



Система позиционирования рабочих органов при дифференцированном опрыскивании растений

Максим Арифович Мирзаев,
младший научный сотрудник,
e-mail: mirza.pochta@gmail.com;

Игорь Геннадьевич Смирнов,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: rashn-smirnov@yandex.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим связь увеличения масштабов применения пестицидов и агрохимикатов с их потенциальной опасностью для здоровья людей, загрязнения окружающей среды и продуктов питания. Большинство пестицидов используются путем опрыскивания посевов. Повысить эффективность и качество опрыскивания возможно за счет точного регулирования дозы и снижения потерь препаратов при переходе на дифференцированную обработку сельскохозяйственных угодий. Этому способствует внедрение роботизированных устройств для внесения средств защиты растений. (*Цель исследования*) Разработать систему позиционирования рабочих органов роботизированного устройства дифференцированного опрыскивания. (*Материалы и методы*) Посевы обрабатывали препаратами при помощи автономного полевого робота. Оценивали качество опрыскивания с применением форсунки. (*Результаты и обсуждение*) Установлены зависимости для расчета угла захвата форсункой одного растения и угла поднятия рычага. Создана компьютерная модель опрыскивания, позволяющая задавать различные параметры и сравнивать предлагаемый дифференцированный способ обработки растений с традиционным. Рассчитан коэффициент вариации, который отражает равномерность распределения капель по поверхности растения. Выявлена зависимость коэффициента вариации от скорости и расстояния опрыскивания при разных режимах работы: распыление на отдельное растение и на их ряд. (*Выводы*) Для традиционного метода опрыскивания коэффициент вариации составил 46 процентов. При дифференцированных методах опрыскивания этот показатель составил для режима обработки отдельного растения 25-28 процентов и 33-40 процентов опрыскивания рядов. В полевых исследованиях при отдельной обработке коэффициент вариации составляет 19-24 процентов против 30-35 процентов в режиме опрыскивания рядов.

Ключевые слова: средства защиты растений, дифференцированное опрыскивание, роботизированное устройство, форсунка TeeJet 110-04 VP, система позиционирования, коэффициент вариации, полевые испытания.

■ **Для цитирования:** Мирзаев М.А., Смирнов И.Г. Система позиционирования рабочих органов при дифференцированном опрыскивании растений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №1. С. 96-100. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-96-100. EDN: DFOKEB.

Scientific article

Positioning System of Working Bodies in Differential Spraying of Plants

Maksim A. Mirzaev,
junior researcher,
e-mail: mirza.pochta@gmail.com;

Igor G. Smirnov,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: rashn-smirnov@yandex.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper highlights that the escalation in the use of pesticides and agrochemicals poses a significant risk to human health, environmental integrity, and food safety. The predominant method of pesticide application is crop spraying. Improved efficiency and quality of spraying, coupled with a reduction in drug costs, can be achieved by transitioning to differential treatment of agricultural land and precision dose regulation. The incorporation of robotic devices offers a promising solution to facilitate the process of plant protection. (*Research purpose*) The research aims to develop a positioning system for a robotic differential spraying device. (*Materials and methods*) were subjected to chemical treatment by an autonomous field robot, and the quality of spraying was assessed using a nozzle. (*Results and discussion*) The research established a relationship between calculating the nozzle capture angle of an individual plant and the angle of lever lift. Subsequently, a computerized spraying model was

developed, enabling the adjustment of various parameters and benchmarking the proposed differential spraying method against the traditional one. The variation coefficient, reflecting the uniformity of droplet distribution on the plant surface, was calculated. The results indicate that the variation coefficient is dependent on the speed and distance of spraying in different operating modes, including individual plant spraying and row spraying. (*Conclusions*) The variation coefficient for the traditional spray method was 46 percent. With the adoption of differential spraying methods, this variation coefficient decreased to 25-28 percent for individual plant spraying and 33-40 percent for row spraying. Field studies further demonstrated a variation coefficient of 19-24 percent for individual plant spraying in contrast to 30-35 percent for row-spray treatments.

Keywords: plant protection products, differential spraying, robotic device, TeeJet 110-04 VP nozzle, displacement system, variation coefficient, field tests.

■ For citation: Mirzaev M.A., Smirnov I.G. Positioning system of working bodies in differential spraying of plants. *Agricultural machinery and technologies*. 2024. Vol. 18. N1. 96-100 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-96-100. EDN: DFOKEB.

Сельское хозяйство является основной отраслью материального производства, от которой в большей степени зависит экономическая безопасность страны [1]. Применение новейших технологий в сельском хозяйстве существенно снижает себестоимость производства, увеличивает производительность и улучшает качество продукции [2].

К важнейшим мероприятиям по повышению урожайности сельскохозяйственных культур относятся химизация, которая заключается в использовании минеральных удобрений и средств защиты растений [3]. В условиях интенсификации агропромышленного производства научно обоснованная система защиты растений продолжает оставаться гарантом высокого и стабильного урожая при сохранении окружающей среды, сельскохозяйственных экосистем и почвы [4].

Решением указанных проблем является применение технологий спутникового мониторинга урожая, оценки здоровья растений с помощью такого параметра, как нормализованный разностный вегетационный индекс (*NDVI*), беспилотных летательных аппаратов [5-7]. Еще одним важным инструментом являются датчики окружающей среды, способные регистрировать информацию о потребностях почвы в воде [8]. Благодаря данным со спутников, беспилотных летательных аппаратов и датчиков, можно создавать интерактивные карты, которые характеризуют состояние здоровья поля и выявляют любые различия между отдельными районами посевов [9]. Активно развивается сфера применения роботизированных устройств в сельскохозяйственном производстве [10, 11].

Одним из способов предотвращения загрязнения окружающей среды служит дифференцированная обработка растений средствами защиты в зависимости от потребностей каждой зоны поля. Дифференцированное внесение удобрений относится к основным принципам устойчивого развития сельского хозяйства. Технологии точного земледелия позволяют уменьшить расход агрохимических

средств и увеличить урожайность культур с минимальным экологическим ущербом (Якушев В.В. Точное земледелие: теория и практика. СПб.: Агрофизический научно-исследовательский институт РАСХН, 2016. 364 с.). Кроме того, можно получить существенную экономию средств, что особенно актуально в условиях дефицита и высокой стоимости агрохимикатов [12].

Цель исследования – разработка системы позиционирования рабочих органов (подвижных форсунок) роботизированного устройства для дифференцированного внесения средств защиты растений методом опрыскивания.

Материалы и методы. Обработка экспериментальных данных и компьютерное моделирование осуществлялись с помощью программных средств с использованием автоматизированного проектирования *Siemens NX*, *Autodesk Netfabb*, *Meshlab*, *Autodesk Fusion 360*, *Microsoft Visual Studio*, *Mathcad 15*, *ImageJ*, *PlanExp B-D13*.

Система позиционирования распылительных форсунок устанавливается на полевого робота, разработанного на базе ФГБНУ ФНАЦ ВИМ [13]. Такое решение позволяет проводить предварительную точную настройку автономного роботизированного устройства под конкретную техническую задачу операции внесения агрохимических средств. К регулируемым параметрам относятся высота опрыскивающего устройства, угол наклона и угол распыла подвижной форсунки.

Качество работы предложенной системы сравнивалось с традиционным методом опрыскивания. Для этих целей выбрали классическую для данного типа задач форсунку *TeeJet 110-04 VP*. Параметры распыления для симуляции опрыскивания щелевым плоскофакельным распылителем следующие: угол распыла 80 град; размер капель 350-450 мкм; высота штанги 70 см; расстояние между распылителями 504 см; рабочее давление 2,5 бар; производительность насадки 1,44 л/мин.

Для оценки режимов работы рабочего органа, т.е. равномерности процесса дифференцированно-

го внесения, и сравнения с технологией сплошного опрыскивания поставлен полный трехфакторный эксперимент ПФЭ 2³. Факторами планирования выбраны: режим работы x_1 (опрыскивание растений или их рядов), поступательная скорость движения роботизированного устройства x_2 (от 0,75 до 1,25 м/с, шаг варьирования 0,25 м/с), расстояние до центра растения x_3 (от 28 до 40 см, шаг 6 см). Функцией отклика принят коэффициент вариации. Коэффициент вариации представляет собой отношение среднеквадратического отклонения к среднему арифметическому (в процентах) и является относительной характеристикой равномерности распределения случайной величины, в данном случае количества капель, улавливаемых карточками, которые расположены в разных частях растения. Опыт поставлен согласно ГОСТ 34630-2019 «Техника сельскохозяйственная. Машины для защиты растений. Опрыскиватели. Методы испытаний».

Исследование проводилось на территории Всероссийского научно-исследовательского института овощеводства (ВНИИО) – филиала ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства» (Московская область, Раменский район, д. Верея) (рис. 1).

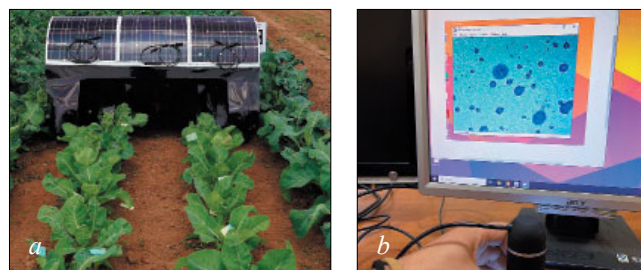


Рис. 1. Исследование равномерности обработки растений методом дифференцированного опрыскивания: а – снимок с полевых испытаний; б – обработка учетных карточек
Fig. 1. Exploring plant treatment uniformity through the differential spraying method: a – field test picture; b – record card processing

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для обеспечения качественного результата предлагаемого устройства количество агрохимического средства должно быть аналогично используемому при традиционном методе на обрабатываемой площади с учетом возможных потерь при дифференцированном опрыскивании. Дозировка вносимой агрохимии происходит за счет регулирования времени опрыскивания

$$t_{\text{раст}} = \frac{\pi \cdot k \cdot q_{\text{трад.}} \cdot r_{\text{раст.}}^2}{n \cdot q_{\text{форс.}}}, \quad (1)$$

где k – коэффициент перерасхода при дифференцированном методе; $q_{\text{трад.}}$ – расход средства при традиционном методе на единицу площади, л/м²; $q_{\text{форс.}}$ – расход одной форсунки на единицу времени, л/с; n – количество форсунок, шт.

Угловая скорость вращения рычагов рабочего

органа роботизированного устройства вокруг вертикальной оси

$$\omega_{\text{вращ.рыч.}} = \frac{n \cdot q_{\text{форс.}}}{\pi \cdot k \cdot q_{\text{трад.}} \cdot r_{\text{раст.}}}, \text{ рад/с}, \quad (2)$$

где $r_{\text{ст}}$ – радиус обработки растения на основе статистического анализа заданного участка, м.

Для предотвращения пересечения потоков распыляемого средства при использовании нескольких форсунок они должны быть повернуты вокруг своей оси. Также это позволяет уменьшить ширину охвата одной форсунки, что важно для точной обработки растений. Угол поднятия рычагов для обработки растения (φ , град), угол поворота форсунки, установленной на рычаге, и проекция угла распыла форсунки на плоскость, перпендикулярную движению роботизированного устройства (α , град):

$$\varphi = 2 \cdot \arctg \left(\frac{-(r+h \cdot tg \frac{\alpha_0}{2}) \pm \sqrt{r^2 + h^2 - d^2 + 2 \cdot h \cdot r \cdot tg \frac{\alpha_0}{2} + (r^2 - h^2) \cdot tg^2 \frac{\alpha_0}{2}}}{h + d + r \cdot tg \frac{\alpha_0}{2}} \right) + (1 + 2 \cdot n) \cdot \pi, n \in Z; \quad (3)$$

$$\alpha = 2 \cdot \arcsin \left(\cos \beta \cdot \sin \frac{\alpha_0}{2} \right) + 2 \cdot \pi \cdot n, n \in Z, \quad (4)$$

где r – радиус обработки одного растения, м; h – высота точки крепления рычагов на раме, м; d – кратчайшее расстояние от точки крепления рычага до форсунки, м; α_0 – угол распыла щелевой плоскофакельной форсунки, град; β – угол поворота плоскости распыла форсунки к плоскости, перпендикулярной движению роботизированного устройства, град.

Создана компьютерная модель, позволяющая задавать различные параметры опрыскивания и сравнить традиционный и дифференцированный способы обработки растений по равномерности распределения капель. Растение обрабатываемой культуры условно представлено в виде трехмерной модели. Для уточнения параметров форсунки проведен опыт, в котором определяли распределение капель по зонам (рис. 2).

По результатам запуска симуляции с параметрами для традиционного метода в соответствии с ГОСТ 34630-2019 рассчитано значение коэффициента вариации. Для традиционного метода коэффициент вариации составил 46%.

По равномерности опрыскивания режимов работы системы позиционирования распылительных устройств в компьютерной модели составлен график зависимости коэффициента вариации от скорости и расстояния опрыскивания при разных режимах работы (рис. 3).

Выводы. Получены теоретические зависимости для дозирования агрохимической жидкости, угла поднятия рычагов рабочих органов и угла поворота форсунки, установленной на рычаге. Указанные

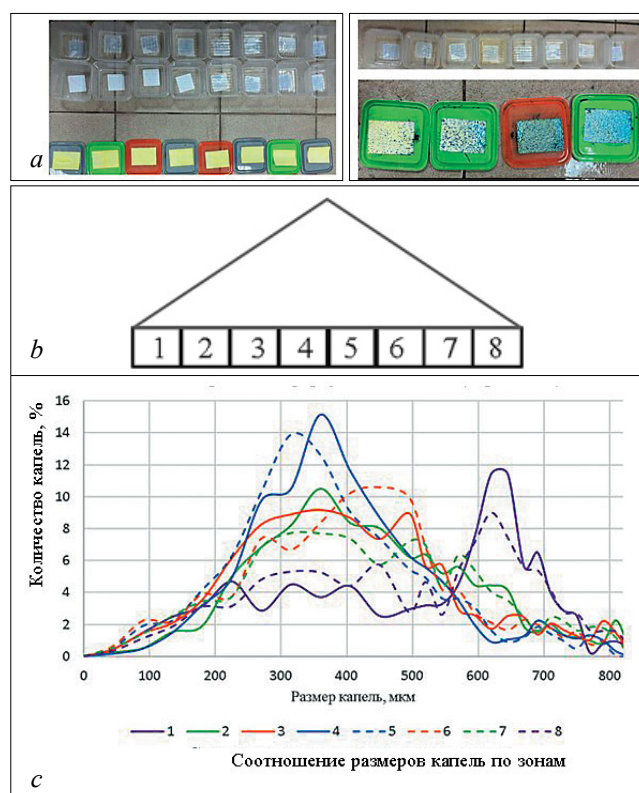


Рис. 2. Анализ распределения распыла форсунки: а – измерение параметров распыла форсунки; б – разбивка распыла форсунки по зонам (карточкам); в – соотношение размеров капель по зонам

Fig. 2. Analysis of nozzle spray distribution: а – measurement of nozzle spray parameters; б – breakdown of nozzle spray by zones (cards); в – droplet size ratio by zones

параметры рассчитываются индивидуально для каждого растения на основе данных с алгоритма распознавания растений и выделения целевой площади обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абросимова М.С., Иванов Е.А., Кочергина С.Г. Состояние и направления развития сельского хозяйства региона // *Российское предпринимательство*. 2018. Т. 19. N4. С. 977-990. DOI: 10.18334/rp.19.4.39006. EDN: UQAFGE.
2. Измайлов А.Ю. Точное земледелие: проблемы и пути решения / А.Ю. Измайлов, Г.И. Личман, Н.М. Марченко // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2010. N 5. С. 9-14. EDN: MWLXCI.
3. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. и др. О синтезе роботизированного сельскохозяйственного мобильного агрегата // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019. N4. С. 63-68. DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68. EDN: GBEQZI.
4. Mandal A., Sarkar B., Mandal S., Vithanage M. Impact of agrochemicals on soil health. *Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation*. 2020. N7. 161-187. DOI: 10.1016/B978-0-08-103017-2.00007-6.
5. Козубенко И.С., Савин И.Ю. Спутниковые данные в управлении агропромышленным комплексом региона // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2017. N5. С. 9-11. EDN: ZWIEXH.
6. Huang S., Tang L., Hupy J.P., Wang Y. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*. 2021. Vol. 32. N1. 1-6. DOI: 10.1007/s11676-020-01155-1.
7. Смирнов И.Г., Курбанов Р.К., Марченко Л.А., Горшков Д.М. Дифференцированная обработка сельхозугодий с помощью БПЛА // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N4(37). С. 30-35. EDN: LFOUD.
8. Романенкова М.С., Балабанов В.И. Применение цифровых технологий в растениеводстве // *Наука в Центральной России*. 2020. N2(44). С. 74-82. DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-74-82. EDN: ZSKSNJ.
9. Личман, Г.И., Марченко Н.М. Космический монито-

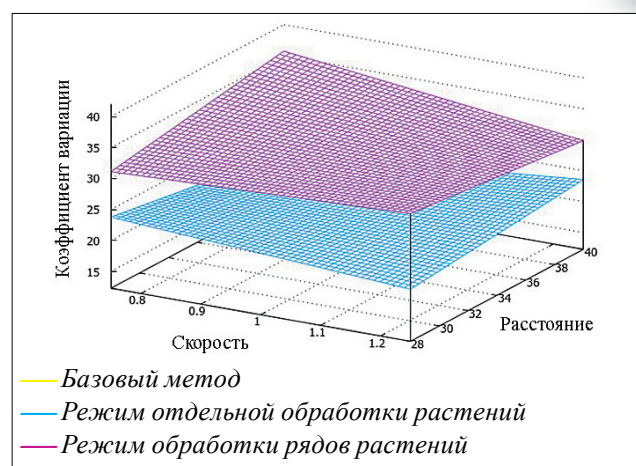


Рис. 3. Зависимость коэффициента вариации от режима, скорости и расстояния опрыскивания

Fig. 3. Variation coefficient dependence on spraying mode, speed and distance

Проведено теоретическое исследование равномерности процесса опрыскивания растений с помощью компьютерного моделирования, а также для технологии сплошного внесения (коэффициент вариации составил 46%). При дифференцированных методах опрыскивания коэффициент вариации составил 25-28% в режиме отдельной обработки и 33-40% при опрыскивании рядов (при скоростях роботизированного устройства 0,75-1,25 м/с и расстоянии 0,28-0,4 м).

Полевое исследование равномерности опрыскивания при двух режимах работы системы позиционирования рабочих органов показало, что на всех изученных уровнях варьирования факторов при отдельной обработке растений коэффициент вариации ниже (19-24% против 30-35% в случае обработки рядов).

ринг в системе точного земледелия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2010. N1. С. 27-31. EDN: KYUHTT.

10. Шалова С.Х., Загазежева О.З. Обзор рынка сельскохозяйственных роботов и их влияние на экономическое развитие // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2019. N7(209). С. 57-70. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-7-57-70.
11. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. и др. О синтезе роботизированного сельскохозяйственного мобильного агрегата // *Вестник российской сельско-*

хозяйственной науки. 2019. N4. С.63-68. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2019/4/63-68>.

12. Шишацкий О.Н. Глобальная индустрия защиты растений // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология*. 2021. Т. 14. N4. С. 541-549. DOI: 10.17516/1997-1389-0371.
13. Мирзаев М.А. Проектирование автономного полевого робота для дифференцированного внесения агрохимических средств // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68. N4(45). С. 131-136. DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-4-131-136. EDN: NBJZNR.

REFERENCES

1. Abrosimova M.S., Ivanov E.A., Kochergina S.G. State and development trends in the region's agriculture. *Russian Journal of Entrepreneurship*. 2018. Vol. 19. N4. 977-990 (In Russian). DOI: 10.18334/rp.19.4.39006. EDN: UQAFGE.
2. Izmaylov A.Yu., Lichman G.I., Marchenko N.M. Precision agriculture: problems and solutions. *Agricultural machinery and technologies*. 2010. N5. 9-14 (In Russian). EDN: MWLXCJ.
3. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Tsench Yu.S., et al. About synthesis of robotic agriculture mobile machine. *Vestnik of the Russian agricultural sciences*. 2019. N4. 63-68 (In Russian). DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68. EDN: GBEQZI.
4. Mandal A., Sarkar B., Mandal S., Vithanage M. Impact of agrochemicals on soil health. *Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation*. 2020. N7. 161-187 (In English). DOI: 10.1016/B978-0-08-103017-2.00007-6.
5. Kozubenko I.S., Savin I.Yu. Satellite data in the agro-industrial complex management of the region. *Vestnik of the Russian agricultural sciences*. 2017. N5. 9-11 (In Russian). EDN: ZWIEXH.
6. Huang S., Tang L., Hupy J.P., Wang Y. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*. 2021. Vol. 32. N1. 1-6. DOI:10.1007/s11676-020-01155-1.
7. Smirnov I.G., Kurbanov R.K., Marchenko L.A., Gorshkov D.M. Differential spraying of farmland via unmanned aerial vehicles. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2019. N4(37). 30-35 (In Russian).
8. Romanenkova M.S., Balabanov V.I. Application of digital technologies in plant crops. *Science in the Central Russia*. 2020. N2(44). 74-82 (In Russian). DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-74-82. EDN: ZSKSNJ.
9. Lichman G.I., Marchenko N.M. Space monitoring in the precision agriculture system. *Agricultural machinery and technologies*. 2010. N1. 27-31 (In Russian). EDN: KYUHTT.
10. Shalova S.Kh., Zagazezheva O.Z. Overview of agricultural robots market and their impact on economic development. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2019. N7(209). 57-70 (In Russian). DOI: 10.23683/2311-3103-2019-7-57-70.
11. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Tsench Yu.S. et al. About synthesis of robotic agriculture mobile machine. *Vestnik of the Russian agricultural science*. 2019. N4. 63-68 (In Russian). <https://doi.org/10.30850/vrsn/2019/4/63-68>.
12. Shishatskiy O.N. Global crop protection industry. *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2021. Vol. 14. N4. 541-549 (In Russian). DOI: 10.17516/1997-1389-0371.
13. Mirzaev M.A. Design of an autonomous field robot for differential application of agrochemicals. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2021. Vol. 68. N4(45). 131-136 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-4-131-136. EDN: NBJZNR.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Мирзаев М.А. – разработка методики исследований, выбор и обоснование основных исследуемых параметров, проведение испытаний, формирование общих выводов; Смирнов И.Г. – научное руководство, планирование методики исследований.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Mirzaev M.A. – development of research methodology, selection and justification of the main study parameters, conducting experiments, formation of general conclusions; Smirnov I.G. – scientific guidance, research methodology planning.

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

05.10.2023

20.11.2023