

Разработка диска для распределения твердых минеральных удобрений с регулируемой дозой внесения

Владимир Сергеевич Тетерин,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: v.s.teterin@mail.ru;

Николай Сергеевич Панферов,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: nikolaj-panfyorov@yandex.ru;
Сергей Александрович Пехнов,
старший научный сотрудник,
e-mail: pehnov@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что большинство возделываемых полей в России имеют контуры неправильной формы, в связи с чем на пограничных участках минеральные удобрения вносятся нерационально. Показали, что для устранения данной проблемы производители разбрасывателей твердых минеральных удобрений предлагают несколько технологических решений: в большинстве случаев зону внесения ограничивают, изменяя траекторию полета гранул. (*Цель исследования*) Разработать диск с изменяемой площадью распределения для разбрасывателей минеральных удобрений, оборудованных системами дифференцированного внесения. (*Материалы и методы*) Оценили зону внесения гранул минеральных удобрений в зависимости от угла излома лопаток диска распределителя. Спроектировали 3D-модели дисков с изменяемым углом излома лопатки от 0 до 25 градусов, которые в последующем загружали в программу *RealFlow* для последующей симуляции процессов распределения твердых минеральных удобрений. (*Результаты и обсуждение*) Получили координаты гранул минеральных удобрений, сошедших с диска и приземлившихся на поверхность. Построили графики распределения минеральных удобрений по поверхности поля. Установили, что изменение угла излома лопатки распределяющего диска в диапазоне до 20 градусов позволяет варьировать ширину и дальность полета гранул минеральных удобрений в пределах 10 и 8 метров соответственно. Разработали конструкцию диска распределителя минеральных удобрений с регулируемой дозой внесения. (*Выводы*) Предложили конструкцию диска для плавного изменения угла излома лопатки до 25 градусов, что позволит использовать данную систему совместно с автоматизированными системами дозирования, повысить точность распределения твердых минеральных удобрений и мелиорантов на пограничных, краевых и клиновидных участках полей.

Ключевые слова: распределитель минеральных удобрений, диск распределителя, дифференцированное внесение твердых минеральных удобрений, внесение удобрений на краях полей, точное земледелие.

■ **Для цитирования:** Тетерин В.С., Панферов Н.С., Пехнов С.А. Разработка диска для распределения твердых минеральных удобрений с регулируемой дозой внесения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №4. С. 38-44. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-4-38-44. EDN ZJFXTE.

Development of a Distributor Disc for Mineral Fertilizers With Variable Application Rate

Vladimir S. Teterin,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: v.s.teterin@mail.ru;

Nikolay S. Panferov,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: nikolaj-panfyorov@yandex.ru;
Sergey A. Pekhnov,
senior researcher, e-mail: pehnov@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract: Most of the cultivated fields in Russia are acknowledged to have irregular contours, therefore mineral fertilizers are applied irrationally at the field boundaries. To eliminate this problem, the manufacturers of solid mineral fertilizer spreaders offer several technological solutions: in most cases, the application area is limited by changing the granule flight path. (*Research purpose*) To develop a distributor disc for a variable application area to use in mineral fertilizer spreaders equipped with variable

rate application systems. (*Materials and methods*) The trajectory for applying mineral fertilizer granules was estimated depending on the bend angle of the distributor disk blade. We designed 3D disk models with a variable blade bend angle from 0 to 25 degrees, which were uploaded into the RealFlow program for the subsequent simulation of solid mineral fertilizer distribution. (*Results and discussion*) The coordinates were obtained for mineral fertilizer granules that dropped from the disk and landed on the surface. We built graphs of the mineral fertilizer distribution on the field surface. It was found out that changing the bend angle of the distributor disk blade within a 20-degree range makes it possible to vary the granule flight path within 10 meters of width and 8 meters of length, respectively. We developed a design of a mineral fertilizer distributor disk with an adjustable application rate. (*Conclusions*) A disk design was proposed for a smooth change in the blade bend angle within up to 25 degrees, which will allow the use of this system in conjunction with automated rate application systems, improve the distribution accuracy of solid mineral fertilizers and ameliorants in the boundary, edge and wedge-shaped sections of fields.

Keywords: mineral fertilizer distributor, distributor disk, variable rate application of solid mineral fertilizers, fertilization at the field edges, precision farming.

■ **For citation:** Teterin V.S., Panferov N.S., Pekhnov S.A. Razrabotka diska dlya raspredeleniya tverdykh mineral'nykh udobreniy s reguliruemoy dozoy vneseniya [Development of a distributor disc for mineral fertilizers with variable application rate]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N4. 38-44 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-4-38-44. EDN ZJFXTE.

Эффективность минеральных удобрений во многом определяется способом их внесения и заделки в почву. В зависимости от характера размещения минеральных удобрений в почве основное внесение удобрений может осуществляться сплошным (разбросным) и локальным способами [1-3]. В первом случае удобрения распределяются по полю разбросными туковыми сеялками, авиационными разбрасывателями, но преимущественно – распределителями с рабочим органом центробежного типа [4-6].

К недостаткам этого способа относятся: неравномерное распределение удобрений по поверхности почвы, попадание определенного их количества в пересыхающий слой почвы, а также за пределы возделываемого участка. Потери в урожайности из-за неравномерного распределения удобрений могут достигать 17,5% [7-9].

Производители разбрасывателей минеральных удобрений предлагают различные решения как в части самих рабочих органов, так и в вопросах программного обеспечения. В целом концепция данных технологий заключается в том, что они ориентированы на неравномерность, неоднородность и непостоянство состава почвы участков конкретного поля. Применение описываемых технологий заключается в определении границ участков, точных данных о химическом составе почвы, уровне ее влажности (в том числе глубине подземных вод), количестве солнечной радиации, неровности рельефа, преобладающих ветрах, наличии поблизости значимых природных и других объектов (лесов, водоемов, промышленных предприятий, жилых домов, дорог и т.п.) [1, 10, 11].

Такие системы имеют как правило похожие исполнения с небольшими конструктивными различиями. В частности они позволяют регулировать дозу внесения удобрений непосредственно из кабины трактора

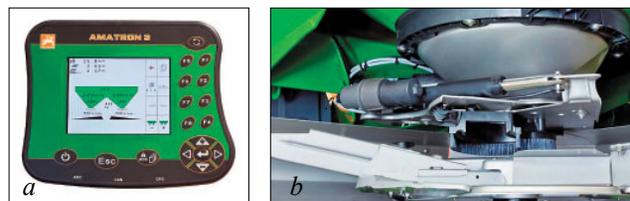


Рис. 1. Пример системы дозирования Soft Ballistic System от компании Amazon: а – ISOBUS-терминал Amatron 3; б – узел управления системой дозирования

Fig. 1. The sample of the "Soft Ballistic System" dosing system by Amazon: a – Amatron 3 ISOBUS terminal; b – dosing system control unit

(рис. 1). При этом регулировка осуществляется в ходе изменения положения заслонки. Площадь распределения удобрений зависит от частоты вращения распределяющего диска или длины и положения лопаток.

Среди подходов, направленных на улучшение равномерности распределения удобрений, интересна система Trend от компании Bogballe: распределяющие диски вращаются навстречу друг другу, тем самым создавая более широкую зону перекрытия за распределителем. Система от компании Kverneland включает в себя диски, оборудованные 8 лопастями, тем самым разделяя зону распределения на 16 секторов [12-15].

Большинство возделываемых полей в России имеют контуры неправильной формы. На пограничных участках минеральные удобрения вносятся нерационально (рис. 2) [16-18]. Поэтому важно разработать технологии пограничного внесения твердых минеральных удобрений.

Производители разбрасывателей твердых минеральных удобрений предлагают несколько технологических решений, направленных на устранение проблемы. Фирмы Kverneland, Kuhn, Rauch и другие раз-



Рис. 2. Спутниковый снимок с выделенными контурами возделываемых полей

Fig. 2. Satellite image of the cultivated fields with the highlighted contours



Рис. 3. Система Telimat T25 от компании Rauch (видны ограничители для равномерного внесения удобрений на узких участках поля и клиньях)

Fig. 3. Telimat T25 system by Rauch (you can see the limiters for even application of fertilizer in narrow areas of the field and wedge-shaped sections)

работали системы по типу *Telimat T25* (рис. 3) [15, 19, 20].

Подобные системы предназначены для ограничения поперечного распределения минеральных удобрений при движении машины возле межи или по краю поля. При этом регулировка осуществляется изменением положения отражателей, влияющего на траекторию гранул.

У данной технологии можно отметить несколько недостатков. Обычно эти системы устанавливают с одной (правой) стороны распределителя, что существенно ограничивает их использование. Повышается неравномерность распределения удобрений, так как часть гранул при ударе об отражатели будет сыпаться в зоне самого устройства. Кроме того, при ударе о дефлекторы системы происходит разрушение гранул твердых минеральных удобрений и пыление.

Компания *Amazone* разработала более совершенную технологию внесения удобрений вдоль края поля под названием *AutoTS* (рис. 4). Принцип ее работы заключается в перемещении части распределяющей лопатки на 10° , то есть в изменении ее конечной длины посредством переключения от длинного к более

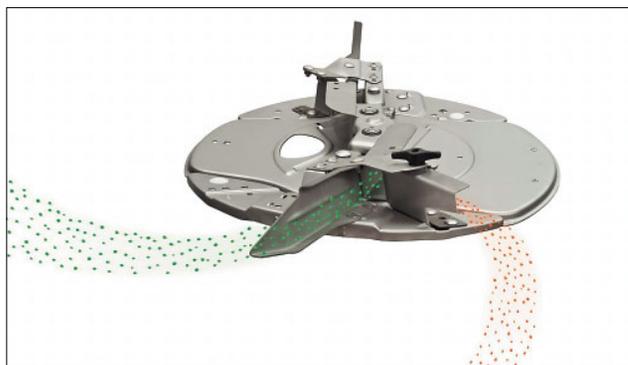


Рис. 4. Система AutoTS от компании Amazone

Fig. 4. AutoTS system by Amazone

короткому элементу лопатки, в результате чего удобрения выбрасываются значительно ближе, причем без оказания на них дополнительного механического воздействия [15, 20-23].

Однако данная система также имеет определенные недостатки. Например, лопатки могут принимать только два крайних положения, что существенно снижает диапазон возможных траекторий распределения удобрений. Для регулировки площади распределения *Amazone* по-прежнему использует комплекты сменных лопаток.

Цель исследования – разработать диск с изменяемой площадью распределения для разбрасывателей минеральных удобрений, оборудованных системами дифференцированного внесения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Для оценки влияния угла излома лопатки на площадь распределения твердых минеральных удобрений спроектировали 3D-модели дисков со следующими параметрами: диаметр – 500 мм; количество лопаток – 2 шт.; длина лопаток – 300 мм; длина лопаток до излома – 150 мм. При этом в моделях варьировался угол излома лопаток – от 0° (первоначальное положение) до 25° (рис. 5). Построенные модели загружали в программу *RealFlow*, где моделировались процессы их работы.

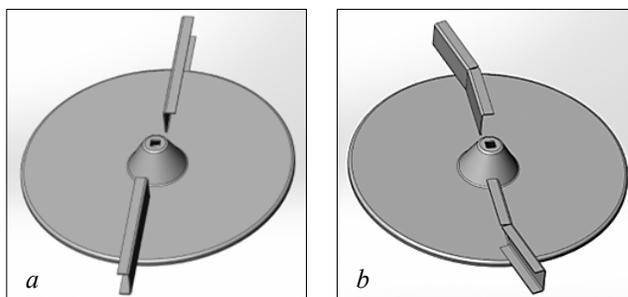


Рис. 5. Модели распределяющих дисков: а – прямые лопатки; б – лопатки с изломом 10°

Fig. 5. Models of distributing disks; a – straight blades; b – blades with a 10° bend

Оценили траекторию распределения гранул минеральных удобрений в зависимости от угла излома

лопатки. При моделировании процессов каждый из дисков оборудовали разгонной камерой с постоянными параметрами и расположением выходного окна. В процессе симуляции на распределительные диски подавалось ограниченное число частиц определенного размера, имитирующих гранулы минеральных удобрений (рис. 6).

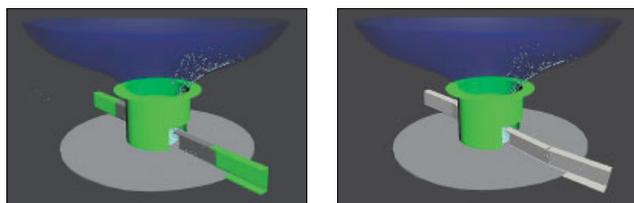


Рис. 6. Примеры симуляции процесса распределения твердых минеральных удобрений

Fig. 6. – The examples of the simulation process of distributing solid mineral fertilizers

При имитации работы распределяющего диска определили следующие параметры:

- частота вращения диска – 750 об/мин;
- расположение диска относительно поверхности – горизонтальное на высоте 700 мм;
- количество гранул – 1150 шт.;
- размер гранул – 3 мм;
- коэффициент трения гранул о поверхность диска – 0,55.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для определения зависимости площади распределения от изменения угла излома лопатки в программе *RealFlow* были получены координаты гранул минеральных удобрений, сошедших с диска и приземлившихся на поверхность. На основе полученных координат в программе *Microsoft Excel* построены графики распределения гранул (рис. 7).

При изменении угла излома распределяющих лопаток в пределах 10° наблюдаются изменения ширины и дальности распределения в небольшом диапа-

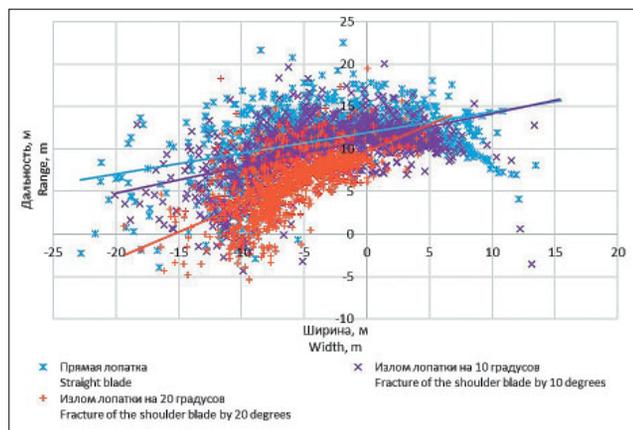


Рис. 7. Распределение гранул минеральных удобрений в зависимости от угла излома лопаток (координаты и их линейная аппроксимация)

Fig. 7. Distribution of mineral fertilizer granules depending on the bend angle of the blades (coordinates and their linear approximation)

зоне. Так, при угле 10° эти показатели изменяются в среднем на 2 м в сравнении с начальным положением лопаток (0°). Увеличение угла до 20° влечет за собой более существенное сокращение ширины и дальности распределения минеральных удобрений – на 10 и 8 м соответственно по отношению к параметрам, характеризующим первоначальное положение лопатки.

Стоит отметить, что при угле излома, превышающем 20° , существенных изменений в распределении гранул не происходит. Это обусловлено тем, что основная часть удобрений сходит с короткой части лопатки в месте излома и не подхватывается ее продолжением. Исключение составляет лишь незначительная часть гранул (около 3%), что можно отнести к статистической погрешности.

Опираясь на полученные данные, мы предложили конструкцию диска распределителя минеральных удобрений с регулируемой площадью внесения (рис. 8).

Распределяющий диск работает следующим образом. Предварительно в блок управления распределителя минеральных удобрений и мелиорантов за-

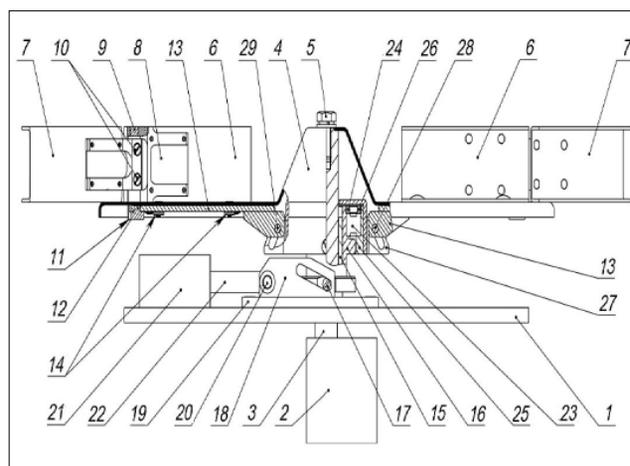


Рис. 8. Конструктивная схема диска распределителя минеральных удобрений с регулируемой площадью внесения:

1 – платформа; 2 – привод; 3 – вал привода; 4 – плоский диск с конической поверхностью в центре; 5 – фиксирующий болт; 6 – лопасти; 7 – подвижные лопасти; 8 – петлевой шарнир; 9 – ось шарнира; 10 – винты; 11 – рычаг; 12 – цилиндрический выступ; 13 – тяга; 14 – направляющие тяги; 15 – направляющий фланец; 16 – вал; 17 – штифты; 18 – каретка; 19 – направляющие; 20 – ось каретки; 21 – актуатор; 22 – толкатель; 23 – подшипник; 24, 26 – стопора; 25 – корпус подшипника; 27 – толкатель; 28 – ось тяги

Fig. 8. Structural diagram of a distribution disc for mineral fertilizer with an adjustable application area: 1 – platform; 2 – drive; 3 – drive shaft; 4 – flat disc with a conical surface in the center; 5 – locking bolt; 6 – blades; 7 – movable blades; 8 – hinge; 9 – hinge axis; 10 – screws; 11 – lever; 12 – cylindrical projection; 13 – rod; 14 – guide rods; 15 – guide flange; 16 – shaft; 17 – pins; 18 – carriage; 19 – guides; 20 – carriage axis; 21 – actuator; 22 – pusher; 23 – bearing; 24, 26 – stoppers; 25 – bearing housing; 27 – pusher; 28 – rod axis

гружается карта заданий с обозначением контуров полей и элементарных участков. В соответствии с загруженными данными с блока управления поступает сигнал на привод, который задает необходимую скорость вращения вала. Крутящий момент передается на диск.

При поступлении минеральных удобрений на вращающийся диск лопасти осуществляют их перемещение к лопаткам, которые выбрасывают материал на необходимое расстояние. Для обеспечения максимальной дальности броска лопатки располагаются последовательно с лопастями, образуя прямую линию. При необходимости сокращения дальности распределения минеральных удобрений, например при движении разбрасывателя вдоль кромки поля, с блока управления поступает сигнал на актуатор, который перемещает каретку по направляющим. От ее воздействия штифты поднимают вверх вал с закрепленным на нем через подшипник толкателем. Толкатель перемещает тягу в горизонтальном направлении в сторону края диска, тем самым поворачивая лопатки относительно лопастей на угол до 25°.

Если надо увеличить дальность броска, то с бло-

ка управления поступает сигнал на актуатор, тем самым приводя в движения описанный механизм в обратном направлении. В результате угол между лопаткой и лопастями сокращается, вплоть до их полной последовательной установки.

Выводы. Изменение угла излома лопатки распределяющего диска в диапазоне до 20° позволяет влиять на ширину и дальность полета гранул минеральных удобрений в пределах 10 и 8 метров соответственно. Основываясь на полученных данных, разработали диск распределителя минеральных удобрений с регулируемой зоной внесения.

Предложенная конструкция диска дает возможность плавно изменять угол излома лопатки с предельным значением 25°. Система работает в автоматическом режиме, распределяя удобрения согласно картам заданий.

Использование предлагаемой системы совместно с автоматизированными системами дозирования позволит повысить точность распределения твердых минеральных удобрений и мелиорантов на пограничных, краевых и клиновидных участках полей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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.
2. Волюнкина О.В., Копылов А.Н. Сроки и способы внесения минеральных удобрений // *Аграрный сектор*. 2021. №3(49). С. 52-57.
3. Еремина Д.В., Демина О.Н. Экономика планируемых урожаев яровой пшеницы на пахотных черноземах за счет внесения минеральных удобрений // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2021. Т. 16. №1(61). С. 9-14.
4. 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 Hu Molecular Structure in Black Soil. *Spectroscopy and spectral analysis*. 2018. Vol. 38. №12. 3875-3882.
5. Andreev K.P., Danilenko Zh.V., Kostenko M.Yu., et al. Determining the inequality of solid mineral fertilizers application. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2018. Vol. 10. №10, Special Issue. 2112-2122.
6. Андреев К.П., Аникин Н.В., Бышов Н.В. и др. Внедрение системы точного земледелия // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. 2019. №2(42). С. 74-80.
7. Сычев В.Г. Влияние длительного применения минеральных и органических удобрений на основные показатели различных типов почв // *Плодородие*. 2021. №4(121). С. 3-5.
8. Gavryushina I.V. Photosynthetic activity the yield and biomass of maize depending on mineral nutrition. *Research journal of pharmaceutical biological and chemical sciences*. 2018. Vol. 9. №6. 1696-1703.
9. Xinyu Z., Wenyi D., Xiaoqin D., Sean S., Xiaomin S. Responses of absolute and specific soil enzyme activities to long term additions of organic and mineral fertilizer. *Science of The Total Environment*. 2015. Vol. 536. 59-67.
10. Андреев К.П., Костенко М.Ю., Шемякин А.В. и др. Совершенствование центробежных разбрасывателей для поверхностного внесения минеральных удобрений // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. 2017. №1(33). С. 54-59.
11. 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.
12. Даниленко Ж.В., Шемякин А.В., Ерошкин А.Д. и др. Координатное внесение удобрений на основе полевого мониторинга // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. 2018. №4(40). С. 167-172.
13. Панферов Н.С., Тетерин В.С., Митрофанов С.В. и др. Тенденции развития машин с центробежными рабочими органами для поверхностного внесения твердых минеральных удобрений // *Техника и оборудование для села*. 2021. №12(294). С. 18-24.
14. Стенин С.С. Самозагружающийся разбрасыватель минеральных удобрений // *Молодой ученый*. 2017. №11-3(145). С. 53-55.



15. Volina T., Pylypaka S., Rebrii A., Pavlenko O., Kremets Y. Particle Movement on Concave Coulter of the Centrifugal Distributor with Radially Installed Vertical Blades. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. 237-246
16. Митрофанов С.В., Белых С.А., Благов Д.А. и др. К вопросу разработки карт-заданий для дифференцированного внесения удобрений // *Техническое обеспечение сельского хозяйства*. 2020. N1(2). С. 141-150.
17. Васильев С.И., Машков С.В., Крючин П.В. Теоретическое обоснование автоматизации картирования поля для совершенствования способа отбора проб почвы // *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2019. N1. С. 47-55.
18. Шаяхметов М.Р., Шойкин О.Д. Точное земледелие на основе космической информации // *Актуальные проблемы науки и образования в области естественных и сельскохозяйственных наук*. 2018. N1. С. 272-274.
19. Hwang S.J., Nam J.S. DEM simulation model to optimise shutter hole position of a centrifugal fertiliser distributor for precise application. *Biosystems Engineering*. 2021. N204. 326-345.
20. Панферов Н.С., Тетерин В.С., Пехнов С.А., Сухоруков Д.Г. Разработка лабораторного стенда для исследования рабочих органов распределителей удобрений центробежного типа // *Техника и оборудование для села*. 2020. N7(277). С. 26-29.
21. Исханов И.Г., Зиганшин Б.Г., Халиуллин Д.Т. Дискковый разбрасыватель минеральных удобрений // *Сельский механизатор*. 2017. N6. С. 15-16.
22. Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Старовойтов С.И., Ценч Ю.С., Шогенов А.Х. Трехсекционный почвообрабатывающий агрегат с универсальными сменными рабочими органами // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 14. N3(54). С. 92-95.
23. Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Квас С.А. Технология комбинированного способа посева и высевальные аппараты для его осуществления // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N4(33). С. 61-65.

REFERENCES

1. Lichman G.I., Belykh S.A., Marchenko A.N. Sposoby vnesheniya udobreniy v sisteme tochnogo zemledeliya [Methods of applying fertilizers in precision agriculture]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N4. 4-9 (In Russian)
2. Volynkina O.V., Kopylov A.N. Sroki i sposoby vnesheniya mineral'nykh udobreniy [Terms and methods of applying mineral fertilizers]. *Agrarnyy sektor*. 2021. N3(49). 52-57 (In Russian).
3. Eremina D.V., Demina O.N. Ekonomika planiruemykh urozhaev yarovoy psheynitsy na pakhotnykh chernozemakh za schet vnesheniya mineral'nykh udobreniy [Economy of obtaining planned spring wheat yields on around chernozem due to mineral]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021. Vol. 16. N1(61). 9-14 (In Russian).
4. 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 Hu Molecular Structure in Black Soil. *Spectroscopy and spectral analysis*. 2018. Vol. 38. N12. 3875-3882 (In English).
5. Andreev K.P., Danilenko Zh.V., Kostenko M.Yu., et al. Determining the inequality of solid mineral fertilizers application. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2018. Vol. 10. N10. Special Issue. 2112-2122 (In English).
6. Andreev K.P., Anikin N.V., Byshov N.V., et al. Vnedrenie sistemy tochnogo zemledeliya [Introduction of exact farming system]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta named after P.A. Kostycheva*. 2019. N2(42). 74-80 (In Russian).
7. Sychev V.G. Vliyaniye dlitel'nogo primeneniya mineral'nykh i organicheskikh udobreniy na osnovnyye pokazateli razlichnykh tipov pochv [Effects of long-term mineral use and organic fertilizers on key indicators different types of soils]. *Plodorodie*. 2021. N4(121). 3-5 (In Russian).
8. Gavryushina I.V. Photosynthetic activity the yield and biomass of maize depending on mineral nutrition. *Research journal of pharmaceutical biological and chemical sciences*. 2018. Vol. 9. N6. 1696-1703 (In English).
9. Xinyu Z., Wenyi D., Xiaoqin D., Sean S., Xiaomin S. Responses of absolute and specific soil enzyme activities to long term additions of organic and mineral fertilizer. *Science of The Total Environment*. 2015. Vol. 536. 59-67 (In English).
10. Andreev K.P., Kostenko M.Yu., Shemyakin A.V., et al. Sovershenstvovanie tsentrobezhnykh razbrasyvateley dlya poverkhnostnogo vnesheniya mineral'nykh udobreniy [Improvement of centrifugal spreaders for surface application of mineral fertilizers]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta named after P.A. Kostycheva*. 2017. N1(33). 54-59 (In Russian).
11. Dorokhov A.S., Novikov N.N., Mitrofanov S.V. Intellektual'naya tekhnologiya formirovaniya sistemy udobreniya [Intelligent fertilizer system technology]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2020. N7(277). 2-5 (In Russian).
12. Danilenko Zh.V., Shemyakin A.V., Eroshkin A.D., et al. Koordinatnoye vnesheniye udobreniy na osnove polevogo monitoringa [Coordinate fertilizer approaches based on field monitoring]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta named after P.A. Kostycheva*. 2018. N4(40). 167-172 (In Russian).
13. Panferov N.S., Teterin V.S., Mitrofanov S.V., et al. Tendentsii razvitiya mashin s tsentrobezhnyimi rabochimi organami dlya poverkhnostnogo vnesheniya tverdykh mineral'nykh udobreniy [Trends in the development of machines fitted with centrifugal working bodies for surface application of solid mineral fertilizers]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2021. N12(294). 18-24 (In Russian).

14. Stenin S.S. Samozagruzhayushchiysya razbrasyvatel' mineral'nykh udobreniy [Self-loading spreader of mineral fertilizers.]. *Molodoy uchenyy*. 2017. N11-3(145). 53-55 (In Russian).
15. Volina T., Pylypaka S., Rebrii A., Pavlenko O., Kremets Y. Particle Movement on Concave Coulter of the Centrifugal Distributor with Radially Installed Vertical Blades. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. 237-246 (In English).
16. Mitrofanov S.V., Belykh S.A., Blagov D.A., et al. K voprosu razrabotki kart-zadaniy dlya differentsirovannogo vnesheniya udobreniy [On the issue of creating prescription maps for variable rate fertilizer application]. *Tekhnicheskoe obespechenie sel'skogo khozyaystva*. 2020. N1(2). 141-150 (In Russian).
17. Vasil'ev S.I., Mashkov S.V., Kryuchin P.V. Teoreticheskoe obosnovanie avtomatizatsii kartirovaniya polya dlya sovershenstvovaniya sposoba otbora prob pochvy [Theoretical substantiation of field mapping automation to improve the soil sampling method]. *Izvestiya Samarskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2019. N1. 47-55 (In Russian).
18. Shayakhmetov M.R., Shoykin O.D. Tochnoe zemledelie na osnove kosmicheskoy informatsii [Precision agriculture based on space information]. *Aktual'nye problemy nauki i obrazovaniya v oblasti estestvennykh i sel'skokhozyaystvennykh nauk*. 2018. N1. 272-274 (In Russian).
19. Hwang S.J., Nam J.S. DEM simulation model to optimise shutter hole position of a centrifugal fertiliser distributor for precise application. *Biosystems Engineering*. 2021. N204. 326-345 (In English).
20. Panferov N.S., Teterin V.S., Pekhnov S.A., Sukhorukov D.G. Razrabotka laboratornogo stenda dlya issledovaniya rabochikh organov raspredeliteley udobreniy tsentrobezhnogo tipa [Development of a laboratory bench for the study of the working bodies of centrifugal fertilizer spreaders]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2020. N7(277). 26-29 (In Russian).
21. Iskhanov I.G., Ziganshin B.G., Khaliullin D.T. Diskovyy razbrasyvatel' mineral'nykh udobreniy [Disc fertilizer spreader]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2017. N6. 15-16 (In Russian).
22. Ahalaya B.Kh., Shogenov Yu.Kh., Starovoytov S.I., Tsench Yu.S., Shogenov A.Kh. Trekhseksionnyy pochvoobrabatyvayushchiy agregat s universal'nymi smennymi rabochimi organami [Three-section tillage unit with universal replaceable working bodies]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019. Vol. 14. N3(54). 92-95 (In Russian).
23. Ahalaya B.Kh., Tsench Yu.S., Kvas S.A. Tekhnologiya kombinirovannogo sposoba poseva i vysevyayushchie apparaty dlya ego osushchestvleniya [Technology of the combined method of sowing and seeding machines for its implementation]. *Vestnik VIESH*. 2018. N4(33). 61-65 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Тетерин В.С. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, проведение критического анализа экспериментальных исследований, доработка текста, формирование общих выводов;

Панферов Н.С. – литературный и патентный анализ, проведение лабораторных исследований, подготовка начального варианта текста, формирование общих выводов;

Пехнов С.А. – разработка 3D-моделей дисков, разработка конструкции диска распределителя минеральных удобрений с регулируемой площадью внесения.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Teterin V.S. – scientific guidance, formulation of the main research concepts, critical analysis of experimental studies, revision of the manuscript, formation of general conclusions;

Panferov N.S. – literature review and patent analysis, laboratory research, working on the manuscript initial version, formation of general conclusions;

Pekhnov S.A. – development of 3D disk models, designing a disk fertilizer spreader with an adjustable application area.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

04.08.2022

11.10.2022