

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.333.5

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-47-53

РАЗРАБОТКА ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА РАЗБРАСЫВАТЕЛЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

ПАНФЕРОВ НИКОЛАЙ СЕРГЕЕВИЧ, канд. техн. наук, старший научный сотрудник¹nikolaj-panfyorov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7431-7834>; Researcher ID: CAF-7219-2022**КОСТЕНКО МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ**, д-р техн. наук, профессор²km340010@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3733-3717>; Researcher ID: G-9926-2019**ТЕТЕРИН ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник¹v.s.teterin@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8116-723X>; Researcher ID: G-7742-2019**ПЕХНОВ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**, старший научный сотрудник¹

pehnov@mail.ru, Researcher ID: CAF-7059-2022

СИБИРЁВ АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ, д-р техн. наук, старший научный сотрудник¹sibirev2011@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>; Researcher ID: M-6230-2016**МОСЯКОВ МАКСИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ** ✉, канд. техн. наук, доцент³Maks.Mosyakov@yandex.ru ✉; <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>; Researcher ID: A-8482-2019¹ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5² Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева; 390044, Российская Федерация, Рязанская область, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1³ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. При дифференцированном внесении твердых минеральных удобрений (ТМУ) точно регулировать дозировку и равномерно распределять гранулы по полю позволяют рабочие органы центробежных распределителей удобрений. С целью выявления наиболее рациональных параметров и режимов распределителя ТМУ, влияющих на траекторию полета гранул и равномерность распределения удобрений по полю, проведены теоретические и экспериментальные исследования центробежного диска распределителя твердых минеральных удобрений, оснащенного поворотной разгонной камерой и набором сменных П-образных лопаток. Описано влияние длины лопаток на траекторию и дальность полета гранул удобрений, а также влияние поворота выходного окна разгонной камеры на факел распределения удобрений. На разработанном лабораторном стенде распределителя твердых минеральных удобрений проведен эксперимент по определению аэродинамических свойств гранул нитроаммофоски (60:60:60), который позволил определить физические параметры, влияющие на дальность и траекторию их полета – коэффициент парусности и критическую скорость. Установлено, что смещение выходного окна разгонной камеры распределяющего диска ведет к перемещению зоны интенсивного покрытия в направлении поворота выходного окна разгонной камеры. Это позволяет регулировать интенсивность и оказывает непосредственное влияние на зону рассева гранул твердых минеральных удобрений. Дано обоснование наиболее рациональной конструкции распределяющего диска. Установлено, что наибольшая равномерность распределения твердых минеральных удобрений достигается при использовании диска с 8 попарно соосно расположенными лопатками длиной 300, 250, 200, 100 мм.

Ключевые слова: распределитель твердых минеральных удобрений, центробежные рабочие органы, дифференцированное внесение, равномерность распределения, твердое минеральное удобрение, внесение удобрений, разгонная камера.

Формат цитирования: Панферов Н.С., Костенко М.Ю., Тетерин В.С., Пехнов С.А., Сибирёв А.В., Мосяков М.А. Разработка центробежного рабочего органа разбрасывателя минеральных удобрений // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 47-53. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-47-53>.

© Панферов Н.С., Костенко М.Ю., Тетерин В.С., Пехнов С.А., Сибирёв А.В., Мосяков М.А., 2022



ORIGINAL PAPER

DESIGN OF A CENTRIFUGAL WORKING UNIT OF A MINERAL FERTILIZER SPREADER

NIKOLAY S. PANFEROV, PhD (Eng), Senior Research¹nikolaj-panfyorov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7431-7834>; Researcher ID: CAF-7219-2022**MIKHAIL YU. KOSTENKO**, DSc (Eng), Professor²km340010@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3733-3717>; Researcher ID: G-9926-2019

VLADIMIR S. TETERIN, PhD (Eng), Senior Research¹

v.s.teterin@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8116-723X>; Researcher ID: G-7742-2019

SERGEY A. PEKHOV, Senior Research¹

pehnov@mail.ru; Researcher ID: CAF-7059-2022

ALEKSEI V. SIBIRYOV, DSc (Eng), Senior Research Engineer¹

sibirev2011@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>; ResearcherID: M-6230-2016

MAKSIM A. MOSYAKOV[✉], PhD (Eng), Associate Professor³

Maks.Mosyakov@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>; ResearcherID: A-8482-2019

¹ Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation

² Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev; 1 Kostycheva Str., Ryazan 390044, Russian Federation

³ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. In variable-rate application of solid mineral fertilizers (SMF), working units of centrifugal fertilizer distributors can regulate precisely the application rate and evenly distribute pellets over the field. To determine the most rational parameters and modes of a solid fertilizer distributor, influencing the flight path of pellets and the uniformity of their distribution over the field, the authors carried out theoretical and experimental research of a centrifugal disc of a solid fertilizer distributor equipped with a rotary acceleration chamber and a set of exchangeable U-shaped blades. The authors describe the influence of the blade length on the trajectory and the flight distance of the fertilizer pellets as well as the influence of the rotation of the dispersal chamber outlet window on the fertilizer distribution pattern. The experiment on determining aerodynamic properties of the nitroammonium phosphate pellets (60:60:60) was carried out using the developed laboratory bench of the solid fertilizer distributor. The experiment allowed determining the physical parameters of pellets influencing the range and trajectory of their flight – the winglet ratio and the critical speed. It was found that the rotation displacement of the dispersal chamber outlet window of the spreading disc leads to the displacement of the intensive coverage zone in the direction of the window rotation. This makes it possible to regulate the intensity and has a direct impact on the distribution zone of solid mineral fertilizers. The paper justifies the most rational design of the spreading disc. The research proved that the greatest uniformity of solid mineral fertilizer spreading is observed when using a disk with eight paired coaxially located blades with a length of 300, 250, 200, and 100 mm.

Keywords: distributor of solid mineral fertilizers, centrifugal working units, variable-rate application, uniformity of distribution, solid mineral fertilizer, fertilizer application, dispersal chamber

For citation: Panferov N.S., Kostenko M.Yu., Teterin V.S., Pekhov S.A., Sibiryov A.V., Mosyakov M.A. Design of a centrifugal working unit of a mineral fertilizer spreader. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(6): 47-53. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-47-53>.

Введение. Современное сельскохозяйственное производство подразумевает не только использование энергоёмких многооперационных машин с автоматическим управлением и контролем выполняемой операции, но и эффективное использование агрономических ресурсов и современных агротехнологий, – в частности, приемов повышения урожайности за счёт рационального применения удобрений [1, 2].

В настоящее время большую часть вносимых удобрений составляют твердые (гранулированные и порошкообразные) минеральные удобрения (ТМУ). От качества, количества

и своевременности их внесения зависит раскрытие сортового потенциала культуры в виде урожайности и качества конечного продукта [3-5].

Основные способы внесения ТМУ подразделяются по срокам внесения (основное, припосевное, подкормка), по характеру распределения (внутрипочвенное и поверхностное) и по точности внесения (равномерное и дифференцированное) (рис. 1). Однако большая часть вносимых удобрений приходится на поверхностное основное равномерное внесение (до 70%) [4, 6].

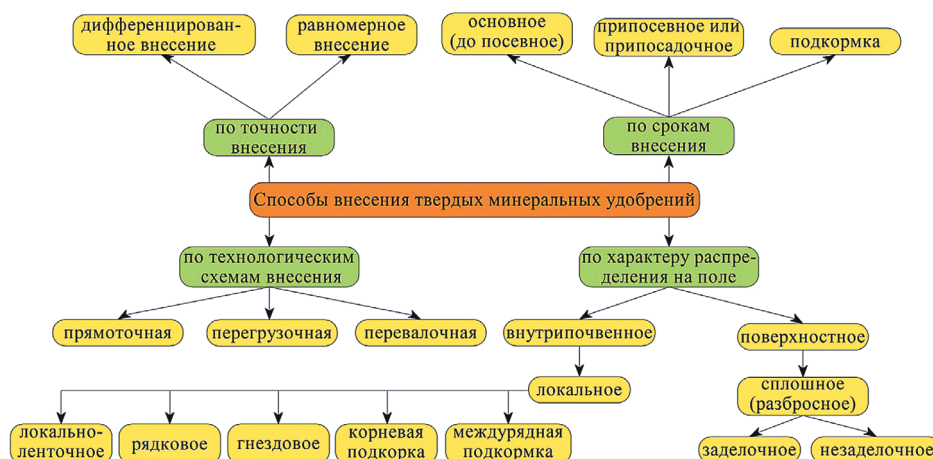


Рис. 1. Способы внесения минеральных удобрений

Fig. 1. Methods of applying mineral fertilizers

Для основного внесения ТМУ чаще всего используются навесные или прицепные распределители твердых минеральных удобрений с центробежными рабочими органами. Сплошное внесение ТМУ на всей площади поля происходит согласно заданной дозе (кг/га), рассчитанной агрономом исходя из текущих агрохимических условий (предшественников, выноса элементов, состава почвы, вида удобрений, количества действующего вещества т.д.) [7].

В последнее время широкое распространение получила технология дифференцированного внесения ТМУ машинами, оснащенными интеллектуальными системами исполнительных механизмов и датчиков, в том числе GPS или ГЛОНАСС, которые на основании химического анализа почвы и согласно карте заданий в автоматическом режиме выставляют дозу ТМУ, необходимую на данном участке поля [1, 8]. Преимуществами данной технологии являются экономия удобрений и их более эффективное использование в сравнении со сплошным внесением, повышение урожайности и качества конечной продукции, а также снижение антропогенной нагрузки на поля. Недостатками же данной системы являются сложность конструкции, высокая стоимость оборудования и компонентов для её применения и недостаток аналогов на отечественном рынке.

При дифференцированном внесении ТМУ лимитирующим фактором проведения данной операции является точная доставка удобрений в заданную площадь питания растений. На процесс дифференцированного распределения ТМУ наибольшее влияние оказывают конструктивные параметры рабочего органа, технологические параметры, а также сопротивление воздуха, возникающее в процессе полета гранулы и влияющее на её траекторию. Для разработки и создания системы дифференцированного внесения ТМУ необходимо определить, как происходит распределение ТМУ по площади поля и какие параметры оказывают наибольшее влияние на данный процесс [9-13].

Цель исследований: проведение теоретических и лабораторных работ, выявление наиболее рациональных параметров и режимов распределителя ТМУ, влияющих на траекторию полета гранул и равномерность распределения удобрений по полю.

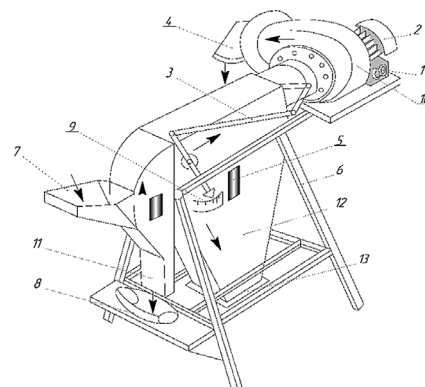


Рис. 2. Общий вид лабораторной установки по определению аэродинамических свойств гранул ТМУ:

1 – пускатель; 2 – электродвигатель; 3 – механизм регулировки воздушной заслонки; 4 – выходной патрубок; 5 – смотровое окно; 6 – подставка под очиститель; 7 – загрузочный бункер; 8 – ковш; 9 – шкала положения заслонки; 10 – вентилятор; 11 – вертикальный канал; 12 – отстойник; 13 – трубопровод

Fig. 2. General view of a laboratory installation for determining the aerodynamic properties of solid mineral fertilizer pellets:

1 – starter; 2 – electric motor; 3 – air damper adjustment mechanism; 4 – outlet pipe; 5 – viewing window; 6 – stand for a cleaner; 7 – loading hopper; 8 – bucket; 9 – damper position scale; 10 – fan; 11 – vertical channel; 12 – sump; 13 – pipeline

Материалы и методы. Траектория полета гранул твердых минеральных удобрений зависит в большей степени от двух показателей:

– коэффициента парусности

$$k_b = \frac{2g \cdot \gamma_r \cdot d}{3\gamma \cdot V_{кр}^2}, \quad (1)$$

где g – ускорение силы тяжести, m/c^2 ; γ_r – плотность гранулы, kg/m^3 ; γ – плотность воздуха, $\gamma = 1,2 kg/m^3$; $V_{кр}$ – критическая скорость гранул (скорость витания), m/c ; d – диаметр гранул, mm ;

– критической скорости

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{G}{k_b \cdot \gamma \cdot F}}, \quad (2)$$

где G – сила тяжести, N ; F – миделево сечение гранулы, то есть площадь её проекции на плоскость, перпендикулярную её воздушному потоку, m .

Для определения этих значений проведён лабораторный эксперимент по определению аэродинамических свойств ТМУ – в частности, нитроаммофоски (60:60:60). Отбиралась и взвешивалась проба удобрений массой 500 г с точностью до первого десятичного знака. Полученная проба просеивалась вручную через набор сит с размером ячеек 1...6 мм и частотой возвратно-поступательного перемещения 120 раз в 1 мин при амплитуде движений 70 мм. После просева остатки с каждого сита отбирались и взвешивались с точностью до первого десятичного знака. В результате в процентном соотношении получился следующий гранулометрический состав удобрения: фракция 6 мм и более – 0,1%; 5...6 мм – 5%; 4...5 мм – 30,3%; 3...4 мм – 54,5%; менее 3 мм – 10,1%.

Для определения аэродинамических показателей использовалась лабораторная установка (рис. 2).

На подставке 6 смонтирован отстойник 12 и вертикальный канал 11. Включение установки производится при помощи пускателя 1, подающего напряжение на электродвигатель 2. В свою очередь, электродвигатель 2 приводит во вращение вентилятор 10, который засасывает воздух через вертикальный канал 11, отстойник 12, трубопровод 13 и через выходной патрубок 4 выпускает его в окружающее пространство. Скорость воздушного потока регулируется с помощью механизма воздействия на воздушную заслонку 3. Величина открытия заслонки определяется показателем стрелки на шкале 9. Деление 100 соответствует полному закрытию заслонки, а деление 0 – полному открытию.

Для проведения эксперимента в пятикратной повторности было отсортировано по 500 г каждой из фракций удобрений. После осуществления пуска установки навеску гранул минеральных удобрений массой 100 г постепенно засыпали в загрузочный бункер. Поворотом заслонки 3 устанавливалась минимальная и максимальная скорость воздушного потока. Скорость, при которой начиналось выделение легкой фракции навески в отстойник 12, принималась за минимальную, а при «поднятии» всей навески скорость считалась максимальной. Диапазон между максимальной и минимальной скоростью подразделяли на 10 интервалов, пользуясь показаниями шкалы регулировки заслонки. Через каждые 5 мин работы замеряли скорость воздушного потока, для чего использовался термоанемометр модели DT-8880. На основании полученных данных для каждой из фракций минеральных удобрений диапазон значений критической скорости $V_{кр}$ составил 3,7...11 м/с. После этого расчетным путем определялся коэффициент парусности гранул твердых минеральных удобрений k_v , который составил 0,07.

Лабораторный эксперимент проведён на разработанном компактном лабораторном стенде, который с помощью датчиков и широкого диапазона регулировок технологического процесса имеет возможность собирать данные о работе исследуемого узла [14]. Данный стенд включает в свой состав все элементы серийного распределителя ТМУ: распределяющий диск, дозирующее устройство, ворошители и др. [15, 16] (рис. 3а).

Работу по распределению ТМУ по полю осуществляет центробежный распределяющий диск с лопатками, а количество удобрений и доставка их на распределяющий диск определяется и осуществляется системой дозирования. Анализ конструкций распределяющего диска показал перспективность систем, оснащенных камерами разгона, имеющих более двух лопаток разной длины [8]. В таких системах происходит дозированное поступление гранул на диск распределителя, их сход с лопаток разной длины позволяет вносить удобрения «послойно», контролировать и регулировать данный процесс.

На лабораторный стенд распределителя ТМУ спроектирован и смонтирован диск с разгонной камерой, сменными лопатками и системой дозирования (рис. 3б) [17].

После определения гранулометрического состава и аэродинамических свойств гранул, учитывая площадь отведенной опытной делянки 150 м² и среднестатистическую дозу вносимых удобрений 400 кг/га (N₆₀P₆₀K₆₀), минеральное удобрение нитроаммофоски расфасовали на порции по 6 кг. Для определения равномерности распределения минеральных удобрений были применены лотки размером 500 x 500 мм согласно ГОСТ 28714-2007¹. Изготовленные лотки расставлялись на площади 150 м² в ангаре согласно схеме, представленной на рисунке 4.

После расстановки лотков лабораторный стенд подключался к источнику питания и персональному компьютеру с установленной на нем интеллектуальной системой управления технологическими процессами внесения твердых минеральных удобрений. Затем на нем монтировался экспериментальный диск разбрасывателя центробежного типа с выбранными числом, длиной и формой лопаток.

В процессе исследования использовались прямые лопатки «П-образной» формы длиной от 100 до 300 мм. Высота установки распределяющего диска от земли составила 0,7 м, угол наклона относительно горизонта – 0°, частота вращения – 550 об/мин.

В бункер лабораторного стенда загружалась порция минеральных удобрений. При выходе двигателя на заданную частоту вращения производился выбор необходимого расстояния выдвижения штифта актуатора для открытия шиберных заслонок на нужную величину и начинался процесс распределения удобрений. После завершения каждой повторности происходил сбор и проводилось взвешивание образцов из каждого лотка.

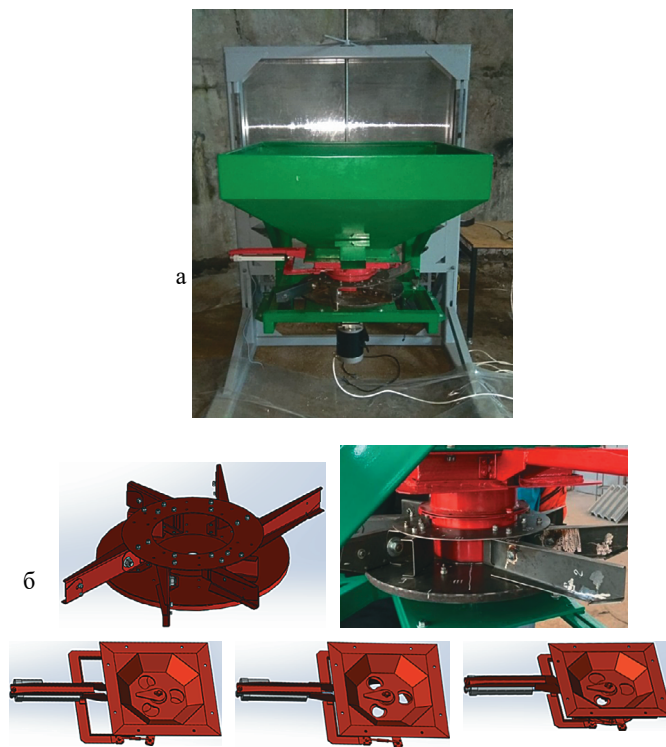


Рис. 3. Разработанный лабораторный стенд распределителя твердых минеральных удобрений: а – общий вид; б – система дозирования и распределяющий диск

Fig. 3. Developed laboratory bench of the distributor of solid mineral fertilizers:

a – general view; b – dosing system and distributing disk

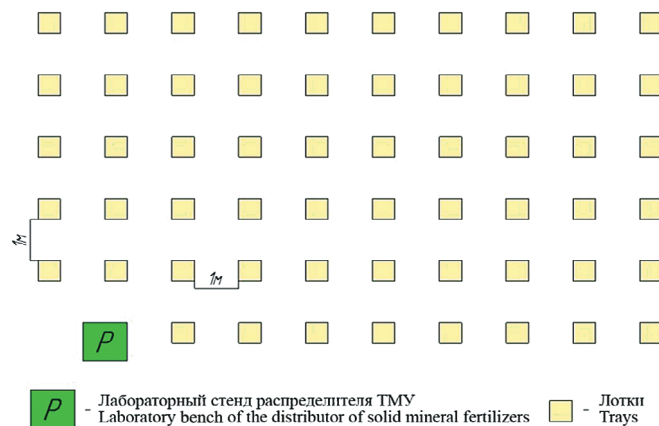


Рис. 4. Схема расположения лотков
Fig. 4. Layout of the trays

¹ ГОСТ 28714-2007. Машины для внесения твердых минеральных удобрений. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2008. 69 с.

Результаты и их обсуждение. Одним из факторов, наиболее влияющих на равномерность внесения твердых минеральных удобрений, является траектория их полета после схода с лопаток центробежного разбрасывающего диска. На траекторию полета гранул минеральных удобрений влияют не только технические и технологические параметры лабораторного стенда разбрасывателя центробежного типа, но и абсолютная скорость схода частицы с диска, высота расположения диска над поверхностью земли и аэродинамические свойства самих гранул твердых минеральных удобрений. Проведенные теоретические исследования [18, 19] позволили определить относительную скорость движения частиц по лопатке распределяющего диска (3) и дальность полета гранул (4):

$$V_R = \frac{R_0 \cdot \omega^2 \cdot (\cos \varphi_0 - \sin \varphi_0) + S_{л} \cdot \omega^2 - f \cdot g}{f \cdot \omega} + (V_0 - \frac{R_0 \cdot \omega^2 (\cos \varphi_0 - f \sin \varphi_0) + S_{л} \cdot \omega^2 - f \cdot g}{f \cdot \omega}) \cdot e^{-f \omega t}, \quad (3)$$

где V_R – относительная скорость движения частицы по лопатке, м/с; R_0 – расстояние начала лопатки от центра диска, м; φ_0 – начальное значение угла φ , рад; $S_{л}$ – путь, пройденный частицей по лопатке, м; ω – угловая скорость вращения диска, рад/с; f – коэффициент трения удобрения по металлу; V_0 – скорость частицы на выходе из разгонной камеры, м/с;

$$l_x = \frac{\ln(k_b V_{нач} t + 1)}{k_b}, \quad (4)$$

где $V_{нач}$ – скорость гранулы в момент схода её с лопатки, м/с; t – время полета гранулы, с; l_x – дальность полета гранулы, м.

Полученный коэффициент парусности позволил рассчитать траекторию полета гранул удобрений в зависимости от длины установленных на распределяющем диске лопаток и угла расположения окна разгонной камеры лабораторного стенда распределителя ТМУ (рис. 5).

Отметим, что изменение положения разгонной камеры позволяет изменять направление факела распределения ТМУ в направлении, соответствующем направлению поворота. При длине лопаток 0,3 м ширина зоны распределения составляет примерно 16 м, а дальность зоны распределения – 8 м (рис. 5а). В то же время при длине лопаток 0,1 м ширина зоны распределения снижается примерно до 12 м, а дальность – до 6 м (рис. 5б).

Можно предположить, что для максимального увеличения зоны покрытия и сохранения высокой равномерности на всем удалении от распределяющего диска рациональным является использование разбрасывающего диска с комплектом лопаток разной длины.

Для подтверждения теоретических зависимостей на лабораторном стенде по представленной выше методике проведены лабораторные исследования по определению рационального угла опережения выходного окна разгонной камеры.

Проекция распределения гранул ТМУ диском с четырьмя парами лопаток разной длины в зависимости от угла опережения выходного окна разгонной камеры распределяющего диска представлены на рисунке 6.

Установлено, что смещение выходного окна разгонной камеры распределяющего диска ведет к перемещению зоны интенсивного покрытия в направлении поворота выходного окна разгонной камеры, что позволяет регулировать интенсивность рассева гранул ТМУ.

Теоретические исследования показали влияние длины лопаток на скорость и дальность полета гранул удобрений. Для проверки теоретических данных проведена серия

экспериментов, в которой варьировались длина лопаток, частота вращения диска, положение выходного окна разгонной камеры. В ходе проведения экспериментальных исследований подтверждено влияние на дальность полета гранул и их распределение по площади рассева длины лопаток (рис. 7, 8).

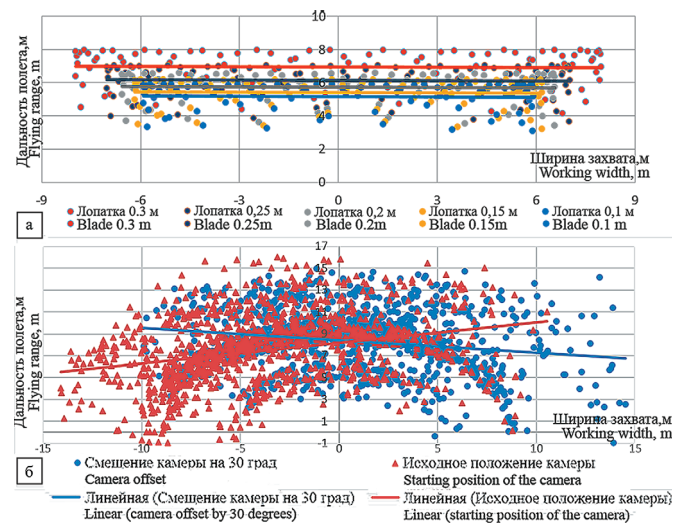


Рис. 5. Распределение гранул удобрения диском с различной длиной лопаток (а) и поворотом разгонной камеры на 30° (б)

Fig. 5. Fertilizer distribution zone for different blade lengths (a), displacement of the distribution pattern when the acceleration chamber is rotated by 30° (b)

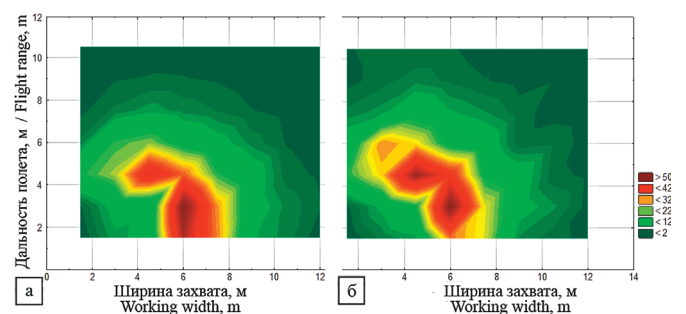


Рис. 6. Проекция распределения гранул минеральных удобрений при угле опережения выходного окна разгонной камеры +30° (а) и 0° (б)

Fig. 6. Projection of the distribution of mineral fertilizer pellets when using a disk with pairs of blades of different lengths and the advance angle of the dispersal chamber output window +30° (a) end 0° (b)

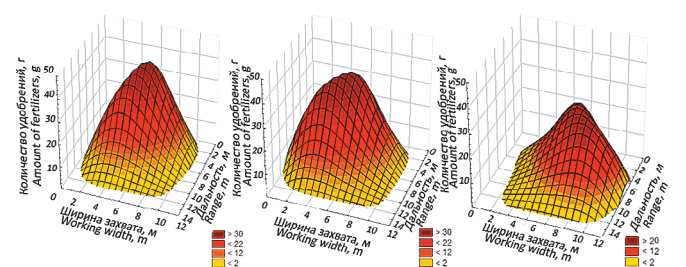


Рис. 7. График поверхности распределения ТМУ по площади рассева диском с 6 одинаковыми лопатками длиной 200 мм (а), 250 мм (б) и 300 мм (в)

Fig. 7. Using distributing discs with a different set of blades: а) with six blades with a length of 200 mm б) with six blades with a length of 250 mm в) with six blades with a length of 300 mm

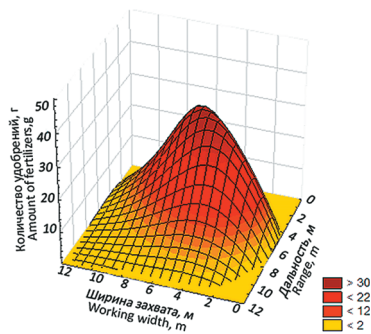


Рис. 8. График поверхности распределения ТМУ по площади рассева диском с 8 соосно расположенными лопатками:

1 пара – 100 мм; 2 пара – 200 мм; 3 пара – 250 мм; 4 пара – 300 мм

Fig. 8. Graph of the surface of the distribution of solid mineral fertilizers over the dispersion area when using a disk with pairs of blades of different lengths:
100 mm; 200 mm; 250 mm; 300 mm

В результате экспериментальных исследований установлено, что длина лопаток оказывает существенное влияние на дальность полёта гранул и их распределение по площади рассева. Так, с увеличением длины лопаток возрастают ширина захвата

и дальность полёта гранул. При сравнении результатов установлено, что максимальное количество удобрений на единицу площади снижается с 35 г при длине лопатки 200 мм до значения менее 20 г при длине лопатки 300 мм. При этом наблюдается перераспределение ТМУ по площади рассева, а также увеличивается ширина захвата с 10 м до 12 м соответственно. Наблюдаются перераспределение частиц по площади и смещение зоны рассева относительно центра по ходу вращения диска.

Выводы

1. Для возможности регулировки равномерности распределения твердых минеральных удобрений разбрасывателями центробежного типа необходимо зону с наибольшей дозой внесения удобрений располагать по центру ширины захвата.
2. Смещение выходного окна разгонной камеры, оказывающее влияние на зону рассева гранул ТМУ, может использоваться для корректировки внесения минеральных удобрений.
3. Наибольшая равномерность распределения твердых минеральных удобрений достигается при использовании диска с комбинацией 8 лопаток разной длины: 2 шт. – 300 мм; 2 шт. – 250 мм; 2 шт. – 200 мм; 2 шт. – 100 мм (при попарном соосном расположении лопаток одной длины).

Список использованных источников

1. Личман Г.И., Белых С.А., Марченко А.Н. Способы внесения удобрений в системе точного земледелия // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12, № 4. С. 4-9. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-4-9>
2. Тетерина О.А., Костенко Н.А. Совершенствование машин для внесения минеральных удобрений // Юность и знания – гарантия успеха-2017: Сборник научных трудов 4-й Международной молодежной научной конференции. Курск, 2017. Т. 2. С. 202-205. EDN: XDHTHX.
3. Li Z.X., Chi F.Q., Zhang J.M., Kuang E.J., Su Q.R. Effects of long-term localized fertilization on nutrient balance and dynamic change of humic acid molecular structure in black soil. *Spectroscopy and spectral analysis*. 2018; 38 (12): 3875-3882.
4. Romanenkov V., Belichenko M., Petrova A., Raskatova T., Jahn G., Krasilnikov P. Soil organic carbon dynamics in long-term experiments with mineral and organic fertilizers in Russia. *Geoderma Regional*. 2019; 17: e00221. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00221>
5. Дорохов А.С., Новиков Н.Н., Митрофанов С.В. Интеллектуальная технология формирования системы удобрения // Техника и оборудование для села. 2020. № 7 (277). С. 2-5. EDN: QFDQTX.
6. Zhang X., Dong W., Dai X., Schaeffer S., Yang F., Radosevich M., Xu L., Liu X., Sun X. Responses of absolute and specific soil enzyme activities to long term additions of organic and mineral fertilizer. *Science of The Total Environment*. 2015; 536: 59-67. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.043>
7. Андреев К.П. Направление совершенствования машин для поверхностного внесения минеральных удобрений // Принципы и технологии экологизации производства в сельском, лесном и рыбном хозяйстве: Материалы 68-й Международной научно-практической конференции. Рязань: РГАТУ им. П.А. Костычева. 2017. С. 17-21. EDN: ZFFMOX.
8. Панферов Н.С., Тетерин В.С., Митрофанов С.В., Благов Д.А., Пехнов С.А., Сухоруков Д.Г. Тенденции развития машин с центробежными рабочими органами для поверхностного внесения твердых минеральных удобрений // Техника и оборудование для села. 2021. № 12 (294). С. 18-24. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-12-18-24>
9. Пигорев И.Я., Солошенко В.М., Наумкин В.Н., Наумкин А.В., Хлопяников А.М., Хлопяникова Г.В. Об инновационных технологиях в земледелии // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 3. С. 32-36. EDN: WLAQLJ.
10. Андреев К.П., Костенко М.Ю., Шемякин А.В., Макаров В.А. Терентьев, В.В. Совершенствование центробежных разбрасывателей для поверхностного внесения минеральных удобрений // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2017. № 1 (33). С. 54-59. EDN: YTORGT.

References

1. Lichman G.I., Belykh S.A., Marchenko A.N. Methods of fertilization in precision farming. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018; 12(4): 4-9. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-4-9> (In Rus.)
2. Teterina O.A., Kostenko N.A. Improving machines for applying mineral fertilizers. *Yunost' i znaniya – garantiya uspekha – 2017: sb. nauch. tr. 4-y Mezhdunar. molodezhnoy nauch. konf. In two vol.* 2017: 202-205. (In Rus.)
3. Li ZX., Chi FQ., Zhang JM., Kuang EJ., Su QR. Effects of Long-Term Localized Fertilization on Nutrient Balance and Dynamic Change of Humic Acid Molecular Structure in Black Soil. *Spectroscopy and spectral analysis*. 2018; 38(12): 3875-3882.
4. Romanenkov V., Belichenko M., Petrova A., Raskatova T., Jahn G., Krasilnikov P. Soil organic carbon dynamics in long-term experiments with mineral and organic fertilizers in Russia. *Geoderma Regional*. 2019; 17: e00221. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00221>
5. Dorokhov A.S., Novikov N.N., Mitrofanov S.V. Intelligent technology for establishing a fertilizer system. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2020; 7 (277): 2-5. (In Rus.)
6. Zhang X., Dong W., Dai X., Schaeffer S., Yang F., Radosevich M., Xu L., Liu X., Sun X. Responses of absolute and specific soil enzyme activities to long term additions of organic and mineral fertilizer. *Science of The Total Environment*. 2015; 536: 59-67. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.043>
7. Andreev K.P. Ways of improving machines for the surface application of mineral fertilizers. *Printsipy i tekhnologii ekologizatsii proizvodstva v sel'skom, lesnom i rybnom khozyaystve: sb. Ryazan': RGATU im. P.A. Kostycheva*. 2017: 17-21. (In Rus.)
8. Panferov N.S., Teterin V.S., Mitrofanov S.V., Blagov D.A., Pekhnov S.A., Sukhorukov D.G. Trends in the development of machines with centrifugal working elements for the surface application of solid mineral fertilizers. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2021; 12(294): 18-24. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-12-18-24> (In Rus.)
9. Pigorev I.Ya., Soloshenko V.M., Naumkin V.N., Naumkin A.V., Khlopyanikov A.M., Khlopyanikova G.V. On innovative technologies used in agriculture. *Vestnik Kurskoy GSKHA*. 2016; 3: 32-36. (In Rus.)
10. Andreev K.P., Kostenko M.Yu., Shemyakin A.V., Makarov V.A., Improving centrifugal spreaders for surface application of mineral fertilizers. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva*. 2017; 1(33): 54-59. (In Rus.)
11. Andreev K.P. Influence of the uneven application of fertilizers on the yield. *Printsipy i tekhnologii ekologizatsii proizvodstva v sel'skom,*

11. Андреев К.П. Влияние неравномерности внесения удобрений на урожайность // Принципы и технологии экологизации производства в сельском, лесном и рыбном хозяйстве: Материалы 68-й Международной научно-практической конференции. Рязань: РГАТУ им. П.А. Костычева, 2017. С. 13-17. EDN: ZEYNKX.

12. Shemyakin A.V., Borychev S.N., Uspenskiy I.A., Andreev K.P., Terentyev V.V. Improvement of the technological process of surface application of mineral fertilizers. *BIO Web of Conferences. International Scientific-Practical Conference «Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources»* (FIIES2019). 2020: 00192. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700192>

13. Andreev K., Terentyev V., Shemyakin A. Technological process of application of mineral fertilizers by self-loading machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science // XII International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry*, 2019; 403: 012180.

14. Лабораторный стенд для исследования физико-механических свойств различных видов твердых минеральных удобрений и рабочих органов разбрасывателей центробежного типа: Патент RU2748068 C1, МПК A01C15/00, A01C17/00 / В.С. Тетерин, С.А. Пехнов, Н.С. Панферов и др.; заяв. № 2020136018 от 02.11.2020; опубл. 19.05.2021. EDN: UZFOHM.

15. Панферов Н.С., Тетерин В.С., Пехнов С.А., Сухорук Д.Г. Разработка лабораторного стенда для исследования рабочих органов распределителей удобрений центробежного типа // Техника и оборудование для села. 2020. № 7 (277). С. 26-29. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-7-26-29>

16. Интеллектуальная система управления лабораторным стендом для исследования рабочих органов разбрасывателей центробежного типа: Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ RU2020667366 / Н.С. Панферов, Н.Н. Новиков, В.С. Тетерин и др.; заяв. № 2020664608 от 19.11.2020; опубл. 23.12.2020. EDN: GGIZXT.

17. Рабочий орган для центробежного разбрасывателя удобрений и мелиорантов: Патент RU2744735 C1, МПК A01C17/00 / В.С. Тетерин, Н.Н. Новиков, С.А. Пехнов и др.; заяв. № 2020131770 от 28.09.2020; опубл. 15.03.2021. EDN: WKBYAF.

18. Костенко М.Ю., Тетерин В.С., Панферов Н.С., Пехнов С.А., Сухорук Д.С., Пехнов А.С. Теоретическое обоснование движения гранул минеральных удобрений после схода с разбрасывающего диска // Техника и оборудование для села. 2021. № 12 (294). С. 25-28. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-12-25-28>

19. Костенко М.Ю., Гайбарян М.А., Тетерин В.С., Панферов Н.С., Митрофанов С.В., Гапеева Н.Н. Теоретическое обоснование параметров рабочих органов разбрасывателя центробежного типа // Техника и оборудование для села. 2021. № 2 (284). С. 16-20. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-16-20>

Критерии авторства

Панферов Н.С., Костенко М.Ю., Тетерин В.С., Пехнов С.А., Сибирев А.В., Мосяков М.А. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Панферов Н.С., Костенко М.Ю., Тетерин В.С., Пехнов С.А., Сибирев А.В., Мосяков М.А. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.07.2022

Одобрена после рецензирования 29.08.2022

Принята к публикации 19.10.2022

lesnom i rybnom khozyaystve: sb. Ryazan': RGATU im. P.A. Kostycheva. 2017: 13-17. (In Rus.)

12. Shemyakin A.V., Borychev S.N., Uspenskiy I.A., Andreev K.P., Terentyev V.V. Improvement of the technological process of surface application of mineral fertilizers. *BIO Web of Conferences. International Scientific-Practical Conference «Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources»* (FIIES2019). 2020: 00192. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700192>

13. Andreev K., Terentyev V., Shemyakin A. Technological process of application of mineral fertilizers by self-loading machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. XII International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry*, 2019; 403: 012180.

14. Teterin V.S., Pekhnov S.A., Panferov N.S. et al. Laboratory bench for the study of the physical and mechanical properties of various types of solid mineral fertilizers and the working elements of centrifugal type spreaders: Patent No. 2748068 C1 Rossiyskaya Federaciya, MPK A01C15/00, A01C17/00, 2021. (In Rus.)

15. Panferov N.S., Teterin V.S., Pekhnov S.A., Sukhorukov D.G. Design of a laboratory bench for the study of the working elements of centrifugal-type fertilizer distributors. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2020; 7(277): 26-29. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-7-26-29> (In Rus.)

16. Panferov N.S., Novikov N.N., Teterin V.S. et al. Intelligent control system of a laboratory bench for the study of the working elements of centrifugal-type spreaders: Certificate of state registration of a computer program RU No. 2020667366 Rossiyskaya Federaciya. No. 2020664608. 2020. (In Rus.)

17. Teterin V.S., Novikov N.N., Pekhnov S.A. et al. Working element for a centrifugal-type spreader of fertilizers and ameliorants: Patent RU No. 2744735 C1 Rossiyskaya Federaciya, MPK A01C17/00: No. 2020131770, 2021. (In Rus.)

18. Kostenko M.Yu., Teterin V.S., Panferov N.S. Pekhnov S.A., Sukhorukov D.S., Pekhnov A.S. Theoretical rationale for the movement of mineral fertilizer pellets after leaving the spreading disk. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2021; 12(294): 25-28. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-12-25-28> (In Rus.)

19. Kostenko M.Yu., Gaybaryan M.A., Teterin V.S. Panferov N.S., Mitrofanov S.V., Gapeeva N.N. Theoretical rationale for the parameters of the working elements of the centrifugal-type spreader. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2021; 2(284): 16-20. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-16-20> (In Rus.)

Contribution

N.S. Panferov, M.Yu. Kostenko, V.S. Teterin, S.A. Pekhnov, A.V. Sibiriyov and M.A. Mosyakov performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. N.S. Panferov, M.Yu. Kostenko, V.S. Teterin, S.A. Pekhnov, A.V. Sibiriyov and M.A. Mosyakov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 11.07.2022

Approved after reviewing 29.08.2022

Accepted for publication 19.10.2022