Agrar xo'jaligi tadqiqotlari

Vol 1 № 1 2026

УДК: 631.319.06

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АГРОДРОНОВ

С. Х. Кадыров

Национальный исследовательский университет "Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства", ул. Кары Ниязи, 39, 100000, г. Ташкент, Узбекистан. Кафедра: "Сельскохозяйственная техника и технологии"

Аннотация: В статье исследуются аэродинамические и технологические параметры агродронов, предназначенных для авиационной обработки сельскохозяйственных культур. Рассматриваются вопросы системного моделирования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оптимизации параметров распыления и повышения эффективности технологических процессов в условиях точного земледелия. Разработана экспериментальная платформа агродрона «ZAMINDAR», предназначенная для точечного внесения химических препаратов и мониторинга состояния посевов. Исследование основано на применении CFD-моделирования, CAD/CAE-проектирования и экспериментальной валидации в полевых условиях. Установлено, что оптимизация аэродинамической схемы и параметров распыления позволяет повысить равномерность покрытия растений до 92,5–94,8 % и снизить расход химических препаратов на 18–22 %. Полученные результаты подтверждают перспективность применения агродронов в системах цифрового и ресурсосберегающего сельского хозяйства.

Ключевые слова: БПЛА; агродрон; точное земледелие; CFD-моделирование; аэродинамика; система распыления; цифровое сельское хозяйство; авиационная обработка; Smart Farming.

Agrar xo'jaligi tadqiqotlari

Agrar xo'jaligi tadqiqotlari

Vol 1 № 1 2026

INVESTIGATION OF AERODYNAMIC AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF AGRICULTURAL DRONES

S. X. Kodirov

National Research University "Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers", 39 Kori Niyoziy Street, 100000, Tashkent, Uzbekistan.

Department of Agricultural Machinery and Technologies

Abstract: This study presents a system-level investigation of aerodynamic and technological parameters of agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) designed for aerial crop treatment under precision agriculture conditions. The research integrates computational fluid dynamics (CFD), CAD/CAE-based engineering design, aerodynamic optimization, and experimental validation to improve spraying efficiency and operational stability of agricultural drone systems. An experimental UAV platform named "ZAMINDAR" was developed and tested under real agricultural field conditions. The study evaluates airflow distribution, droplet dynamics, rotor-induced turbulence, and flight stability parameters affecting aerial spraying performance. Experimental results demonstrated that optimization of aerodynamic configuration and spraying parameters improved crop coverage uniformity up to 92.5–94.8 % while reducing chemical consumption by 18–22 %. The findings confirm the effectiveness of CFD-assisted engineering approaches for the development of resource-efficient and environmentally sustainable UAV systems for precision agriculture applications. The study focuses on system-level modeling of unmanned aerial vehicles (UAVs), optimization of spraying parameters, and improvement of operational efficiency in precision agriculture systems. An experimental agricultural drone platform named "ZAMINDAR" was developed for precision spraying and crop monitoring applications. The research integrates CFD simulations, CAD/CAE engineering analysis, and experimental field validation. The results demonstrate that optimization of aerodynamic configuration and spraying parameters

Agrar xo'jaligi tadqiqotlari

increases crop coverage uniformity up to 92.5–94.8 % while reducing chemical consumption by 18–22 %. The obtained findings confirm the effectiveness of UAV technologies in resource-efficient and digital agriculture systems.

Keywords: UAV; agricultural drone; precision agriculture; CFD analysis; aerodynamics; spraying system; digital farming; aerial application; Smart Farming; aerodynamic optimization; system-level modeling.

Введение

Научная новизна исследования заключается в разработке комплексного подхода к моделированию агродронов на основе интеграции CFD-анализа, CAD/CAE-проектирования и экспериментальной валидации в условиях сельскохозяйственного производства Республики Узбекистан. В отличие от существующих исследований, в работе учитываются локальные агроклиматические факторы, влияющие на устойчивость полёта и эффективность авиационного распыления. В современных условиях глобального роста населения, дефицита водных ресурсов и необходимости обеспечения продовольственной безопасности особую актуальность приобретает внедрение инновационных технологий в сельское хозяйство. Одним из наиболее перспективных направлений развития точного земледелия являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА), позволяющие автоматизировать процессы мониторинга, опрыскивания, внесения удобрений и дистанционного анализа состояния растений. Мировой рынок технологий Smart Farming ежегодно увеличивается в среднем на 12-15 %, что обусловлено высокой потребностью в ресурсосберегающих и экологически безопасных технологиях обработки сельскохозяйственных культур. Ведущие страны мира, включая США, Китай, Японию, Южную Корею и государства Европейского союза, активно внедряют агродроны в системы цифрового сельского хозяйства. В Республике Узбекистан вопросы цифровизации аграрного сектора и внедрения современных инженерных решений определены в качестве приоритетных

Agrar xo'jaligi tadqiqotlari

направлений государственной политики. В частности, в Стратегии развития сельского хозяйства Республики Узбекистан на 2020–2030 годы предусматривается внедрение интеллектуальных технологий, автоматизированных систем управления и инновационных методов обработки сельскохозяйственных культур.Несмотря на активное развитие агродронов, большинство существующих систем остаются адаптированными зарубежными решениями и недостаточно учитывают климатические и эксплуатационные особенности Узбекистана. Высокие температуры, запылённость среды, особенности рельефа и ветровые нагрузки существенно влияют на аэродинамическую устойчивость БПЛА и качество распыления рабочих жидкостей. В связи с этим возникает необходимость разработки научно обоснованных методов моделирования и оптимизации конструктивных и технологических параметров агродронов. Целью исследования является анализ аэродинамических и технологических параметров агродронов, разработка экспериментальной платформы для авиационной обработки сельскохозяйственных культур, а также определение оптимальных режимов работы на основе математического моделирования и экспериментальных испытаний.

Материалы и методы исследования. В исследовании применён комплексный инженерный подход, объединяющий методы математического моделирования, CFD-анализа и экспериментальной валидации. Для моделирования аэродинамических потоков использовалась программная среда ANSYS Fluent. CFD-моделирование позволило определить: распределение воздушных потоков вокруг роторов; - взаимодействие турбулентных зон с факелом распыления; - траекторию движения капель рабочего раствора; - влияние скорости полёта на качество обработки; Проектирование конструктивных элементов агродрона выполнялось в системе SolidWorks CAD/CAE; При разработке конструкции учитывались следующие параметры: распределение центра масс; - вибрационная устойчивость; - аэродинамическое сопротивление; - прочностные характеристики несущей рамы;

В качестве экспериментальной платформы был разработан агродрон

Agrar xo'jaligi tadqiqotlari

«ZAMINDAR» вертолётного типа, предназначенный для точечного внесения химических препаратов.

Основные технические характеристики экспериментальной платформы «ZAMINDAR» Таблица 1

Параметр	**Значение**
Тип платформы	Вертолётный агродрон
Назначение	Авиационное опрыскивание
Продолжительность полёта	25 мин
Грузоподъёмность	25 кг
Производительность	2–3 га/полёт
Рабочая скорость	5–8 км/ч
Рабочая высота	0,5–0,8 м

Экспериментальные испытания проводились в полевых условиях на сельскохозяйственных участках. Для статистической обработки результатов использовались методы дисперсионного анализа (ANOVA) и регрессионного моделирования при уровне достоверности $p \leq 0,05$. Для определения зависимости между параметрами распыления и качеством покрытия использовалась следующая зависимость:

$$P = (Q \cdot \eta) / S$$

где: P – производительность системы распыления, га/ч; Q – расход рабочей жидкости, л/мин; η – коэффициент эффективности покрытия; S – площадь обработки, га.

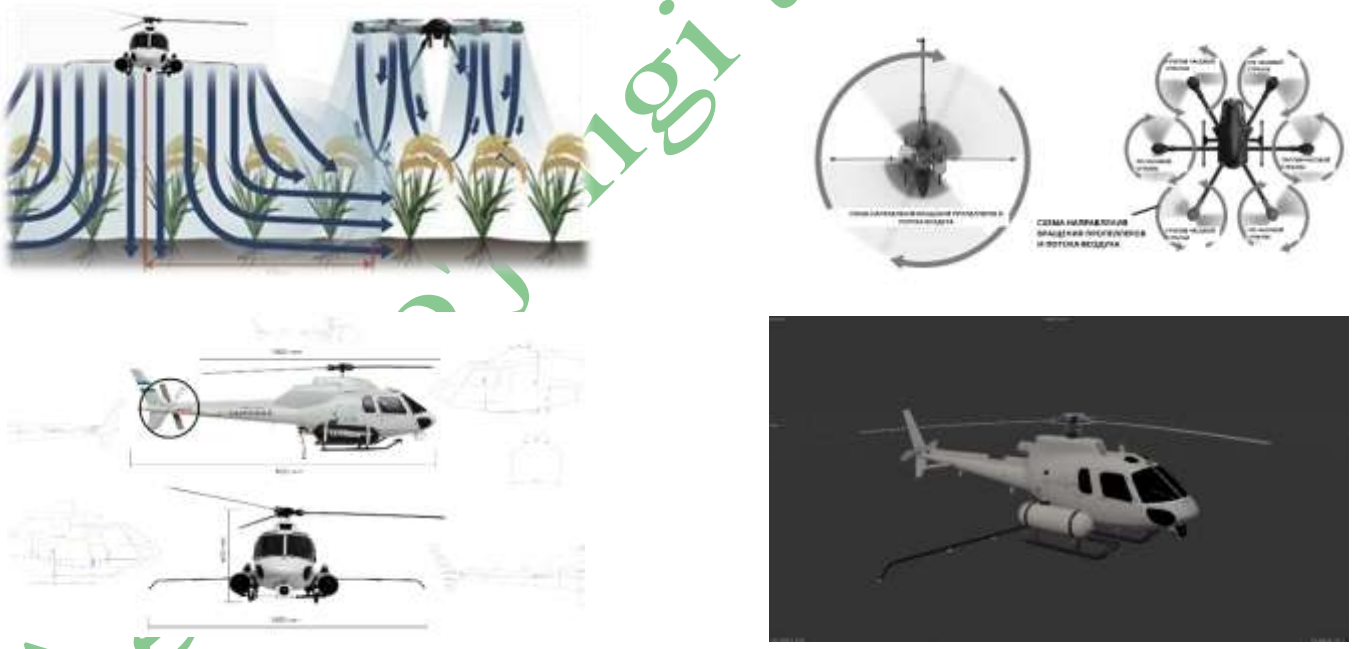
Рис. 1.

Agrar xo'jaligi tadqiqotlari

Конструктивная схема экспериментального агродрона «ZAMINDAR»

Рис. 2.

Результаты CFD-моделирования аэродинамических потоков агродрона



Результаты исследования. В результате проведённых исследований установлено, что аэродинамические параметры агродрона оказывают существенное влияние на эффективность авиационной обработки.

CFD-моделирование показало, что нисходящий поток воздуха, формируемый роторами (downwash effect), способствует более равномерному распределению

капель рабочего раствора по поверхности растений. При этом оптимальная высота обработки составила 0,5-0,8 м, а рабочая скорость - 5-8 км/ч.

Установлено, что при диаметре капель 150-250 мкм достигается наиболее эффективное покрытие листовой поверхности без значительных потерь рабочего раствора вследствие дрейфа.

Основные технологические параметры системы распыления Таблица 2

Показатель	**Значение**
Рабочее давление	0,3–0,5 МПа
Скорость движения	5–8 км/ч
Высота обработки	0,5–0,8 м
Диаметр капель	150–250 мкм
Эффективность покрытия	92,5–94,8 %
Снижение расхода препаратов	18–22 %

В ходе аэродинамической оптимизации были скорректированы параметры расположения роторов и распределения массы конструкции. Это позволило повысить динамическую устойчивость агродрона при работе в условиях ветровых нагрузок и обеспечить устойчивый полёт при наклонах до 10–12°.

Дополнительно в систему мониторинга была интегрирована мультиспектральная камера для расчёта индекса NDVI и дистанционного анализа вегетативного состояния растений. Полученные данные позволили реализовать элементы дифференцированного внесения препаратов.

Обсуждение результатов. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность применения агродронов в системах точного земледелия. Использование БПЛА обеспечивает снижение расхода химических препаратов, уменьшение негативного воздействия на окружающую среду и повышение качества обработки растений. Одним из ключевых преимуществ агродронов является

Agrar xo'jaligi tadqiqotlari

возможность локального и дозированного внесения препаратов. В отличие от традиционных наземных технологий, агродроны обеспечивают минимальный контакт оператора с химическими веществами и позволяют проводить обработку труднодоступных участков. Результаты CFD моделирования показали, что аэродинамические параметры оказывают прямое влияние на структуру факела распыления и равномерность распределения капель. При неправильной конфигурации роторов наблюдается увеличение турбулентности и дрейфа капель, что снижает эффективность обработки. Установлено, что интеграция методов цифрового моделирования и экспериментальной валидации является эффективным инструментом разработки современных авиационных систем обработки сельскохозяйственных культур. Вместе с тем остаются актуальными вопросы дальнейшего исследования влияния атмосферной турбулентности, скорости ветра и микроклиматических факторов на качество авиационного распыления.

Практическая значимость исследования состоит в возможности применения разработанных инженерных решений при проектировании отечественных агродронов для систем точного земледелия, а также при модернизации существующих авиационных комплексов обработки сельскохозяйственных культур.

Заключение. В результате проведённого исследования были проанализированы аэродинамические и технологические параметры агродронов, предназначенных для авиационной обработки сельскохозяйственных культур. Разработанная экспериментальная платформа «ZAMINDAR» показала высокую эффективность при выполнении задач точечного опрыскивания и мониторинга состояния растений. На основании CFD-моделирования и экспериментальных испытаний установлены оптимальные параметры работы системы распыления, обеспечивающие: повышение равномерности покрытия растений до 92,5–94,8 %; – снижение расхода химических препаратов на 18-22 %; - повышение устойчивости полёта при эксплуатационных нагрузках; -улучшение технологической эффективности авиационной обработки; Полученные результаты могут быть

Agrar xo'jaligi tadqiqotlari

использованы при разработке перспективных агродронов и внедрении технологий точного земледелия в условиях Республики Узбекистан.

Библиографические ссылки:

1. Zhang C., Kovacs J. M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review // Precision Agriculture. 2012. Vol. 13, № 6. P. 693–712.

2. Tsouros D. C., Bibi S., Sarigiannidis P. G. A review on UAV-based applications for precision agriculture // Information. 2019. Vol. 10, № 11. P. 349.

3. Adão T. et al. Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors for agriculture // Remote Sensing. 2017. Vol. 9, № 11. P. 1110.

4. Huang Y. et al. Development and prospect of UAV technologies for agricultural production // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2013. Vol. 6, № 3. P. 1–10.

5. Zhang H. et al. Spray drift and droplet distribution in UAV applications // Biosystems Engineering. 2018. Vol. 167. P. 34–45.

6. Li J., Lan Y. UAV spraying systems for precision agriculture: A review // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2020. Vol. 13, № 5. P. 1–12.

7. Saiz-Rubio V., Rovira-Más F. From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A review on crop data management // Agronomy. 2020. Vol. 10, № 2. P. 207.

8. FAO. Precision Agriculture and Digital Farming Report. Rome : FAO, 2020.

9. World Bank. Agricultural Innovation Systems Report. Washington : World Bank, 2021.

10. Lobell D. B. et al. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes // Annual Review of Environment and Resources. 2009. Vol. 34. P. 179–204.

11. Agency for Strategic Reforms. Study on the application of drones and artificial intelligence in Uzbekistan's economy. Tashkent, 2024.

12. Беккет Б. У. Моделирование и управление технологическими процессами. М. : Техносфера, 2003.

Agrar xo'jaligi tadqiqotlari

13. van Griensven A. et al. Sensitivity analysis in engineering systems // Environmental Modelling and Software. 2006. Vol. 21. P. 164-173.

14. Кадыров С. Х. Исследование эффективности применения агродронов в сельском хозяйстве Узбекистана // Agro Ilm. 2024. № 4. С. 52–57.

15. Указ Президента Республики Узбекистан № ПФ-5853 «О стратегии развития сельского хозяйства Республики Узбекистан на 2020–2030 годы». Ташкент, 2019.

16. Указ Президента Республики Узбекистан № ПФ-6262 «О мерах по коренному совершенствованию системы карантина и защиты растений». Ташкент, 2021.

Agrar xo'jaligi tadqiqotlari