friction coefficient f

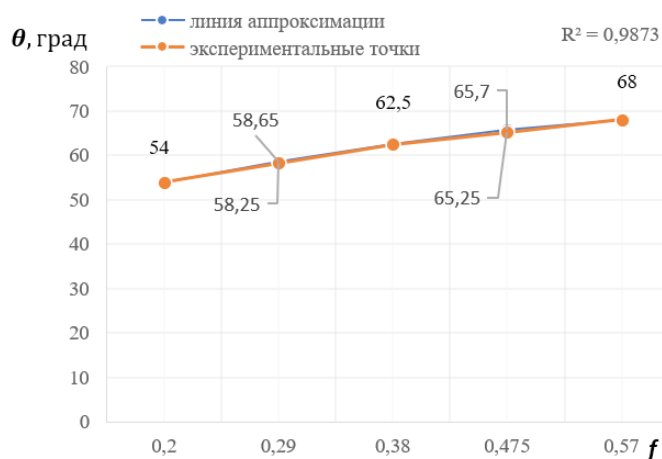


Рис. 9. Изменение угла схода семян с лопатки θ от коэффициента трения f

Fig. 9. Change in the seed discharge angle from the blade θ as a function of friction coefficient f

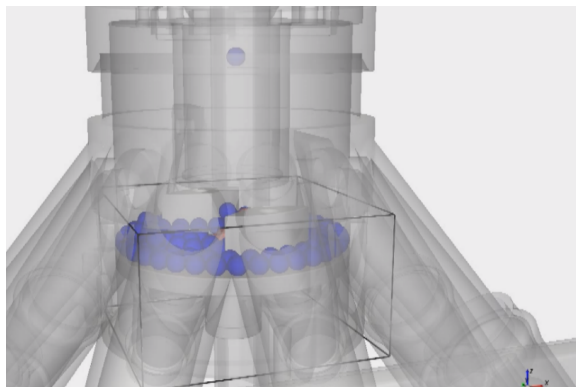


Рис. 10. Фрагмент с работы имитационной модели выпадения семян в центробежном распределителе

Fig. 10. Fragment of the simulation model operation for seed fallout in the centrifugal distributor

семян с лопаток при различных коэффициентах трения. На рисунке 10 цветом выделены семена, оставшиеся на лопатке после схода с нее.

Визуализация результатов работы имитационной модели представлена на рисунке 11. Заштрихованная область на тарелке соответствует области перемещения семян при радиусе подачи 0,019 м. По форме этой области можно сделать вывод о том, что при увеличении коэффициента трения с 0,2 до 0,38 угловое перемещение семян до схода с лопатки увеличивается с 1,59 рад (91,5°, траектория «а») – до 2,24 рад (128,5°, траектория «б»), а угол схода с лопатки увеличивается с 0,94 рад (54°, траектория «а») до 1,09 рад (62,5°, траектория «б»). При увеличении коэффициента трения до 0,57 угловое перемещение семян увеличивается до 3,71 рад (213°), а угол схождения с лопатки – до 1,19 рад (68°) (траектория «в»).

Анализ изменения скорости, времени, углового перемещения семян при сходе с лопатки от коэффициента трения семян зерновых, зернобобовых культур и материала лопаток показал увеличение коэффициента трения семян о лопатки с 0,2 до 0,38, что приводит к снижению скорости на 36%, увеличивает время перемещения семян на 32% и угловое перемещение на 40%. При коэффициенте трения 0,57 скорость снижается еще на 8%, а время перемещения семян и угловое перемещение увеличивается

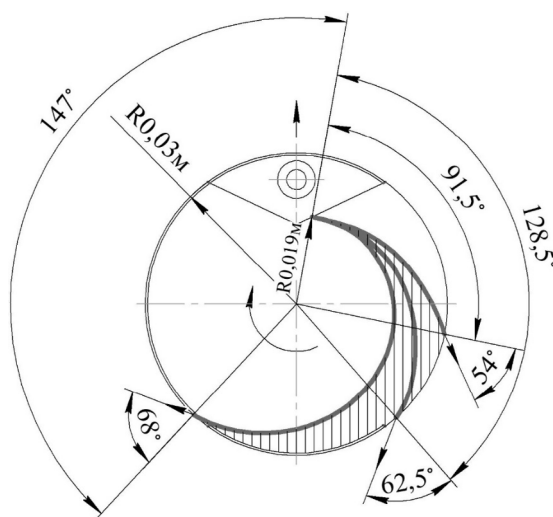


Рис. 11. Визуализация перемещения семян при их взаимодействии с лопаткой в зависимости от коэффициента трения f :

линия а – при $f = 0.2$; линия б – при $f = 0.38$; линия в – при $f = 0.57$; заштрихованная площадь – область выпадения семян при радиусе подачи 0,019 м

Fig. 11. Visualization of seed movement during their interaction with the blade as a function of friction coefficient f :

line a – at $f = 0.2$; line b – at $f = 0.38$; line c – at $f = 0.57$; shaded area – seed fallout zone at a feed radius of 0.019 m

на 54 и 65% соответственно. Отметим, что при коэффициенте трения 0,38 (траектория «б»), угле схода 62,5 град. и скорости 6,3 м/с семена попадают в окно патрубка, а при 0,2 и 0,57 семена не попадают в окна и возвращаются на лопатку. Следовательно, при коэффициенте трения 0,38 для попадания семян в окно патрубка рекомендуем использовать частоту вращения диска 3100 об/мин.

Выводы

1. Посев семян зерновых и зернобобовых культур на 3-м этапе селекционных работ зависит от параметров перемещения семян в центробежном распределителе – таких, как скорость семян при сходе с лопатки, время движения и угловое перемещение семени по лопатке.

Список источников

1. Измайлов А.Ю. Интеллектуальные технологии и роботизированные средства в сельскохозяйственном производстве // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89, № 5. С. 536-538. <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895536-538>. EDN: UKKACW
2. Бейлис В.М., Ценч Ю.С., Коротченя В.М., Старовытов С.И., Кынев Н.Г. Тенденции развития прогрессивных машинных технологий и техники в сельскохозяйственном производстве // Вестник ВИЭСХ. 2018. № 4. С. 150-156. EDN: YTHPID
3. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 4. С. 6-10. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
4. Чулков А.С., Шайхов М.М. Математическое моделирование работы конусного высевающего аппарата селекционной сеялки // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 4. С. 40-46. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-4-40-46>
5. Чулков А.С., Чаплыгин М.Е., Шайхов М.М. Роботизированное кассетное загрузочное устройство карусельного типа для селекционной сеялки // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2024. Т. 17, № 3. С. 99-107. EDN: UREWAC
6. Чулков А.С., Чаплыгин М.Е., Шайхов М.М. Обоснование параметров работы роботизированного кассетного загрузочного устройства карусельного типа для селекционной сеялки // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 4. С. 549-562. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.549-562>
7. Cheng X.P., Li H.W., He J. et al. Optimization of operating parameters of seeding device in plot drill with seeding control system. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021;14(3):83-91. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211403.6218>
8. Шварц А.А., Беседин Б.П., Колесников Е.Ю. Конструктивные особенности и результаты работы разбрасывателя органико-минеральных удобрений // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 7. С. 186-188. EDN: YIKNIV
9. Cool S.R., Pieters J.G., Seatovic D. et al. Development of a stereovision-based technique to measure the spread

2. Коэффициент трения семян о материал лопатки нелинейно влияет на параметры перемещения семян; увеличение коэффициента трения семян с 0,2 до 0,57 приводит к снижению скорости семян при сходе на 44%, углового перемещения – на 65% и к увеличению времени перемещения семян на 54%.

3. Качественный посев семян зерновых и зернобобовых культур возможен при коэффициенте трения семян о материал лопатки 0,38, угле схода семени с лопатки 62,5 град. и скорости семени при сходе 6,3 м/с.

4. Разработанная 3D-модель процесса движения семян в центробежном распределителе поможет в дальнейшем разработать высевающий аппарат с электроприводом для сеялки 3-го этапа селекционных работ с роботизированным кассетным загрузочным устройством.

References

1. Izmaylov A.Yu. Intelligent technologies and robotic means in agricultural production. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2019;89(5):536-538. (In Russ.)
2. Beylis V.M., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., Starovoytov I.S., Kynev N.G. Trends in the development of advanced machine technologies and techniques in agricultural production. *Vestnik VIESKH*. 2018;4:150-156. (In Russ.)
3. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6-10. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
4. Chulkov A.S., Shaikhov M.M. Mathematical modeling of the operation of a cone-type seeding unit of a crop breeding seeder. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(4):40-46. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-4-40-46>
5. Chulkov A.S., Chaplygin M.E., Shaykhov M.M. Carousel type robotic cassette loading device for breeding seeder. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2024;17(3):99-107. (In Russ.)
6. Chulkov A.S., Chaplygin M.E., Shaykhov M.M. Justifying the operation parameters of a robotic cassette loading device of the carousel type for a selection seeder. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):549-562. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.549-562>
7. Cheng X.P., Li H.W., He J. et al. Optimization of operating parameters of seeding device in plot drill with seeding control system. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021;14(3):83-91. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211403.6218>
8. Shvarts A.A., Besedin B.P., Kolesnikov E.Yu. Design features and performance characteristics of an organic and mineral fertilizer spreader. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2015;7:186-188. (In Russ.)
9. Cool S.R., Pieters J.G., Seatovic D. et al. Development of a stereovision-based technique to measure the spread patterns of granular fertilizer spreaders. *Sensors*. 2017;17(6):1396. <https://doi.org/10.3390/s17061396>
10. Ou M., Wang G., Lu Y. et al. Structure optimization and performance simulation of a double-disc fertilizer spreader based on EDEM-CFD. *Agronomy*. 2025;15(5):1025. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051025>

patterns of granular fertilizer spreaders. *Sensors*. 2017;17(6):1396. <https://doi.org/10.3390/s17061396>

10. Ou M., Wang G., Lu Y. et al. Structure optimization and performance simulation of a double-disc fertilizer spreader based on EDEM-CFD. *Agronomy*. 2025;15(5):1025. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051025>

11. Bivainis V., Jotautienė E., Lekavičienė K. et al. Theoretical and experimental verification of organic granular fertilizer spreading. *Agriculture*. 2023;13(6):1135. <https://doi.org/10.3390/agriculture13051135>

12. Guan Z., Mu S., Jiang T. et al. Development of centrifugal disc spreader on tracked combine harvester for rape undersowing rice based on DEM. *Agriculture*. 2022;12(4):562. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040562>

13. Черноволов В.А., Хижняк В.И., Несмиян А.Ю. и др. Методика расчета угла бросания удобрений и семян центробежным аппаратом с отклоненными от радиуса лопатками как функции случайных координат точки подачи // Вестник аграрной науки Дона. 2022. Т. 15, № 2. С. 17-28. EDN: AELVMJ

14. Мальцев П.С. Разработка и исследование высевающего аппарата избыточного давления для точного поштучного дозирования семян сои // Агроэкоинфо. 2023. № 3. С. 25. EDN: ICADFN

15. Марвко И.А., Новиков В.И., Зубрилина Е.М. и др. Методика и результаты определения коэффициента трения семенного материала с использованием автоматизированного устройства // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2019. № 147. С. 10-20. EDN: BKHDF

16. Черноволов В.П., Ужахов Т.М. Моделирование процессов распределения минеральных удобрений центробежными аппаратами: Монография. Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2011. 264 с. EDN: QLCEQF

Информация об авторах

¹ Чаплыгин Михаил Евгеньевич, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук; misha2728@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>; SPIN-код: 2268-6927

² Степанов Кирилл Александрович, канд. техн. наук; 89999878895@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-1511-4307>; SPIN-код: 6831-0519

³ Чулков Андрей Сергеевич, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук; andrei.chulkov@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-1178-451X>; SPIN-код: 1726-9749

⁴ Мнацаканян Анаит Леоновна, магистрант; anahit-mal@mail.ru; SPIN-код: 2096-6644

^{1,2,3,4} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Вклад авторов

М.Е. Чаплыгин – научное руководство, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; К.А. Степанов – создание черновика рукописи, администрирование данных;

А.С. Чулков – методология, ресурсы;

А.Л. Мнацаканян – проведение расчетов, ресурсы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 23.01.2026; после рецензирования и доработки 16.07.2026; принята к публикации 03.07.2026

11. Bivainis V., Jotautienė E., Lekavičienė K. et al. Theoretical and experimental verification of organic granular fertilizer spreading. *Agriculture*. 2023;13(6):1135. <https://doi.org/10.3390/agriculture13051135>

12. Guan Z., Mu S., Jiang T. et al. Development of centrifugal disc spreader on tracked combine harvester for rape undersowing rice based on DEM. *Agriculture*. 2022;12(4):562. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040562>

13. Chernovolov V.A., Khizhnyak V.I., Nesmiyan A.Yu. et al. Method of calculating the throwing angle of fertilizers and seeds by a centrifugal apparatus with blades displaced from the radius as a function of random coordinates of the feed point. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2022;15(2):17-28.

14. Maltsev P.S. Development and research of an overpressure seeding apparatus for precise piece-by-piece dosing of soybean seeds. *AgroEkoInfo*. 2023;3:25. (In Russ.)

15. Marvko I.A., Novikov V.I., Zubrilina E.M. et al. Methods and results of the seed material friction coefficient determining using an automated device. *Polythematic online electronic Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2019;147:10-20. (In Russ.)

16. Chernovolov V.P., Uzhakhov T.M. Modeling the distribution of mineral fertilizers by centrifugal units. Monograph. Zernograd, FGOU VPO ACHGAA, 2011. 264 p. (In Russ.)

Author Information

Mikhail E. Chaplygin¹, CSc (Eng); misha2728@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>; Researcher ID: AAZ-6056-2020

Kirill A. Stepanov², CSc (Eng); 89999878895@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-1511-4307>

Andrey S. Chulkov³, CSc (Eng); andrei.chulkov@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-1178-451X>; Researcher ID: JOZ-1910-2023

Anahit L. Mnatsakanyan⁴, MSc student; anahit-mal@mail.ru ^{1,2,3,4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russia, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., 5

Author Contributions

M.E. Chaplygin – research supervision, conceptualization; writing – review and editing of the manuscript;

K.A. Stepanov – writing – original draft, review and editing of the manuscript; data curation;

A.S. Chulkov – methodology, resources;

A.L. Mnatsakanyan – data curation; formal analysis; resources.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 23.01.2026; Revised 16.07.2026; Accepted 03.07.2026