

Секция – **Авиационные системы, технологии беспилотных летательных аппаратов**

УДК 629.735.015

Асовский Валерий Павлович, Кузьменко Алла Сергеевна

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПРЫСКИВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ВОЗДУШНЫМИ СУДАМИ**

*Рассмотрены вопросы использования компьютерного моделирования процессов и показателей опрыскивания с применением беспилотных воздушных судов вертолетного типа для решения актуальных научно-практических задач. С использованием разработанного и апробированного расчетно-программного комплекс моделирования проведены многовариантные расчеты показателей опрыскивания гексакоптером типа DJI Agras T20 в характерных условиях проведения обработок. Определены качественные и количественные соотношения между отдельными параметрами и целевыми показателями защитного опрыскивания, а также ряд значимых многофакторных степенных регрессий для оценки целевых показателей такого опрыскивания.*

*Беспилотное воздушное судно (БВС), мультикоптер, опрыскивание, моделирование, норма внесения, покрытие каплями, качество внесения, эффективность обработки.*

Asovsky Valery Pavlovich, Kuzmenko Alla Sergeevna

**COMPUTER SIMULATION OF PROCESSES AND INDICATORS OF SPRAYING BY UNMANNED AIRCRAFT**

*The article discusses the use of computer simulation of spraying processes and indicators using helicopter-type unmanned aerial vehicles to solve current scientific and practical problems. Multivariate calculations of spraying parameters with a DJI Agras T20 hexacopter under typical treatment conditions were carried out using the developed and tested computational modeling software package. Qualitative and quantitative relationships between individual parameters and target indicators of protective spraying have been determined, as well as a number of significant multivariate power regressions for assessing the target indicators of such spraying.*

*Unmanned aircraft (UAV), multicopter, spraying, simulation, application rate, droplet coating, application quality, processing efficiency.*

## **Введение**

Одним из наиболее перспективных направлений развития гражданских беспилотных систем в настоящее время считается использование беспилотных воздушных судов (БВС) в сельском хозяйстве. В этой сфере в ближайшие годы может быть задействовано до 80-90 % всех гражданских БВС, при этом значительная их часть (30 - 40 %) будет использована для внесения пестицидов и агрохимикатов ([1]).

Приоритетным для такого внесения характеристик являются БВС вертолётного типа, прежде всего мультироторной схемы - мультикоптеры (МК) ([2]). В связи с ростом объемов применения таких БВС наблюдается расширение количества в основном экспериментальных исследований различных аспектов такого применения для разнообразных типов БВС, обрабатываемых культур, рабочих режимов полета, параметров внесения веществ, внешних условий обработок и других факторов.

Анализ исследований в области обработок БВС ([3]) показал, что для них наблюдаются бессистемность, ограниченный характер и во многих случаях противоречивость использованных методов и полученных результатов, в связи с чем одной из важнейших задач для обеспечения внедрения БВС в массовое сельскохозяйственное производство определена необходимость создания и использования средств моделирования процессов и показателей внесения БВС рабочих веществ, прежде всего в части оценки влияния параметров внесения на целевые показатели опрыскивания.

В настоящее время для исследования разных процессов используются методы физического и математического (компьютерного) моделирования.

Использование методов физического моделирования внесения БВС рабочих веществ ввиду его сложного характера, как показывает анализ, ограничивается преимущественно исследованиями отдельных процессов внесения, например, скоростей потока винтов БВС ([4]), работы вращающихся распылителей жидкости в потоке ([5]), распределения капель для реального МК в закрытом пространстве ([6]) и т.д. К сожалению, физическое моделирование достаточно затратно и не позволяет системно описать обработки БВС, однако дает возможность решать узкоспециальные

задачи, результаты которых могут быть использованы в т.ч. и для компьютерного моделирования внесения веществ.

В части компьютерного моделирования авиационного внесения веществ до настоящего времени использовались в основном упрощенные подходы описания индуктивного следа пилотируемых воздушных судов и движения частиц вещества в нем, которые могут быть адаптированы и для БВС ([7]). За рубежом в последние годы в этом направлении был выполнен ряд работ, базирующихся на использовании более мощных и точных специальных сеточных методов решения полной системы уравнений Навье-Стокса для моделирования некоторых элементов внесения БВС рабочих веществ, например, описания поля скоростей МК в их ближнем следе ([8]) и динамики движения облака распыленных с БВС частиц ([9]), которые, однако, не дают возможности полномасштабного моделирования внесения БВС веществ для решения практических задач обеспечения их внедрения в массовое сельскохозяйственное производство

В России, в частности, в НПК «ПАНХ», к настоящему времени сформирован обширный задел по компьютерному моделированию внесения веществ и обработок сельхозугодий с использованием различных видов пилотируемой ([10]) и беспилотной (например, [11]) авиационной техники, который может быть использован для решения актуальных научно-практических задач, в т.ч. в рамках принятой «Стратегии развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года» ([12]).

### **Основная часть**

Имеющийся научно-технический задел в процессе исследований был реализован посредством разработки и практической апробации расчетно-программного комплекса моделирования процессов и показателей внесения БВС вертолетного типа рабочих жидкостей (опрыскивания). Исходными данными комплекса являются характеристики БВС и системы опрыскивания, показатели участка (покрытие, уклоны), внешние условия (параметры атмосферы, включая скорость и направление ветра и стратификацию приземного слоя), свойства рабочих жидкостей (состав, физико-химические параметры компонентов), данные выпуска и диспергирования жидкости и технологические параметры опрыскивания (норма внесения, схема настройки, рабочая скорость и высота полета). Использование комплекса позволяет для принятых параметров выполнить компьютерное моделирование полета БВС и его индуктивного следа, осаждения в нем выпущенного полидисперсного

капельного облака и формирования волны осаждения рабочей жидкости на обрабатываемую поверхность, выполнение обработки участка с определением системы показателей разного уровня, описывающих данные процессы.

Апробация расчетно-программного комплекса на примере ряда отечественных и зарубежных БВС подтвердила приемлемую достоверность, адекватность и точность результатов компьютерного моделирования в сравнении с экспериментальными данными, что позволяет использовать разработанный комплекс для решения широкого перечня научно-практических задач.

Важнейшей научно-практической задачей обеспечения внедрения БВС в сельскохозяйственное производство в настоящее время является формирование регламентов внесения ими препаратов, обеспечивающих эффективное и безопасное проведение авиационных работ (обработок) соответствующих культур.

На сегодняшний день для решения этой задачи выполняются десятки трудоемких и дорогостоящих многовариантных экспериментальных работ по определению в разных условиях влияния на показатели внесения и эффективность обработок различных сочетаний технологических параметров опрыскивания. Разработанный комплекс позволяет оперативно и с меньшими затратами решать такие задачи и расширить границы и глубину соответствующего анализа.

Для оценки влияния параметров и условий обработки БВС на показатели опрыскивания и обработки сельскохозяйственных культур с использованием разработанного комплекса были проведены многовариантные расчеты опрыскивания гексакоптером DJI Agras T20 с полетной массой 42 кг горизонтальных участков водным раствором типовых пестицидов с нормой их внесения 1 л/га при рабочей ширине захвата 6 м при характерном для этого МК варьировании рабочей скорости ( $V_p$ ) и высоты ( $H_p$ ) полета, нормы внесения рабочей жидкости ( $H_{вн}$ ) и степени ее начального диспергирования (медианно-объемный диаметр капель  $D_m$ ) используемыми при этом форсунками типа Tee Jet XR 110 с учетом взаимосвязей их расходных и дисперсных характеристик, условий стратификации приземного слоя атмосферы (параметр Тернера  $P_T$ ) и боковой составляющей ветра ( $W_{2z}$ ) в нем и некоторых других параметров.

Для полученных при компьютерном моделировании данных был проведен корреляционный анализ связей параметров и показателей опрыскивания, некоторые результаты которого (парные коэффициенты

корреляции  $r_{xy}$ ) для указанных выше параметров с отдельными показателями (размах волны осаднения  $Z_{go}$ , степень осаднения выпущенных капель ( $K_k$ ) и объема препарата ( $K_p$ ), средняя дозировка препарата ( $C_{cp}$ ) и плотность покрытия каплями ( $N_{cp}$ ) при сплошной обработке и их коэффициенты вариации ( $K_{vc}$  и  $K_{vp}$ ), расчетная биологическая эффективность внесения рабочей жидкости для обработки гербицидами пшеницы ( $P_{эф}^{гм}$ ) и риса ( $P_{эф}^{гp}$ ), фунгицидом риса ( $P_{эф}^{фp}$ ), а также средняя экономическая эффективность указанной обработки фунгицидом ( $K_{эф}^{фp}$ ) с соответствующими диапазонами изменчивости представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты парной корреляции параметров и расчетных показателей опрыскивания гексакоптером DJI Agras T20

Параметры / показатели	$V_p$ (5–7 м/с)	$H_p$ (3–5 м)	$H_{вн}$ (5 – 20 л/га)	$D_m$ (170-250 мкм)	$P_T$ (0,2–5,8)	$W_{2z}$ (0–2 м/с)
Показатели волны осаднения						
$Z_{go}$ (34 - 48 м)	-0,331	0,170	0,019	-0,263	-0,763	0,636
$K_k$ (9,6 – 34,4 %)	-0,485	-0,301	0,202	0,093	0,223	-0,507
$K_p$ (70,5 – 96,3 %)	-0,083	-0,051	0,160	0,174	0,162	-0,619
Показатели сплошной обработки						
$C_{cp}$ (765-922 мл/га)	0,025	-0,065	0,127	0,282	0,193	-0,578
$N_{cp}$ (7,3 – 86,2 см <sup>2</sup> )	-0,537	-0,060	0,859	-0,429	0,320	-0,328
$K_{vp}$ (8,6 – 98,1 %)	0,835	0,093	-0,293	0,601	0,445	-0,219
$K_{vc}$ (7,8 – 46,2 %)	0,701	0,133	-0,184	0,386	0,382	0,186
Показатели эффективности обработки						
$P_{эф}^{гм}$ (0,2879 – 0,9992)	-0,876	-0,245	0,470	-0,553	0,180	-0,309
$P_{эф}^{гp}$ (0,2467 – 0,9992)	-0,728	-0,137	0,518	-0,491	0,264	-0,496
$P_{эф}^{фp}$ (0,2401 – 0,9901)	-0,611	-0,055	0,620	-0,466	0,321	-0,495
$K_{эф}^{фp}$ (1,238 – 4,803)	-0,575	-0,007	0,474	-0,457	0,240	-0,432

Из таблицы, в частности, можно отметить:

- ни один из параметров внесения не определяет однозначно рассмотренные целевые показатели опрыскивания БВС (в среднем  $|r_{xy}| \approx 0,35$ ), т.е. такие показатели являются многофакторными и обусловлены комплексом параметров;

- рост рабочих скоростей и высот полета МК в рассмотренном диапазоне их вариаций в целом ухудшает качественные показатели сплошной обработки (уменьшение средних и равномерности внесения) и ее эффективности на характерных видах работ ( $r_{xy} < 0$ );

- увеличение норм опрыскивания  $N_{вн}$  до 20 л/га, напротив, благотворно и серьезно сказывается на целевых показателях качества и эффективности обработок, не смотря на некоторое снижение их производительности для больших норм внесения;

- укрупнение выпуска жидкости ( $D_M$ ) для небольших норм внесения МК положительно сказывается на объеме осевших на участок веществ и негативно на плотность капель при падении равномерности внесения, что отрицательно влияет на эффективность обработок;

- рост параметра  $P_T$  (устойчивости приземного слоя) благоприятно сказывается на степени осадения капель и объемов препарата при некотором ухудшении равномерности их внесения и в целом повышает расчетную эффективность рассмотренных видов обработок БВС;

- усиление бокового ветра  $W_{2Z}$  приводит к росту поперечного размаха волны осадения жидкостей с БВС при перераспределении параметров ее эпюры и в конечном итоге отрицательно влияет на эффективность обработок, что требует использования ограничений по этому параметру.

Характеризуя многофакторность процессов и показателей авиационного внесения веществ БВС для полученного при моделировании массива данных дополнительно был выполнен его регрессионный анализ для принятых выше факторов с построением множественных степенных регрессий вида  $Y_i = A_i \prod_{j=1}^{j=n} X_j^{B_{ij}}$ .

Параметры  $A_i$  и  $B_{ij}$  некоторых выявленных при этом регрессий оценки показателей опрыскивания гексакоптером DJI Agras T20 и их статистической значимости (коэффициент детерминации  $R^2$  и критерий Фишера  $F_{6/15}$ ) для примера показаны в табл. 2, где фактор  $W_{2Z}$  с учетом физической природы процесса заменен на комбинацию  $1+|W_{2Z}|$ .

Таблица 2

Параметры множественных степенных регрессий оценки отдельные показатели опрыскивания гексакоптером DJI Agras T20

Показатель $Y_i$	$A_i$	Факторы $X_j$						$R^2/F_{6/15}$
		Vp	Hp	Hвн	Дм	Pт	1+ W <sub>z</sub> z	
Zgo, м	39,36	-0,405	0,210	-0,004	0,081	-0,045	0,166	0,892 / 20,68
Kk, %	0,59	-2,550	-0,117	-0,016	1,508	0,039	-0,769	0,910 / 25,18
Ncp, см <sup>-2</sup>	4025,90	-2,419	-0,008	0,964	-0,555	0,066	-0,693	0,955 / 52,59
Kvn, %	0,0017	3,416	-0,607	-0,149	0,937	0,492	0,054	0,914 / 26,68
$P_{эф}^{фр}$	20,30	-1,996	-0,011	0,527	-0,240	0,031	-0,880	0,929 / 32,68
$K_{эф}^{фр}$	114,58	-1,963	-0,025	0,439	-0,238	0,029	-0,881	0,915 / 26,92

Из представленных данных можно отметить высокую статистическую значимость полученных многопараметрических регрессий ( $F_{6/15} \gg F_{табл}=2,79$  для значимости 0,05), которые для 6 характерных параметров описывают примерно 90 % изменчивости оцениваемых показателей и могут быть использованы для решения практических задач, например, выбора параметров и ограничений обработок с применением БВС. Значения степеней выявленных регрессий не противоречат сделанным ранее выводам о качественном влиянии отдельных параметров опрыскивания на его целевые показатели, при этом данные выражения позволяют уточнить количественные аспекты такого влияния.

В частности, увеличение в сопоставимых условиях рабочей скорости на 1 м/с с целью повышения производительности и снижения себестоимости обработок МК примерно на 5 % приводит к падению уровня осаждения капель фунгицида и его неравномерности, что в комплексе более чем на 25 % уменьшает ожидаемую биологическую и экономическую эффективность обработки, т.е. локальный рост производительности может вызвать ухудшение целевых показателей обработки.

В свою очередь, повышение нормы внесения, например, с 10 до 20 л/га, уменьшает производительность на ~30 %, однако существенное улучшение при этом качественных показателей внесения и распределения фунгицида определяет в конечном итоге рост расчетной эффективности такой обработки на 35 %, который, впрочем, может быть уменьшен примерно на 5 % использованием для обеспечения большего выпуска форсунок следующей ступени принятого типоразмерного ряда (рост Дм на 30 мкм).

Эти обстоятельства определяют высокую значимость выбора системы технологических параметров внесения при формировании регламента применения препаратов для соответствующих обработок. Примечательно также, что время выполнения обработок с рациональными параметрами внесения оказывает существенное влияние на их эффективность, например, эффективность дневных обработок риса фунгицидом (сильная неустойчивость атмосферы при  $P_T = 0,2$ ) может быть ниже утренней и вечерней (нейтральная стратификация,  $P_T \approx 2,5$ ) примерно на 7 %, а ночных (сильная устойчивость) - наоборот выше их на 2 %.

### **Выводы**

Полученные с использованием результатов компьютерного моделирования защитного опрыскивания характерного МК общие и частные качественные и количественные соотношения между параметрами и целевыми показателями внесения и обработок совместно с выделенными при этом коэффициентами корреляции и множественных степенных регрессий позволяют более объективно формировать базовые регламенты авиационного применения пестицидов с использованием разных типоразмеров БВС вертолетного типа и выполнять их корректировку в зависимости от условий выполнения различных защитных обработок в сельскохозяйственном производстве.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Del Cerro J, Cruz Ulloa C, Barrientos A, et al.* Unmanned aerial vehicles in agriculture: A survey. *Agronomy*. 2021; 11(2): 203. DOI: 10.3390/agronomy11020203.
2. *Chen H B, Lan Y B, Fritz B K, Hoffmann W C, Liu S B.* Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV). *Int J Agric & Biol Eng*, 2021; 14(1): 38–49. DOI: 10.25165/j.ijabe.20211401.5714
3. State of the Knowledge Literature Review on Unmanned Aerial Spray Systems in Agri-culture. OECD Working Party on Pesticides (WPP), OECD Drone Sub-Group Bonds Consulting Group LLC, Australian Pesticides and Veterinary Medicines Authority. June 2021. - 34.
4. *Liu X, Zhang W, Fu H B, Fu X M, Qi L Q.* Distribution regularity of downwash airflow under rotors of agricultural UAV for plant protection. *Int J Agric & Biol Eng*, 2021;14(3):46–57. DOI:10.25165/j.ijabe.20211403.4036.
5. *Zhu H, Jiang Y, Li H Z, Li J X, Zhang H H.* Effects of application parameters on spray characteristics of multi-rotor UAV. *Int J Precis Agric Aviat*, 2019; 2(1): 18–25. DOI: 10.33440/j.ijpaa.20190201.0025



6. Hanif AS, Han X, Yu S-H, Han C, Baek SW, Lee C-G, Lee D-Hand Kang YH (2023) Modeling of the control logic of a UASS based on coefficient of variation spraying distribution analysis in an indoor flight simulator. *Front. Plant Sci.* 14:1235548. DOI: 10.3389/fpls.2023.1235548

7. Teske M.E., D.A. Wachspress, Thistle H.W. Prediction of Aerial Spray Release from UAVs. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2018, Vol. 61(3): 909-918. <https://doi.org/10.13031/trans.12701>

8. Zhang H Y, Lan Y B, Shen N W, Wu J Y, Wang T, Han J, Wen S. Numerical analysis of downwash flow field from quad-rotor unmanned aerial vehicles. *Int J Precis Agric Aviat*, 2020; 3(4): 1–7. DOI: 10.33440/j.ijpaa.20200304.138

9. Zhang R R, Chen L P, Wen Y, Tang Q, Li L L. Key technologies for testing and analyzing aerial spray deposition and drift: A comprehensive review. *Int J Precis Agric Aviat*, 2020; 3(2): 13–27. DOI: 10.33440/j.ijpaa.20200302.80

10. Асовский В.П. Теория и практика авиационного распределения веществ. - М.: Воздушный транспорт, 2008. - 580 с.

11. Асовский В.П., Кузьменко А.С. Особенности опрыскивания с использованием беспилотных воздушных судов вертолетного типа // Защита и карантин растений. 2019. № 5. С. 40-44.

12. Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года, утв. Распоряжением Правительства РФ от 21 июня 2023 г. № 1630-р.

**Асовский Валерий Павлович**, доктор технических наук, ученый секретарь НПК «ПАНХ», Россия, город Краснодар, ул. Кирова 138, 350000, e-mail: [vasov63@mail.ru](mailto:vasov63@mail.ru).

**Кузьменко Алла Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры летательных аппаратов Южного федерального университета, 347900 Россия, город Таганрог, переулок Тургеневский, 44, e-mail: [akuzm@sfedu.ru](mailto:akuzm@sfedu.ru).

**Asovsky Valery Pavlovich**, Doctor of Technical Sciences, scientific secretary of NPK «PANH», 350000, Russia, Krasnodar, 138 Kirova Str., e-mail: [vasov63@mail.ru](mailto:vasov63@mail.ru).

**Kuzmenko Alla Sergeevna**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor of the Department of Aircraft of Radio Engineering Southern Federal University, 347900, Russia, Taganrog, trans. Turgenevsky, 44, e-mail: [akuzm@sfedu.ru](mailto:akuzm@sfedu.ru).