



## Разработка адаптивного центробежного рабочего органа для внесения минеральных удобрений с применением технологий быстрого прототипирования

В. А. Овчинников<sup>1</sup>✉, Е. А. Кильмяшкин<sup>1</sup>, А. С. Князьков<sup>1</sup>,  
А. В. Овчинникова<sup>1</sup>, Н. А. Жалнин<sup>1</sup>, Е. С. Зыкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Мордовский  
государственный университет

(г. Саранск, Российская Федерация)

<sup>2</sup> Ульяновский ГАУ (г. Ульяновск, Российская Федерация)

✉ [ovchinnikovv81@yandex.ru](mailto:ovchinnikovv81@yandex.ru)

### Аннотация

**Введение.** Совершенствование агропромышленного комплекса подразумевает создание новых и модернизацию имеющихся рабочих органов и машин. Важным условием при этом является применение современных технологий и постоянное сотрудничество с реальным производством. Цель исследования – разработать адаптивный центробежный рабочий орган и повысить качество внесения минеральных удобрений.

**Материалы и методы.** На основании изучения состояния вопроса и требований, предъявляемых к машинам для внесения минеральных удобрений, разработан и изготовлен адаптивный центробежный рабочий орган. На всех стадиях применялись методы компьютерного проектирования и быстрого прототипирования на основе аддитивных технологий.

**Результаты исследования.** В результате использования представленных рабочих органов увеличилась ширина захвата агрегата на 10,0–22,5%. Экспериментальные рабочие органы, по сравнению с серийными, позволяют уменьшить неравномерность внесения гранул минеральных удобрений на 13,4% за счет их перераспределения с центральной зоны по краям.

**Обсуждение и заключение.** В результате экспериментальных исследований доказана эффективность применения разработанного адаптивного центробежного рабочего органа. Он позволяет увеличить равномерность распределения гранул минеральных удобрений и рабочую ширину захвата агрегата. Современные методы проектирования позволяют значительно сократить время и расходы.

**Ключевые слова:** минеральные удобрения, энергосберегающие технологии, рабочий орган, равномерность распределения, 3D, CAD-модель, прототипирование, экспериментальные исследования

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



*Для цитирования:* Разработка адаптивного центробежного рабочего органа для внесения минеральных удобрений с применением технологий быстрого прототипирования / В. А. Овчинников [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 222–234. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.222-234>

Original article

## Development of an Adaptive Centrifugal Working Tool for Mineral Fertilization Using Rapid Prototyping Technologies

V. A. Ovchinnikov<sup>a</sup>✉, E. A. Kilmyashkin<sup>a</sup>, A. S. Knyazkov<sup>a</sup>,  
A. V. Ovchinnikova<sup>a</sup>, N. A. Zhalnin<sup>a</sup>, E. S. Zykin<sup>b</sup>

<sup>a</sup> National Research Mordovia State University  
(Saransk, Russian Federation)

<sup>b</sup> Ulyanovsk State Agrarian University (Ulyanovsk, Russian Federation)

✉ [ovchinnikovv81@yandex.ru](mailto:ovchinnikovv81@yandex.ru)

### Abstract

**Introduction.** Improvement of the agro-industrial complex involves the creation of new and modernizations of existing working tools and machines. The important conditions for this are the application of modern technologies and ongoing cooperation with the actual manufacturing. The aim of the research is to develop an adaptive centrifugal working tool and improve the quality of mineral fertilization.

**Materials and Methods.** The adaptive centrifugal working tool was developed and manufactured based on studying the state of the matter and requirements to machines for mineral fertilization. At all stages of the research, there were used computer-aided design and rapid prototyping methods based on additive technologies.

**Results.** As a result of the use of the presented working tools, the machine operating width has increased by 10.0–22.5%. Experimental working tools, in comparison with serial ones, allow decreasing uneven distribution of mineral fertilizers by 13.4% due to their redistribution from the central zone to the edges.

**Discussion and Conclusion.** As a result of experimental studies, the efficiency of the developed adaptive centrifugal working tools has been proved. It allows increasing uniformity of mineral fertilizer distribution and the machine operating width. Modern design methods make it possible to considerably reduce time and costs.

**Keywords:** mineral fertilizers, energy-saving technologies, working tool, uniformity of distribution, 3D, CAD model, prototyping, experimental research

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Ovchinnikov V.A., Kilmyashkin E.A., Knyazkov A.S., et al. Development of an Adaptive Centrifugal Working Tool for Mineral Fertilization Using Rapid Prototyping Technologies. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):222–234. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.222-234>

### Введение

В целях обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации внутреннее потребление зерна

должно не менее чем на 95 процентов состоять из отечественного зерна<sup>1</sup>.

Для того чтобы достичь поставленную цель, снизить себестоимость

<sup>1</sup> Указ Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации» [Электронный ресурс]. URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/45106> (дата обращения: 01.03.2022).

производства зерна и сохранить конкурентоспособность в данном направлении, необходимо применять современные энергосберегающие технологии на всех этапах производства [1–5].

Одним из таких этапов является внесение удобрений<sup>2</sup>. Именно на данном этапе происходит закладка питательных элементов, используемых растениями в течение всего периода вегетации. Кроме того, внесение удобрений приводит к восстановлению плодородия почвы [6].

В последнее время чаще всего вносятся минеральные гранулированные удобрения [7]. Основным преимуществом является высокая производительность машин при их внесении, а также транспортировка, хранение и т. д.<sup>3</sup>

Главным требованием при внесении минеральных удобрений является равномерность их распределения по полю. Неравномерность внесения приводит к неоднородности структуры посевов, накоплению нитратов, а также к загрязнению окружающей среды [8–10].

Поэтому исследования, посвященные повышению качества внесения минеральных удобрений по поверхности поля, являются актуальными и имеют важное научно-техническое и хозяйственное значение для агропромышленного комплекса страны.

## Обзор литературы

Машины для внесения минеральных удобрений, как правило, выпускаются в навесном и прицепном исполнении и агрегируются с энергетическими средствами. В последние годы расширяется линейка самоходных машин, в том числе и на шинах сверхнизкого давления. Их объединяет центробежный рабочий орган, на качественные показатели работы которого влияют конструктивные и кинематические параметры<sup>4</sup> [11; 12]. Неоспоримые преимущества машин с центробежными дисковыми рабочими органами – это их цена, надежность и производительность. В зависимости от технологии внесения минеральных удобрений и специфики сельскохозяйственного предприятия используют машины с одно- и двухдисковыми центробежными аппаратами [13]. Многочисленными исследованиями установлено, что машины с однодисковыми аппаратами чаще всего применяются для внесения малых и средних норм [14].

Формы рабочих органов, как правило, имеют плоское круглое исполнение, реже квадратное. Существуют рекомендации по использованию рабочих органов со спиралевидными вырезами кромки диска, а также сферические, конусные и диски более сложных форм<sup>5</sup> [15].

Диаметр рабочих органов находится в диапазоне 300–900 мм, а частота их

<sup>2</sup> Лапа В. В. Стратегические вопросы ресурсосбережения в использовании удобрений // Современные ресурсосберегающие технологии производства растениеводческой продукции в Беларуси : сборник научных трудов. Минск, 2007. С. 42–47. URL: <https://agrosbornik.ru/sovremennyye-resursosberegayushhie-tekhnologii/1105-strategicheskie-voprosy-resursosberezheniya-v-ispolzovanii-udobrenij.html> (дата обращения: 01.03.2022).

<sup>3</sup> Андреев К. П. Разработка и обоснование параметров рабочих органов самозагружающейся машины для поверхностного внесения твердых минеральных удобрений : дис. ... канд. техн. наук. Рязань, 2017. 136 с.

<sup>4</sup> Гаврилов И. И., Петровец В. Р. Выбор рабочего органа машин для внесения минеральных удобрений // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сборник научных трудов. Горки : БГСХА, 2016. Вып. 2. С. 16–20. URL: <https://pandia.ru/text/80/251/60045.php> (дата обращения: 01.03.2022).

<sup>5</sup> Белинский А. В. Разработка теории и технических средств для поверхностного внесения минеральных удобрений и мелиорантов : дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2005. 398 с.

вращения до 1 000 об/мин. По мнению ряда исследователей, размеры рабочих органов и частота вращения увеличиваются с целью повышения производительности<sup>6</sup>.

Основными недостатками центробежных рабочих органов является то, что они не всегда обеспечивают высокую равномерность внесения, а также повреждают гранулы минеральных удобрений на высоких оборотах исполнительного элемента [16–18].

### Материалы и методы

К основным качественным показателям работы разбрасывателей относят рабочую ширину захвата и равномерность распределения минеральных удобрений по поверхности поля. Как показывает практика, на оба показателя существенное влияние оказывает скорость гранул в момент схода их с центробежного рабочего органа:

$$v = \omega \cdot R, \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая скорость рабочего органа, рад/с;  $R$  – радиус рабочего органа, м.

После схода с рабочего органа на гранулы минеральных удобрений действуют сила тяжести  $G$  и сила сопротивления воздушного потока  $R$  (рис. 1).

Кроме скорости на дальность полета гранул минеральных удобрений

оказывают влияние угол схода частиц с рабочего органа, высота установки, аэродинамические свойства удобрений и т. д.:

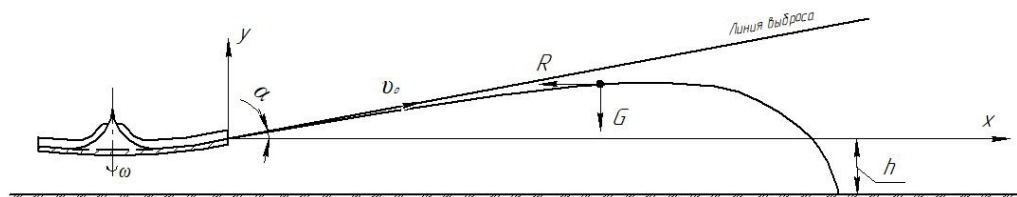
$$x = \frac{v_0^2 \sin^2 2\alpha}{g} \left( \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{hg}{2v_0^2 \sin^2 \alpha}} \right), \quad (2)$$

где  $v_0$  – абсолютная скорость схода гранул с диска, м/с;  $\alpha$  – угол схода гранул относительно горизонта, град;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h$  – высота установки рабочего органа, м.

Если предположить, что угол и скорость схода гранул с разных точек рабочего органа будет отличаться, то и дальность их полета будет различной, что благоприятно отразится на равномерности распределения<sup>7</sup>.

На основании данного предположения предложена конструкция адаптивного центробежного рабочего органа (рис. 2), новизна технического решения которого подтверждена патентами РФ [19; 20].

Адаптивный центробежный рабочий орган выполнен в виде диска 2 сферической формы со спиралевидными вырезами 3. На диске установлена коническая часть 1. Разбрасывающие лопасти 4 различной длины расположены на конической части 1 и переходят

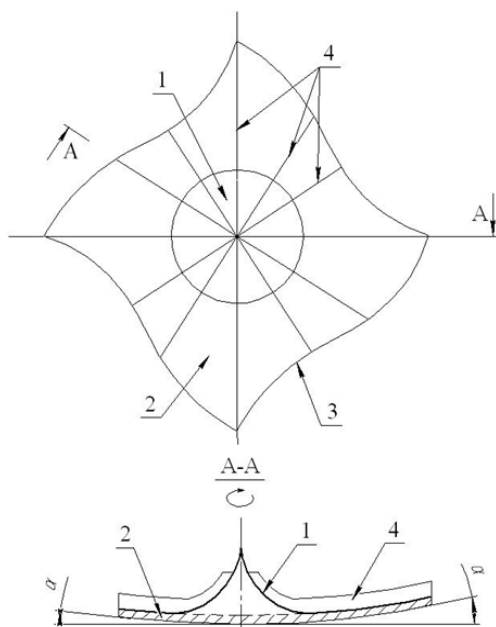


Р и с. 1. Схема к определению дальности полета гранул минеральных удобрений

F i g. 1. Scheme for determining the flight range of mineral fertilizer pellets

<sup>6</sup> Лепшеев О. М. Обоснование конструктивно-режимных параметров низкорамной машины для внесения минеральных удобрений : дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2017. 140 с. ; Следченко В. А. Совершенствование технологического процесса распределения известьсодержащих материалов центробежным разбрасывателем : дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2012. 141 с.

<sup>7</sup> Даськин И. Н. Обоснование параметров и режимов работы центробежного рабочего органа для внесения минеральных удобрений на склонах : дис. ... канд. техн. наук. Саранск, 2013. 161 с.



Р и с. 2. Адаптивный центробежный рабочий орган:

1 – коническая часть; 2 – диск; 3 – спиралевидные вырезы; 4 – лопасти

Fig. 2. Adaptive centrifugal working body: 1 – conical part; 2 – disk; 3 – spiral cutouts; 4 – blades

на диск 2. Согласно выражению (1), с лопастей различной длины гранулы минеральных удобрений будут сходиться с разной скоростью и под разными углами  $\alpha$  (рис. 1), что окажет влияние на дальность полета и равномерность распределения туков.

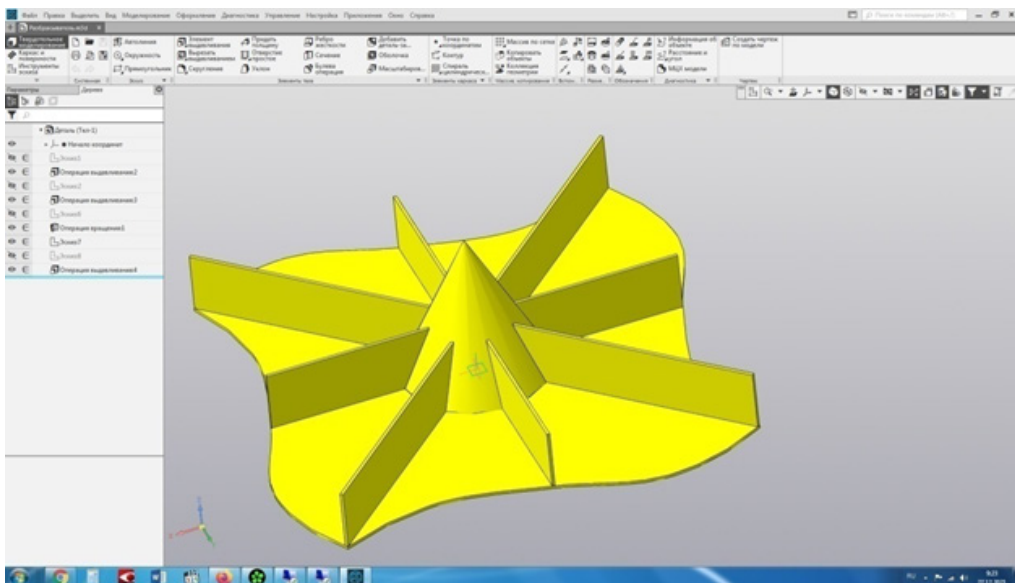
### Результаты исследования

С целью дальнейшей оптимизации и доработки конструкции рабочего органа разбрасывателя была создана пространственная модель (рис. 3). Исследования механических систем посредством программных средств делают возможным поиск наиболее проблемных мест, которые требуют последующей доработки или модификации. Это существенно сокращает сроки получения конечного инновационного продукта. Такие изыскания просто необходимы для изменения и оптимизации геометрических параметров диска и лопастей в целом [21].

Создание CAD-модели (Computer-Aided Design) рабочего органа разбрасывателя удобрений может быть как окончательным, так и промежуточным этапом проектирования. В последнем случае создается САМ-модель (Computer-Aided Manufacturing), которая дает возможность воспроизвести инновационную модель в материале в виде прототипа [22].

На таком этапе воспроизведения прототипа необходимо акцентировать внимание на возможных несовершенствах конструкции.

Для создания такого рода прототипов лучше всего подходят 3D-принтеры. Полученную таким образом модель можно изучать вживую. Такое визуальное исследование прототипа позволяет сделать заметными существенные недостатки. Порой при проектировании исследование компьютерной модели не дает возможности полноценно изучить ее, что делает незаметными недостатки [23; 24].



Р и с. 3. 3D-модель адаптивного центробежного рабочего органа  
 F i g. 3. 3D model of adaptive centrifugal working tool

Поставлена цель создать рабочий прототип и установить его на серийный разбрасыватель МВУ-1200 производства «МордовАгроМаш» вместо штатных рабочих органов.

Использование таких современных средств проектирования существенно сокращает время, а у модели создаваемого объекта практически отсутствуют серьезные погрешности.

В нашем случае прототипы рабочего органа были созданы на 3D-принтере ProJet по технологии MJM с точностью построения 0,01–0,02 мм на 1 см в масштабе 1:1 из фотополимера, по свойствам схожего с АБС-пластиком (рис. 4).

Изготовлено 3 прототипа рабочего органа с различными углами сферической части от 0 до 10°. Каждый из полученных прототипов испытывали

на однодисковом разбрасывателе минеральных удобрений НРУ-0,5 в реальных условиях (рис. 5)<sup>8</sup>. Основными контролируемыми показателями при этом являлись равномерность внесения минеральных удобрений и величина рабочей ширины захвата.

В качестве критерия оптимизации рассматривали неравномерность распределения гранул минеральных удобрений по рабочей ширине захвата. На основании методики априорного ранжирования были определены следующие факторы, оказывающие наибольшее влияние на критерий оптимизации: скорость движения агрегата, угол сферической части рабочего органа и длина разбрасывающих лопастей. Результаты экспериментальных исследований рабочих органов, на примере внесения нитрофоски, представлены на рисунке 6.

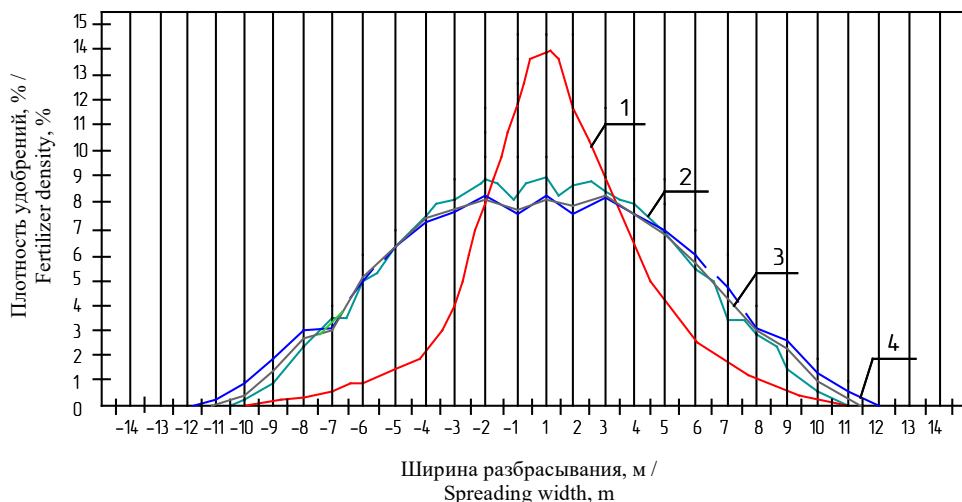
<sup>8</sup> ГОСТ 28714-2007. Машины для внесения твердых минеральных удобрений. Методы испытаний. М. : Стандартиформ, 2020.



Р и с. 4. Процесс печати 3D-принтера, готовый прототип  
F i g. 4. 3D printer printing process, finished prototype



Р и с. 5. Фрагмент предварительных испытаний  
F i g. 5. Fragment of preliminary tests



Р и с. 6. Схема распределения минеральных удобрений: 1 – серийный рабочий орган; 2 – экспериментальный рабочий орган с углом сферической части  $0^\circ$ ; 3 – рабочий орган с углом сферической части  $5^\circ$ ; 4 – рабочий орган с углом сферической части  $10^\circ$

Fig. 6. Scheme of distribution of mineral fertilizers: 1 – serial working body; 2 – experimental working body with a spherical part angle of  $0^\circ$ ; 3 – working body with a spherical part angle of  $5^\circ$ ; 4 – working body with a spherical part angle of  $10^\circ$

Из полученных данных (рис. 6) и выражения (2) следует, что при одинаковых режимах работы во время внесения одних и тех же удобрений дальность полета частиц возрастает с увеличением угла схода гранул с рабочего органа.

Как видно из графика, схемы распределения гранул минеральных удобрений серийным и экспериментальными рабочими органами схожи и подчиняются нормальному закону распределения. Однако в сравнении с серийными рабочими органами, большая часть туков у которых распределена в центральной зоне, применение экспериментальных привело к перераспределению гранул минеральных удобрений с центральной зоны по краям.

### Обсуждение и заключение

Использование разработанных рабочих органов приводит к увеличению рабочей ширины захвата агрегата на 10,0–22,5 %. В сравнении с серийными

экспериментальные рабочие органы позволяют уменьшить неравномерность внесения гранул минеральных удобрений на 13,4 % за счет их перераспределения с центральной зоны по краям.

Положительные результаты предварительных исследований являются предпосылкой для дальнейшей работы по обоснованию конструктивных и кинематических параметров адаптивного центробежного рабочего органа с последующими испытаниями в полевых условиях.

Применение современных методов проектирования с использованием быстрого прототипирования является очень важным инструментом, позволяющим связать теоретические зависимости с параметрами, полученными практическими исследованиями. Такой подход значительно снижает расходы, так как учитываются все возможные зависимости на этапах проектирования



и выпуска разработанного рабочего органа серийно на производстве.

При современном уровне оснащения машиностроительной отрасли 3D-технологиями в перспективе возможно использование оптимизированных САМ-моделей для производства инновационного продукта не только из пластмасс, как прототип, но и непосредственно из металла. Такая

технология включает в себя печать детали с нуля, что отличает ее от традиционных, где требуется вырезание из заготовки с большим расходом материала в стружку. Экономия материала может достигать до 60 %. При этом большая скорость печати и высокая точность делают эти технологии неотъемлемой частью современного высокотехнологического производства.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Структурная оценка энергосберегающей технологии возделывания зерновых культур и рабочих органов посевных машин / А. Н. Ларюшин [и др.] // Нива Поволжья. 2011. № 2. С. 72–79. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16356738> (дата обращения: 01.03.2022).
2. Исакова А. Н., Кошелев С. Н. Ресурсосберегающие технологии в растениеводстве [Электронный ресурс] // Главный агроном. 2019. № 3. URL: <https://panor.ru/articles/resursosberegayushchie-tekhnologii-v-rasteniievodstve/1488.html> (дата обращения: 01.03.2022).
3. Влияние сельскохозяйственной техники на реализацию потенциала урожайности озимой твердой пшеницы / А. Г. Галаян [и др.] // Новые технологии. 2021. № 17. С. 78–86. doi: <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-1-78-86>
4. Using Resource and Energy-Saving Technologies in Agricultural Production as a Direction of Raising Energy Efficiency of Rural Territories / I. O. Yasnolob [et al.] // Ukrainian Journal of Ecology. 2019. Vol. 9, Issue 1. P. 244–250. URL: <https://www.ujecology.com/articles/using-resource-and-energysaving-technologies-in-agricultural-production-as-a-direction-of-raising-energy-efficiency-of-r.pdf> (дата обращения: 01.03.2022).
5. Капустин С. И. Обоснование уровня технологий полевых культур // Сельскохозяйственный журнал. 2019. № 2. С. 12–19. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40082006> (дата обращения: 01.03.2022).
6. The Effect of Different Organic Fertilizers on Yield and Soil and Crop Nutrient Concentrations [Электронный ресурс] / С. Thomas [et al.] // Agronomy. 2019. Vol. 9, Issue 12. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy9120776>
7. Астахов В. С. Возможный качественный прорыв при дифференцированном внесении гранулированных минеральных удобрений // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 1. С. 158–161. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37332615> (дата обращения: 01.03.2022).
8. Savci S. Investigation of Effect of Chemical Fertilizers on Environment // APCBEE Procedia. 2012. Vol. 1. P. 287–292. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2012.03.047>
9. Седашкин А. Н., Даськин И. Н., Костригин А. А. Неравномерность внесения удобрений при координатной системе земледелия // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 10. С. 39–40. URL: <https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/65765> (дата обращения: 01.03.2022).
10. Овчинников В. А., Овчинникова А. В. Рабочий орган для внесения минеральных удобрений // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 2. С. 13–16. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32877772> (дата обращения: 01.03.2022).
11. Innovative Technologies and Equipment from “Amazone” Company for Fertilizer Application / V. Vuxmann [et al.] // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 210. doi: <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202021004002>

12. Седашкин А. Н., Костригин А. А., Милюшина Е. А. Способ повышения качества внесения известковых удобрений // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 1. С. 88–91. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42652389> (дата обращения: 01.03.2022).
13. Припоров Е. В. Прибор настройки однодискового центробежного аппарата // Инновации в сельском хозяйстве. 2017. № 2. С. 181–187. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30160242> (дата обращения: 01.03.2022).
14. Адамчук В. В., Моисеенко В. К. Технические средства нового поколения для посева минеральных удобрений // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2004. № 2. С. 15–19. URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2004/20040207.htm> (дата обращения: 01.03.2022).
15. Рабочий орган для разбрасывания минеральных удобрений : патент 79368 Российская Федерация / Седашкин А. Н. [и др.]. № 2008107503 ; заявл. 26.02.2008 ; опубл. 10.01.2009. 4 с.
16. Тенденции развития машин с центробежными рабочими органами для поверхностного внесения твердых минеральных удобрений / Н. С. Панферов [и др.] // Техника и оборудование для села. 2021. № 12. С. 18–24. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47470683> (дата обращения: 01.03.2022).
17. Портаков А. Б. Рабочий орган для внесения смесей минеральных удобрений // Научный альманах. 2016. № 4–3. С. 153–155. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26146944> (дата обращения: 01.03.2022).
18. Агрегат для внесения пылящихся известковых удобрений / А. Н. Седашкин [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 2018. Т. 85, № 6. С. 17–21. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36808679> (дата обращения: 01.03.2022).
19. Рабочий орган для разбрасывания минеральных удобрений : патент 75532 Российская Федерация / Чаткин М. Н. [и др.]. № 2008112617 ; заявл. 01.04.2008 ; опубл. 20.08.2008. 4 с.
20. Рабочий орган для разбрасывания минеральных удобрений : патент 186301 Российская Федерация / Овчинников В. А., Жалнин Н. А., Овчинникова А. В. № 2018136612 ; заявл. 17.10.2018 ; опубл. 15.01.2019. 4 с.
21. Paolini A., Kollmannsberger A., Rank S. Additive Manufacturing in Construction: a Review on Processes, Applications, and Digital Planning Methods [Электронный ресурс] // Additive Manufacturing Journal. 2019. Vol. 30. doi: <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2019.100894>
22. Factors for Metal Additive Manufacturing Technology Selection / V. Sobota [et al.] // Journal of Manufacturing Technology Management. 2021. Vol. 32, Issue 9. P. 26–47. doi: <https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2019-0448>
23. Schniederjans D., Yalcin M. Perception of 3D-Printing: Analysis of Manufacturing Use and Adoption // Rapid Prototyping Journal. 2018. Vol. 24, Issue 3. P. 510–520. doi: <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2017-0056>
24. Performance Evaluation of 3D Printing Technologies: a Review, Recent Advances, Current Challenges, and Future Directions / U. Chadha [et al.] // Progress in Additive Manufacturing. 2022. doi: <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00257-4>

*Поступила 03.03.2022; одобрена после рецензирования 05.04.2022; принята к публикации 13.04.2022*

*Об авторах:*

**Овчинников Владимир Анатольевич**, доцент кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0350-8478>, Researcher ID: O-6834-2018, [ovchinnikovv81@yandex.ru](mailto:ovchinnikovv81@yandex.ru)

**Кильмяшкин Евгений Анатольевич**, доцент кафедры основ конструирования механизмов и машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-8277>, Researcher ID: CAF-9821-2022, [40252@mail.ru](mailto:40252@mail.ru)

**Князьков Алексей Сергеевич**, старший преподаватель кафедры основ конструирования механизмов и машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8559-5100>, Researcher ID: AFN-5154-2022, ka13@ro.ru

**Овчинникова Алена Владимировна**, аспирант кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2081-2367>, Researcher ID: O-6853-2018, alena2011ovch@yandex.ru

**Жалнин Николай Александрович**, аспирант кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4307-4619>, Researcher ID: AGD-2904-2022, nik.zhalnin2015@yandex.ru

**Зыкин Евгений Сергеевич**, директор Технологического института филиала Ульяновского ГАУ, профессор кафедры агротехнологий, машин и безопасности жизнедеятельности Ульяновского ГАУ (432017, Российская Федерация, г. Ульяновск, б-р Новый Венец, д. 1), доктор технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4795-6865>, Researcher ID: AAM-5482-2021, evg-zykin@yandex.ru

*Заявленный вклад авторов:*

В. А. Овчинников – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, формирование выводов, доработка текста.

Е. А. Кильмяшкин – формулирование основной концепции исследования, формирование выводов.

А. С. Князьков – литературный и патентный анализ, проведение лабораторных исследований, обработка результатов эксперимента, подготовка начального варианта текста и редактирование текста.

А. В. Овчинникова – проведение лабораторных исследований, визуализация текста.

Н. А. Жалнин – литературный и патентный анализ, обработка результатов исследований.

Е. С. Зыкин – критический анализ.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Laryushin N.P., Machnyev A.V., Larin M.A., Khoryev A.N. [Structural Evaluation of Energy-Saving Technology of Cereal Crops and Working Bodies of Sowing Machines]. *Niva povolzhya*. 2011;(2):72–79. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16356738> (accessed 01.03.2022). (In Russ.)

2. Iskakova A.N., Koshelev S.N. [Resource-Saving Technologies in Crop Production]. *Glavnyy agronom*. 2019;(3). Available at: <https://panor.ru/articles/resursosberegayushchie-tekhnologii-v-rasteniiovodstve/1488.html> (accessed 01.03.2022). (In Russ.)

3. Galayan A.G., Medvedko S.N., Bondarev A.V., Chundyshko V.Y. Influence of Agricultural Machinery on the Potential Realization of Winter Hard Wheat Yield. *New Technologies*. 2021;(17):78–86. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-1-78-86>

4. Yasnolob I.O., Chayka T.O., Gorb O.O., et al. Using Resource and Energy-Saving Technologies in Agricultural Production as a Direction of Raising Energy Efficiency of Rural Territories. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2019;9(1):244–250. Available at: <https://www.ujecology.com/articles/using-resource-and-energysaving-technologies-in-agricultural-production-as-a-direction-of-raising-energy-efficiency-of-r.pdf> (accessed 01.03.2022).

5. Kapustin S.I. Justification of Field Crop Technology. *Agricultural Journal*. 2019;(2):12–19. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40082006> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
6. Thomas C., Acquah G.E., Whitmore A.P., et al. The Effect of Different Organic Fertilizers on Yield and Soil and Crop Nutrient Concentrations. *Agronomy*. 2019;9(12). doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy9120776>
7. Astakhov V.S. [Possible Quality Breakthrough with Differential Application of Granular Mineral Fertilizers]. *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2019;(1):158–161. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37332615> (accessed 01.03.2022). (In Russ.)
8. Savci S. Investigation of Effect of Chemical Fertilizers on Environment. *APCBEE Procedia*. 2012;1:287–292. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcbec.2012.03.047>
9. Sedashkin A.N., Daskin I.N., Kostrigin A.A. Irregularity of Fertilizers Application in Conditions of Coordinate Farming System. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2013;(10):39–40. Available at: <https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/65765> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
10. Ovchinnikov V.A., Ovchinnikova A.V. The Working Body for the Application of Mineral Fertilizers. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2018;(2):13–16. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32877772> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Buxmann V., Meskhi B., Mozhgovoy A., et al. Innovative Technologies and Equipment from “Amazone” Company for Fertilizer Application. *E3S Web of Conferences*. 2020;210. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021004002>
12. Sedashkin A.N., Kostrigin A.A., Milyushina E.A. The Way to Improve the Quality of the Application of Lime Fertilizers. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2020;(1):88–91. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42652389> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
13. Priporov E.V. The Control Device Single-Plate Centrifugal Apparatus. *Innovatsii v selskom khozyaystve*. 2017;(2):181–187. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30160242> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
14. Adamchuk V.V., Moiseenko V.K. [New Generation Technical Means for Mineral Fertilizer Spreading]. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2004;(2):15–19. Available at: <http://www.avtomash.ru/gur/2004/20040207.htm> (accessed 01.03.2022). (In Russ.)
15. Sedashkin A.N., et al. [Working Body for Spreading Mineral Fertilizers]. Patent 79,368 Russian Federation. 2009 January 10. 4 p. (In Russ.)
16. Panferov N.S., Teterin V.S., Mitrofanov S.V., et al. Trends in the Development of Machines Fitted with Centrifugal Working Bodies for Surface Application of Solid Mineral Fertilizers. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2021;(12):18–24. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47470683> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
17. Portakov A.B. The Working Body for Making of Mineral Fertilizers. *Nauchnyy almanakh*. 2016;(4–3):153–155. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26146944> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
18. Sedashkin A.N., Milyushina E.A., Kostrigin A.A., et al. The Unit for Making Dusty Lime Fertilizers. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2018;85(6):17–21. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36808679> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
19. Chatkin M.N., et al. [Working Body for Spreading Mineral Fertilizers]. Patent 75,532 Russian Federation. 2008 August 20. 4 p. (In Russ.)
20. Ovchinnikov V.A., Zhalinin N.A., Ovchinnikova A.V. [Working Body for Spreading Mineral Fertilizers]. Patent 186,301 Russian Federation. 2019 January 15. 4 p. (In Russ.)
21. Paolini A., Kollmannsberger A., Rank S. Additive Manufacturing in Construction: a Review on Processes, Applications, and Digital Planning Methods. *Additive Manufacturing Journal*. 2019;30. doi: <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2019.100894>
22. Sobota V., van de Kaa G., Luomaranta T., et al. Factors for Metal Additive Manufacturing Technology Selection. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 2021;32(9):26–47. doi: <https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2019-0448>

23. Schniederjans D., Yalcin M. Perception of 3D-Printing: Analysis of Manufacturing Use and Adoption. *Rapid Prototyping Journal*. 2018;24(3):510–520. doi: <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2017-0056>
24. Chadha U., Abrol A., Vora N.P., et al. Performance Evaluation of 3D Printing Technologies: a Review, Recent Advances, Current Challenges, and Future Directions. *Progress in Additive Manufacturing*. 2022. doi: <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00257-4>

*Submitted 03.03.2022; approved after reviewing 05.04.2022; accepted for publication 13.04.2022*

*About the authors:*

**Vladimir A. Ovchinnikov**, Associate Professor of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0350-8478>, Researcher ID: O-6834-2018, [ovchinnikovv81@yandex.ru](mailto:ovchinnikovv81@yandex.ru)

**Evgeny A. Kilmyashkin**, Associate Professor of the Chair of Basic Designing Mechanisms and Machines National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-8277>, Researcher ID: CAF-9821-2022, [40252@mail.ru](mailto:40252@mail.ru)

**Aleksey S. Knyazkov**, Senior Lecturer of the Chair of Basic Designing Mechanisms and Machines National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8559-5100>, Researcher ID: AFN-5154-2022, [ka13@ro.ru](mailto:ka13@ro.ru)

**Alena V. Ovchinnikova**, Postgraduate Student of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2081-2367>, Researcher ID: O-6853-2018, [alena2011lovch@yandex.ru](mailto:alena2011lovch@yandex.ru)

**Nikolay A. Zhalnin**, Postgraduate Student of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4307-4619>, Researcher ID: AGD-2904-2022, [nik.zhalnin2015@yandex.ru](mailto:nik.zhalnin2015@yandex.ru)

**Evgeny S. Zykin**, Director of the Technological Institute of the Ulyanovsk, Branch of the Ulyanovsk State Agrarian University; Professor of the Chair of Agricultural Technology, Machinery and Life Safety, Ulyanovsk State Agrarian University (1 Novy Venets Blvd., Ulyanovsk 432017, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4795-6865>, Researcher ID: AAM-5482-2021, [evg-zykin@yandex.ru](mailto:evg-zykin@yandex.ru)

*Contribution of the authors:*

V. A. Ovchinnikov – scientific guidance, formulation of the main research concept, formation of conclusions, finalization of the text.

E. A. Kilmyashkin – formulation of the main research concept and conclusions.

A. S. Knyazkov – literary and patent analysis, conducting laboratory research, processing of the experimental results, preparing the initial version of the text and text editing.

A. V. Ovchinnikova – conducting laboratory research, text visualization.

N. A. Zhalnin – literature and patent analysis, processing of the research results.

E. S. Zykin – critical analysis.

*All authors have read and approved the final manuscript.*