

УДК 004.942

EDN YVFSAR

<https://www.doi.org/10.47813/rosnio-III.2024.2003>

К вопросу оптимизации и тестирования параметров транспортно-технологических циклов многороторных БПЛА

В.А. Подоплелова^{1,2*}, Д.И. Ковалев^{2,3,4}

¹Сочинский государственный университет, Сочи, Россия

²Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

³Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства», Ташкент, Узбекистан

⁴Красноярский краевой Дом науки и техники РосСНИО, Красноярск, Россия

*E-mail: podoplelovava@mail.ru

Аннотация. Вопросы оптимизации параметров транспортно-технологических циклов БПЛА в статье формулируются на основе анализа и результатов тестирования многороторных БПЛА, применяемых в системах точного земледелия. Представлен краткий обзор современных результатов применения многороторных БПЛА типа P-20 при распылении пестицидов в точном земледелии. Отмечается, что в рамках совершенствования технологии применения БПЛА необходимо продолжить работы по оптимизации и тестированию параметров транспортно-технологических циклов БПЛА совместно с обоснованным выбором специальных реагентов и их комбинаций для улучшения эффекта распыления и повышения уровня использования пестицидов. Рассмотрены результаты, которые позволяют проанализировать и сопоставить законы равномерного и проникающего осаждения и сноса капель в пологах хлопчатника на различной высоте полета БПЛА. Результаты получены на основе традиционной методики статистической обработки полученных экспериментальных данных. Решение задач, связанных с оптимизацией и тестированием параметров транспортно-технологических циклов многороторных БПЛА, будет непосредственно отражаться на улучшении качества и эффективности систем точного земледелия.

Ключевые слова: оптимизация, тестирование, многороторный БПЛА, транспортно-технологический цикл, точное земледелие.

On the issue of optimization and testing of parameters of transport and technological cycles of multi-rotor UAVs

V.A. Podoplelova^{1,2*}, D.I. Kovalev^{2,3,4}

¹Sochi State University, Sochi, Russia

²Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

³National Research University "Tashkent Institute of Engineers of Irrigation and Mechanization of Agriculture", Tashkent, Uzbekistan

⁴Krasnoyarsk Science and Technology City Hall, Krasnoyarsk, Russia

*E-mail: podoplelovava@mail.ru

Abstract. The issues of optimizing the parameters of UAV transport and technological cycles are formulated in the article based on the analysis and testing results of multi-rotor UAVs used in precision farming systems. A brief overview of the current results of using multi-rotor UAVs of the P-20 type when spraying pesticides in precision agriculture is presented. It is noted that, as part of improving the technology for using UAVs, it is necessary to continue work on optimizing and testing the parameters of UAV transport and technological cycles together with a reasonable choice of special reagents and their combinations to improve the spraying effect and increase the level of use of pesticides. The results are considered that make it possible to analyze and compare the laws of uniform and penetrating deposition and drift of droplets in cotton canopies at different UAV flight altitudes. The results were obtained based on the traditional method of statistical processing of the obtained experimental data. Solving problems related to optimizing and testing the parameters of transport and technological cycles of multi-rotor UAVs will directly affect the improvement of the quality and efficiency of precision farming systems.

Keywords: optimization, testing, multi-rotor UAV, transport and technological cycle, precision agriculture.

1. Введение

При применении БПЛА в сельском хозяйстве наблюдается быстрый прогресс, отражаемый во многих текущих публикациях [1-8]. Многие работы отражают разработки в области новых беспилотных авиационных систем с растущей интеграцией инновационных технологий [9-14]. Ряд проблем во многих странах связан с вопросами регулирования и условиями применения БПЛА, однако эти проблемы находят свое решение и нельзя отрицать, что БПЛА будут продолжать все больше интегрироваться в сельскохозяйственную среду [15-17]. В указанных работах авторами демонстрируется множество успешных практик применения БПЛА при распылении сельскохозяйственных химикатов. Успешно продолжаются исследования по совершенствованию этих беспилотных технологий и созданию новых решений, способствующих эффективному и безопасному использованию пестицидов в сельском хозяйстве.

Следует отметить, что распыление небольших объемов агрохимикатов с использованием БПЛА на малых высотах полета отличается от операций, выполняемых с применением современных пилотируемых самолетов или штанговых опрыскивателей. Нисходящий поток воздуха, создаваемый БПЛА, напрямую определяет движение капель при их разбрызгивании в пространстве. Это не только основной фактор, влияющий на осаждение капель на объекты растительности, но и основная причина отлета капель от этих объектов. Поэтому большинство текущих исследований в этой области сосредоточены на анализе характеристик распределения капель агрохимикатов и влиянии этого распределения на производительность операций по распылению гербицидов [18-20].

Однако на сегодняшний день существуют проблемы, связанные с отсутствием полных и обобщающих исследований моделей воздушного потока, корреляции параметров распыления, а также точных методик измерения в условия полевых испытаний. Для конкретных типов БПЛА специализированные модели воздушного потока разработаны, но, как правило, они не обобщены для определенного класса БПЛА.

Поэтому изучение и проверка таких моделей является важной и актуальной на сегодняшний день задачей, так как необходимы дополнительные исследования как для разработки специальных датчиков мониторинга переноса и распространения нисходящего потока БПЛА, так и для оптимизации и тестирования параметров

транспортно-технологических циклов БПЛА при распылении пестицидов в точном земледелии [21-24].

Важным является сочетание теоретических исследований с полевым применением конкретных типов БПЛА. Различные сельскохозяйственные культуры должны быть специально протестированы и проанализированы в разных климатических и погодных условиях, чтобы выявить общие тенденции изменения характеристик беспилотной технологии в зависимости от параметров БПЛА и особенностей сельскохозяйственных культур в различные периоды вегетации.

2. Материалы и методы

В данной статье вопросы оптимизации и тестирования параметров транспортно-технологического цикла многороторного БПЛА при распылении пестицидов в точном земледелии рассматриваются на примере четырехроторного БПЛА типа P-20 (производитель Guangzhou XAG, Китай) [17], подробные параметры которого показаны в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры многороторного БПЛА типа P-20.

| Параметры | Значения | Примечания |
|------------------------------------|---------------|---------------------|
| Максимальная скорость полета (м/с) | 12 | Автономный режим |
| Максимальная высота полета (м) | 4000 | Автономный режим |
| Размер БПЛА P-20 (мм) | 1852/1828/403 | Длина/ширина/высота |
| Взлетный вес (кг) | 32 | Максимальный вес |
| Соотношение подъемной силы к весу | 2,14 | Максимальный вес |

Интерес представляют результаты исследования, основанного на решеточном методе Больцмана, представленного в [17]. Авторы моделировали поле нисходящего потока четырехроторного БПЛА P-20 на различных скоростях полета. Проверка осуществлялась с помощью полевых испытаний. Отметим следующие выводы работы. Средние скорости воздушного потока на расстоянии менее 1,6 м от роторов при скорости 2, 4 и 6 м/с составляют 2,33 м/с, 1,90 м/с и 1,03 м/с соответственно, что является достаточно высоким показателем, чтобы раскрыть большую часть кроны растений и повысить скорость проникновения капель. Скорость полета БПЛА оказывает

существенное влияние на поле нисходящего потока. С увеличением скорости полета поток постепенно поднимается, и концентрация вихрей на законцовках крыльев роторов увеличивается. При увеличении скорости полета до 6 м/с скорость вихря на законцовках крыльев роторов достигает 3,3 м/с, что оказывает сильное воздействие на процесс опрыскивания, то есть значительно увеличивает риск сноса капель. Состав экспериментального оборудования для полевых испытаний на базе многороторного БПЛА представлен в [13].

3. Результаты и обсуждение

В работе [11] представлены результаты, которые позволяют выяснить факторы, влияющие на осаждение пестицидов на поверхность растений и на степень их воздействия при распылении пестицидов многороторными дронами, а также улучшить уровень осаждения капель на выбранные объекты в полевых условиях. Авторами предлагаются соответствующие методы испытаний посредством экспериментов с многороторным БПЛА P-20. В частности, на основе однофакторного теста комбинированная испытательная установка Vox-Behnken использовалась для проведения исследований параметров распыления оборудования для внесения пестицидов. При этом высота полета, скорость полета, расход форсунок распылителя использовались в качестве параметров и влияющих факторов, а уровень осаждения капель на мишени выбирался в качестве целевой функции. Это позволило построить математическую модель уровня осаждения капель и исследовать ее эффективность, а также проанализированы связи между указанными факторами.

Для анализа модели был использован метод регрессионного анализа и метод анализа поверхности отклика программы Design-Expert 8.0.5 для оптимизации параметров многороторного БПЛА P-20 для нанесения методом горизонтальной поверхности отклика.

В результате получено оптимальное сочетание параметров БПЛА при опрыскивании растений пестицидами. Результаты для БПЛА P-20 показывают, что осаждение капель раствора зависит от высоты полета, скорости полета и расхода форсунок распыления. Установлено оптимальное сочетание параметров распыления: высота полета 2,0 м; скорость полета 3,7 м/с; расход сопла 430 мл/мин. Максимальный

уровень осаднения на мишени при этом условии составляет 68,69%, что согласуется с полученной моделью.

Сводные данные об оптимальных рабочих параметрах различных типов БПЛА из опубликованных исследований приведены в [12]. Для многороторного БПЛА P-20 при испытаниях на рисовых [11] и хлопковых [13] полях представлены следующие параметры:

- объем бака (л) – 8;
- диапазон высота полета при испытаниях (м) – 1-3;
- оптимальная высота полета (м) – 2;
- диапазон скорости полета при испытаниях (м/с) – 2-6;
- оптимальная скорость полета (м/с) – 3,7;
- полоса распыления (м) – 1,5-3.



Рисунок 1. Обработка полей с помощью многороторного БПЛА (источник: www.mdpi.com/journal/agronomy).

В [13] представлен эксперимент, который состоял из трех обработок, когда опрыскивание хлопка проводилось дефолиантом (период года - июнь). Каждая обработка проводилась на площади 100 квадратных метров. С помощью БПЛА обработка представляла собой опрыскивание на малой высоте и в небольшом объеме (рабочая высота 1,5 и 2 м). Погода в течение экспериментального периода описана в [13].

Выполнялась оценка осаднения капель, то есть испытания на опрыскивание с помощью БПЛА P-20 было направлено на изучение регулярности осаднения и сноса

капель. Рисунок 1 иллюстрирует процесс обработки полей с помощью много rotorного БПЛА P20. В работе [25] представлена схема размещения контрольных объектов в зоне распыления и водочувствительной бумаги (ВЧБ).

Была проведена статистическая обработка полученных экспериментальных данных, чтобы проверить значимость влияния высоты полета на результаты эксперимента. Показано значительное влияние высоты полета на осаждение и снос капель.

Также исследовалась равномерность распределения капель распыления на мишенях с помощью показателя CV плотности капель [26]. Чем меньше значение показателя CV, тем лучше равномерность осаждения капель. Результаты анализа приведены в [27].

Следует отметить также результаты исследований, связанные с выяснением влияния адсорбции дефолианта на листья хлопчатника (изучалась адсорбция ацетамиприда и спиродиклофена). Данные результаты показаны в работе [27] в сравнении процессов опрыскивания с помощью штангового опрыскивателя и БПЛА.

4. Заключение

Представленный в работе анализ базируется на тестировании параметров транспортно-технологического цикла много rotorного БПЛА типа, используемого в системах точного земледелия. Рассмотрены работы авторов, в которых изучены, проанализированы и сопоставлены результаты опытов по равномерному и проникающему осаждению и сносу капель в пологах растений на различной высоте полета БПЛА. Показано, что распыление небольших объемов агрохимикатов с использованием БПЛА на малых высотах полета отличается от операций, выполняемых с применением современных пилотируемых самолетов или штанговых опрыскивателей. Можно сделать вывод о том, что высота полета БПЛА оказывает существенное влияние на процесс осаждения и сноса капель.

Анализ представленных работ многих авторов позволяет сделать заключение о том, что, совершенствуя технологию применения БПЛА, необходимо продолжать работы по оптимизации транспортно-технологических циклов БПЛА [28-30]. При этом следует совместно с этим осуществлять обоснованный выбор специальных реагентов и их комбинаций для улучшения эффекта распыления и повышения уровня использования

пестицидов. Это непосредственно будет отражаться на улучшении качества и эффективности систем точного земледелия на базе БПЛА.

Список литературы

1. Kovalev I.V. Analysis of the current situation and development trend of the international cargo UAVs market / I.V. Kovalev, A.A. Voroshilova, M.V. Karaseva // Journal of Physics: Conference Series : International Scientific Conference "Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019", Krasnoyarsk, 25–27 сентября 2019 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. Vol. 1399. – Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. – P. 55095. – <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055095>. – EDN JBSFXB.
2. Multiversion environment creation for control algorithm execution by autonomous unmanned objects / I.V. Kovalev, P.V. Zelenkov, V. V. Losev et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 5th International Workshop on Mathematical Models and their Applications 2016, IWMMA 2016, Krasnoyarsk, 07–09 ноября 2016 года. Vol. 173. – Institute of Physics Publishing, 2017. – P. 012025. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/173/1/012025>. – EDN YVPDPB.
3. Model implementation of the simulation environment of voting algorithms, as a dynamic system for increasing the reliability of the control complex of autonomous unmanned objects / I. Kovalev, V. Losev, M. Saramud, M. Petrosyan // MATEC Web of Conferences, Rostov-on-Don, 13–15 сентября 2017 года. Vol. 132. – Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2017. – P. 04011. – <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713204011>. – EDN XNKSVN.
4. N-version design of fault-tolerant control software for communications satellite system / V.A. Kulyagin, R.Y. Tsarev, A.V. Prokopenko et al. // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings, Omsk, 21–23 May 2015. – Omsk, 2015. – P. 7147116. – <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2015.7147116>. – EDN UZXORZ.
5. Model of the reliability analysis of the distributed computer systems with architecture "client-server" / I.V. Kovalev, P.V. Zelenkov, M. V. Karaseva et al] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: XVII International Scientific Conference "Reshetnev Readings", Krasnoyarsk, 12–14 November 2014. Vol. 70. – Krasnoyarsk:

- Institute of Physics Publishing, 2015. – P. 012009. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/70/1/012009>. – EDN UEMVYN.
6. К вопросу реализации мультиверсионной среды исполнения бортового программного обеспечения автономных беспилотных объектов средствами операционной системы реального времени / И.В. Ковалев, В.В. Лосев, М.В. Сарамуд и др. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2017. – Т. 18, № 1. – С. 58-61. – EDN YKCCWL.
 7. Ковалев И.В. Возможности использования инновационных космических технологий в прогрессивном растениеводстве / И.В. Ковалев, Н.В. Титовская, С.Н. Титовский // Проблемы современной аграрной науки: Материалы международной научной конференции, Красноярск, 15 октября 2019 года / Ответственные за выпуск: Валентина Леонидовна Бопп, Жанна Николаевна Шмелева. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2019. – С. 200-204. – EDN YLQVPN.
 8. К вопросу формирования блочно-модульной структуры системы управления беспилотных летательных объектов / И.В. Ковалев, В.В. Лосев, М.В. Сарамуд и др. // Современные инновации, системы и технологии. – 2021. – Т. 1, № 3. – С. 54-71. – <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2021-1-3-48-64>. – EDN ECMMWF.
 9. Intelligent control system of autonomous objects / E.A. Engel, N.E. Engel, I.V. Kovalev et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 5th International Workshop on Mathematical Models and their Applications 2016, IWMA 2016, Krasnoyarsk, 07–09 November 2016. Vol. 173. – Institute of Physics Publishing, 2017. – P. 012024. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/173/1/012024>. – EDN YVMQDD.
 10. Карцан И.Н. Проблемы анализа и синтеза структур сложных систем сетевого взаимодействия наземных пунктов управления космическими аппаратами / И.Н. Карцан, И.В. Ковалев, С.В. Ефремова // Решетневские чтения. – 2017. – Т. 1. – С. 390-391. – EDN YLYXWR.
 11. Qin W. Optimization and experiment of pesticide application parameters of P20 multi-rotor drone based on response surface method / W. Qin, X. Xue, S. Zhang, W. Gu, C. Chen // Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition). – 2016. – 37(5). – P. 548-555. – <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7775.2016.05.010>

12. Chen H. Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV) / H. Chen, et al. // *Int J Agric & Biol Eng.* – 2021. – 14(1). – P. 38-49.
13. Lou Z.X. Effect of unmanned aerial vehicle flight height on droplet distribution, drift and control of cotton aphids and spider mites / Z.X. Lou, F. Xin, X.Q. Han, Y.B. Lan, T.Z. Duan, W. Fu // *Agronomy.* – 2018. – 8(9). – P. 187.
– <https://www.doi.org/10.3390/agronomy8090187>.
14. Wang J. Evaluation of aerial spraying application of multi-rotor unmanned aerial vehicle for *Areca catechu* protection / J. Wang, C. Ma, P. Chen, W. Yao, Y. Yan, T. Zeng, S. Chen, Y. Lan // *Front Plant Sci.* – 2023. – 14. – 1093912.
– <https://www.doi.org/10.3389/fpls.2023.1093912>.
15. Juan Wang. Evaluation of aerial spraying application of multi-rotor unmanned aerial vehicle for *Areca catechu* protection / Juan Wang, Chao Ma et al. // *Front Plant Sci.* – 2023. – 14. – 1093912. – <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10011446/>
16. Kovalev I.V. Modern unmanned aerial technologies for the development of agribusiness and precision farming / I.V. Kovalev, N.A. Testoyedov // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* – 2020. – 548. – 052080. – <https://www.doi.org/10.1088/1755-1315/548/5/052080>
17. del Cerro J. Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture: A Survey / J. del Cerro, Ulloa C. Cruz, A. Barrientos, Rivas J de León // *Agronomy.* – 2021. – 11(2). – 203. – <https://doi.org/10.3390/agronomy11020203>
18. Zhang H.Y. Numerical analysis of downwash flow field from quad-rotor unmanned aerial vehicles / H.Y. Zhang, Y.B. Lan, N.W. Shen, J.Y. Wu, T. Wang, J. Han, S. Wen // *Int J Precis Agric Aviat.* – 2020. – 3(4). – P. 1-7. – <https://doi.org/10.33440/j.ijpaa.20200304.138>
19. Liao J. Quality evaluation method and optimization of operating parameters in crop aerial spraying technology / J. Liao, Y. Zang, Z.Y. Zhou, X.W. Luo // *Transactions of the CSAE.* – 2015. – 31(2). – P. 38-46.
20. Подоплелова В.А. К вопросу анализа ограничений на значения параметров в пространстве действий автономных интеллектуальных систем / В.А. Подоплелова, Д.И. Ковалев, К.Д. Астанакулов // *Информатика. Экономика. Управление - Informatics. Economics. Management.* – 2023. – 2(3). – P. 0225-0238.
<https://doi.org/10.47813/2782-5280-2023-2-3-0225-0238>

21. Chen S.D. Evaluation and test of effective spraying width of aerial spraying on plant protection UAV / S.D. Chen, Y.B. Lan, J.Y. Li, X.J. Xu, Z.G. Wang, B. Peng // Transactions of the CSAE. – 2017. – 33(7). – P. 82-90.
22. Ковалев Д.И. GERT-анализ транспортных технологических циклов беспилотных летательных аппаратов / Д.И. Ковалев, В.А. Подоппелова, Т.П. Мансурова // Информатика. Экономика. Управление - Informatics. Economics. Management. – 2022. – 1(1). – P. 0110-0120. – <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0110-0120>
23. Kovalev I.V. Modern technological trends in the development of the ecosystem of cargo UAVs. / I.V. Kovalev, A.A. Voroshilova // J. Phys.: Conf. Ser. – 2020. – 1515. – 052068. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/5/052068>
24. Kovalev I.V. GERT analysis of UAV transport technological cycles when used in precision agriculture / I.V. Kovalev, et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – 1076. – 012055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1076/1/012055>
25. Podoplelova V.A. Review of research in the field of GERT analysis of transport and technological cycles / V.A. Podoplelova // В сборнике: Инновационные тенденции развития российской науки. Материалы XVI Международной научно-практической конференции молодых ученых. Красноярск, 2023. – С. 785-788.
26. Wang C.L. Testing method of spatial pesticide spraying deposition quality balance for unmanned aerial vehicle / C.L. Wang, X.K. He, X.N. Wang // Trans. CSAE. – 2016. – 32. – P. 54-56.
27. Yao W.X. Droplet drift characteristics of aerial spraying of AS350B3e helicopter / W.X. Yao, Y.B. Lan, J. Wang // Trans. CSAE. – 2017. – 33. – P. 75-83.
28. Qin W.C. Effects of spraying parameters of unmanned aerial vehicle on droplets deposition distribution of maize canopies / W.C. Qin, X.Y. Xue, L.X. Zhou // Trans. CSAM. – 2014. – 30. – P. 50-56.
29. 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.
30. Kovalev I.V. GERT analysis of UAV transport technological cycles when used in precision agriculture / I. V. Kovalev, D. I. Kovalev, A. A. Voroshilova et al. // IOP Conference Series:

Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 1076, No. 1. – P. 012055. – <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1076/1/012055>. – EDN ULLRWB.

31. 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.