

УДК 631.171

EDN [BQEEOO](#)



<https://www.doi.org/10.47813/mip.5.2023.9.111-117>

К вопросу оценки производительности опрыскивания сельскохозяйственных культур беспилотными летательными аппаратами

И.В. Ковалев^{1,2,3*}, Д.И. Ковалев^{3,4}, К.Д. Астанакулов⁴

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²СибГУ имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

³Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

⁴Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства», Ташкент, Узбекистан

E-mail: kovalev.fsu@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается вопрос оценки производительности опрыскивания сельскохозяйственных культур беспилотными летательными аппаратами. Предложена модель расчета производительности БПЛА, основанная на временной структуре процесса опрыскивания сельскохозяйственных культур, включая время опрыскивания, пополнения и полета. Отмечается, что для расчета теоретической производительности необходимо устанавливать длины участков, подвергающихся опрыскиванию с помощью БПЛА. Показано, что производительность различных типов БПЛА защиты растений увеличивается с увеличением длины участка. Существует рекомендуемая длина участка и количество конфигурируемых моделей для различных подходов применения БПЛА. Предложенный подход может существенно помочь сельскохозяйственным предприятиям, использующим БПЛА для опрыскивания растений, оптимизировать структуру используемого оборудования, предоставить методы оценки эффективности эксплуатации БПЛА. На основе предложенной оценки формируются рекомендации по выбору БПЛА для опрыскивания сельскохозяйственных культур и создается базис для планирования транспортно-технологических циклов БПЛА в точном земледелии.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты (БПЛА), сельскохозяйственные культуры, транспортно-технологический цикл.

On the issue of assessing the productivity of spraying agricultural crops with unmanned aerial vehicles

I.V. Kovalev^{1,2,3}, D.I. Kovalev^{3,4}, K.D. Astanakulov⁴

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²Reshetnev Siberian State University, Krasnoyarsk, Russia

³Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

⁴National Research University “Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers”, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. The article discusses the issue of assessing the performance of spraying agricultural crops with unmanned aerial vehicles. UAV performance calculation model is proposed based on the time structure of the crop spraying process, including spraying, replenishment and flight times. It is noted that in order to calculate the theoretical productivity, it is necessary to establish the lengths of the areas to be sprayed using a UAV. It has been shown that the performance of various types of plant protection UAVs increases with increasing site length. There is a recommended span length and number of configurable models for different UAV application approaches. The proposed approach can significantly help agricultural enterprises using UAVs for spraying plants, optimize the structure of the equipment used, and provide methods for assessing the efficiency of UAV operation. Based on the proposed assessment, recommendations are formed for the selection of UAVs for spraying agricultural crops and a basis is created for planning transport and technological cycles of UAVs in precision agriculture.

Keywords: unmanned aerial vehicles (UAV), agricultural crops, transport and technological cycle.

1. Введение

Процесс опрыскивания сельскохозяйственных культур с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является достаточно эффективным для защиты растений, так как имеет ряд преимуществ по сравнению с наземным опрыскиванием. К этим преимуществам относятся: высокая эффективность работы; способность БПЛА выполнять операции при сложном рельефе местности (в горных и предгорных районах) в условиях нестандартных ситуаций, а также низкие эксплуатационные расходы и невысокая трудоемкость [1].

Анализ работ [2, 3] показывает, что использование БПЛА позволяет снять существующие проблемы применения сложной и ресурсоемкой наземной техники, требующей ручной работы персонала на поздней стадии роста растений. Это важно с учетом роста масштабов сельскохозяйственного производства, которое продолжает расширяться во многих развитых и развивающихся странах. В [3] отмечается рост стоимости задействованной в сельском хозяйстве рабочей силы, а также то, что спрос на БПЛА для реализации технологий точного земледелия продолжает расти. Обзор [4] показывает, что применение БПЛА для защиты сельскохозяйственных растений также становится все более распространенным явлением. Таким образом, научные исследования, разработка технологий и оборудования, а также вопросы, связанные с определением режимов работы и транспортно-технологических циклов БПЛА, включая технологические операции по опрыскиванию и защиты растений в настоящее время являются актуальными направлениями работ многих научно-исследовательских организаций и коммерческих фирм, занимающихся продвижением беспилотной техники для выполнения сельскохозяйственных операций [5-7].

2. Материалы и методы

Современные методы для оценки уровня повышения качества и эффективности операций БПЛА по опрыскиванию сельскохозяйственных культур базируются на согласовании параметров транспортно-технологических циклов БПЛА, то есть, операций опрыскивания, оптимизации производительности оборудования (опрыскивателя) и планирования маршрута работы [8]. Отметим исследования по применению БПЛА для защиты растений, обеспечивающих повышение эффективности таких параметров, как рабочая скорость [9, 10], объем и высота распыления [11], ширина распыления [12], размер капель [13], учет естественной скорости ветра [14] и полевого

воздушного потока. В работе [15] акцент был сделан на влияние осаждения капель на элементы растительности, создание усовершенствованной модели и метода оценки параметров операции распыления.

В работе [16] исследования по повышению производительности в основном были сосредоточены на планировании маршрута применения БПЛА для внесения пестицидов, например, на точности и контроле БПЛА с учетом условий сельскохозяйственных угодий. Известны методы разработки эффективного алгоритма сопоставления для операций БПЛА по защите сельскохозяйственных объектов, развертыванию и принятию решений для роя БПЛА [17].

Следует отметить, что современные работы авторов в основном сосредоточены на повышении качества работы БПЛА для опрыскивания растений и надежности опрыскивающего оборудования. Однако исследований в области оценки производительности БПЛА для опрыскивания сельскохозяйственных культур в обзорах не приводится. Важность этого направления становится очевидной для планирования размеров сельскохозяйственных угодий и конфигурации оборудования для развивающегося точного земледелия. В работе [18] были представлены данные о производстве БПЛА для защиты растений с 2016 по 2020 гг. с целью обобщения методов улучшения производственного процесса и анализа затрат на транспортно-технологические циклы БПЛА. Авторами предложена соответствующая длина участка и количество конфигураций для каждой модели и метода при стабильной производительности труда. Это обеспечивает поддержку принятия решений при применении БПЛА для опрыскивания сельскохозяйственных культур.

3. Результаты

Анализ текущего состояния технологий применения БПЛА в точном земледелии позволяет отнести к техническим показателям производительности работы по опрыскиванию БПЛА для защиты растений следующие значения [19]:

- часовая производительность рабочего времени (P_{ϕ} – фактическая часовая производительность, $\text{дм}^2/\text{ч}$);
- чистая часовая производительность опрыскивания ($P_{\text{ч}}$ – часовая производительность нетто-опрыскивания, $\text{дм}^2/\text{ч}$);
- использование рабочего времени (τ – коэффициент использования времени, %);
- производительность труда P_T ($\text{дм}^2/\text{чел.ч}$).

Зависимости технических показателей производительности можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Pi_{\phi} &= \frac{S}{T_n}; \\ \Pi_{\psi} &= \frac{S}{T_p}; \\ \tau &= \frac{T_p}{T_n} \cdot 100\%; \\ \Pi_{\Gamma} &= \frac{\Pi_{\phi}}{O_i}. \end{aligned}$$

Здесь дополнительно введены обозначения: S – фактическая рабочая площадь, дм^2 ; T_n – время полета, ч; T_p – чистое время распыления, ч; O_i – количество операторов i -го БПЛА, чел.

Учитывая введенные технические показатели, можно построить модель производительности, основу которой составит следующий перечень параметров:

- амплитуда распыления средств защиты объектов беспилотного летательного аппарата,
- скорость внесения,
- коэффициент использования времени,
- соотношение между чистым временем применения и общим временем в течение продолжительности применения БПЛА для защиты растений.

Так как применение БПЛА в точном земледелии требует частых взлетов и посадок, то необходимо использовать модель затрат времени на реализацию транспортно-технологических циклов БПЛА [20], в которой необходимо учесть чистое время распыления для i -го бака опрыскивателя и общее время опрыскивания i -го бака опрыскивающей жидкости.

Транспортно-технологический цикл позволяет построить модель расчета времени пополнения запасов БПЛА [21]. Следует учесть, что на чистое время распыления в основном влияет максимальное время перемещения, время пополнения бака опрыскивателя и время, в течение которого беспилотный летательный аппарат может работать с полным баком распыляемой жидкости. Необходимо учитывать максимальный ход, который можно использовать при полном баке распыляемой жидкости, который зависит от емкости бака, рабочей скорости и общего расхода форсунки.

4. Заключение

Таким образом, исследование временных операций транспортно-технологического цикла БПЛА и приведенное представление производственных операций БПЛА для опрыскивания сельскохозяйственных культур направлено на совершенствование общей теории производственных показателей и методов испытаний сельскохозяйственных БПЛА. Использование нескольких моделей на основе введенных выше технических показателей позволит обобщить методы испытаний производственных показателей сельскохозяйственных БПЛА, построить модели производственной эффективности и дать предложения по технологическим решениям для улучшения этих производственных характеристик.

Список литературы

1. Lou S.Y. (2017). Current status and trends of agricultural plant protection unmanned aerial vehicle / S.Y. Lou et al. // J. Agric. Mech. Res. – 2017. – 39(12). – P. 1-6. <https://www.doi.org/10.13427/j.cnki.njyi.2017.12.001>
2. Xue X. Agricultural aviation applications in USA / X. Xue, Y. Lan // Trans. Chin. Soc Agric. Mach. – 2013. – 44(5). – P. 194-201. <https://www.doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.034>
3. Feng Y. (2014). Key research fields and basic directions of Chinese rural-land comprehensive consolidation in transitional period / Y. Feng, Q. Yang // Trans. Chin. Soc Agric. Eng. – 2014. – 30(1). – P. 175-182. <https://www.doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2014.01.023>
4. Kirk I.W. “Electrostatic coalescence for aerial spray drift mitigation,” in National cotton council of America / I.W. Kirk. – Nashville: Beltwide Cotton Conferences, 2003. – 189–191 pp.
5. Ковалев И. (2021). К вопросу формирования блочно-модульной структуры системы управления беспилотных летательных объектов / И. Ковалев, В. Лосев, М. Сарамуд, А. Калинин, А. Лифарь // Современные инновации, системы и технологии - Modern Innovations, Systems and Technologies. – 2021. – 1(3). – P. 48-64. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2021-1-3-48-64>
6. Ковалев Д.И. GERT-анализ транспортных технологических циклов беспилотных летательных аппаратов / Д.И. Ковалев, В.А. Подоплелова, Т.П. Мансурова //

- Информатика. Экономика. Управление - Informatics. Economics. Management. – 2022. – 1(1). – С. 0110–0120. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0110-0120>
7. Kovalev I.V. GERT analysis of UAV transport technological cycles when used in precision agriculture / I.V. Kovalev, D.I. Kovalev, A.A. Voroshilova, V.A. Podoplelova, D.A. Borovinsky // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2022. – 1076 012055. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1076/1/012055>
 8. Zhang M. Quality of plant protection drone operations and their evaluation of the effectiveness of plant protection against corn borer / M. Zhang, et al. // China Plant Prot. – 2021. – 41(06). – P. 66-69. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-6820.2021.06.013>
 9. Kirk I.W. (2001). Aerial electrostatic spray system performance / I.W. Kirk, W.C. Hoffmann, J.B. Carlton // Trans. ASAE. – 2001. – 44(5). – 1089-1092. – <https://doi.org/10.13031/2013.6431>
 10. Qin W. Effects of spraying parameters of unmanned aerial vehicle on droplets deposition distribution of maize canopies / W. Qin, et al. // Trans. Chin. Soc Agric. Eng. – 2014. – 30(5). – P. 50-56. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2014.05.007>
 11. Lan Y. Current status and future directions of precision aerial application for site-specific crop management in the u. s. a. / Y. Lan, et al. Comput. Electron. Agric. – 2010. – 74(1). – P. 34-38. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.07.001>
 12. Zhu H. Effects of application parameters on spray characteristics of multi-rotor UAV / H. Zhu, Y. Jiang, J. Li, H. Zhang // Int. J. Precis. Agric. Aviat. – 2019. – 2(1). – P. 18-25. <https://doi.org/10.33440/j.ijpaa.20190201.0025>
 13. Qiu B. Effects of flight altitude and speed of unmanned helicopter on spray deposition uniform / B. Qiu, et al. // Trans. Chin. Soc Agric. Eng. – 2013. – 29(24). – P. 25-32. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2013.24.004>
 14. Chen S. Effect of wind field below rotor on distribution of aerial spraying droplet deposition by using multi-rotor UAV / S. Chen, et al. // Trans. Chin. Soc Agric. Mach. – 2017. – 48(8). – P. 105-113. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.011>
 15. Wang C. (2016). Testing method of spatial pesticide spraying deposition quality balance for unmanned aerial vehicle / C. Wang et al. // Trans. Chin. Soc Agric. Eng. – 2016. – 32(11). – P. 54-61. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2016.11.008>
 16. Wang C. Distribution characteristics of pesticide application droplets deposition of unmanned aerial vehicle based on testing method of spatial quality balance / C. Wang, et

- al. // Trans. Chin. Soc Agric. Eng. – 2016. – 32(24). – P. 89-97.
<https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2016.24.012>
17. Cao G. (2019). Scheduling model of UAV plant protection team based on multi-objective optimization / G. Cao, et al. // Trans. Chin. Soc Agric. Mach. – 2019. – 50(11). – P. 92-101. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.010>
18. Qin W. Productivity model and experiment of field crop spraying by plant protection unmanned aircraft / W. Qin, P. Chen, B. Wang // Front. Plant Sci. – 2023. – 14(1168228). <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1168228>
19. Qiao J. Variation of technology productivity of harvesting outfit along with site conditions / J. Qiao, et al. // Trans. Chin. Soc Agric. Eng. – 2023. – 32(7). – P. 43-50. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2016.07.006>
20. Ковалев И.В. Анализ средств спецификации транспортно-технологических циклов БПЛА в умном сельском хозяйстве / И.В. Ковалев, Д.И. Ковалев, В.А. Подоплелова, М.Ф. Иконникова // Системы управления и информационные технологии. – 2023. – № 2(92). – С. 80-85. – EDN JBEVZX.
21. Ковалев И.В. К вопросу минимизации затрат в GERT-сетевых моделях транспортно-технологических циклов БПЛА / И.В. Ковалев, Д.И. Ковалев, К.Д. Астанакулов [и др.] // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11, № 2(41). – С. 30-31. – <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.41.2.014>. – EDN RYOYMW.