

EDN: FNNREO

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-63-74



Научная статья

УДК 631.171



Численное моделирование защитного опрыскивания беспилотными воздушными судами вертолетного типа

Валерий Павлович Асовский¹,
доктор технических наук, ученый секретарь,
e-mail: asovsky@panh.ru;

Алла Сергеевна Кузьменко²,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: all7212@mail.ru

¹Научно-производственная компания «ПАНХ», г. Краснодар, Российская Федерация;

²Южный федеральный университет, г. Таганрог, Российская Федерация

Реферат. Показали общие перспективы использования беспилотных воздушных судов для внесения пестицидов и агрохимикатов. Отметили актуальные проблемы внедрения таких воздушных судов, в том числе создание и использование средств адекватного моделирования процессов и показателей внесения препаратов мультикоптерами, а также особенности выполненных исследований в этой области. (*Цель исследований*) Разработать и апробировать прикладные программные средства численного моделирования процессов и показателей защитного опрыскивания мультикоптерами сельскохозяйственных объектов. (*Материалы и методы*) Использовали научно-техническую информацию, экспериментальные данные, методы системного анализа, прикладной статистики, математического моделирования физических объектов и процессов, решения дифференциальных и интегральных уравнений для описания процессов с применением отработанных ранее методических подходов к изучению авиационного распределения веществ. (*Результаты и обсуждение*) Разработан расчетно-программный комплекс моделирования процессов и показателей опрыскивания мультикоптерами, представлена его укрупненная функциональная блок-схема. Показали особенности реализации основных блоков и модулей комплекса по моделированию индуктивного следа мультикоптера, осаждению капель, показателей внесения рабочих жидкостей и сплошной обработки участков. Подтвердили адекватность, достоверность и приемлемую точность результатов моделирования в сравнении с экспериментальными данными. Представили данные корреляционного и множественного регрессионного анализа полученного массива результатов многовариантного численного моделирования защитного опрыскивания на примере гексакоптера *DJI Agras T20*. (*Выводы*) Подтвердили работоспособность и возможность использования разработанного и апробированного расчетно-программного комплекса численного моделирования защитного опрыскивания для решения научно-практических задач, связанных с внедрением мультикоптеров в агропроизводство. Определили качественные и количественные соотношения между отдельными параметрами и целевыми показателями защитного опрыскивания с мультикоптеров, а также значимые многопараметрические степенные регрессии для оценки целевых показателей опрыскивания.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, сельскохозяйственное производство, защитное опрыскивание, моделирование процессов, норма внесения, качество внесения, эффективность обработки.

■ **Для цитирования:** Асовский В.П., Кузьменко А.С. Численное моделирование защитного опрыскивания беспилотными воздушными судами вертолетного типа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №3. С. 63-74. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-63-74. EDN: FNNREO.

Scientific article

Numerical Simulation of Protective Spraying by Helicopter-Type Unmanned Aerial Vehicles

Valery P. Asovsky¹,
Dr.Sc.(Eng.), scientific secretary,
e-mail: asovsky@panh.ru;

Alla S. Kuzmenko²,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: all7212@mail.ru

¹PANH Helicopters, Krasnodar, Russian Federation;

²Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation

Abstract. The paper outlines the potential applications of unmanned aerial vehicles for the delivery of pesticides and agrochemicals. It addresses key challenges in implementing UAV technology, particularly the development and use of accurate modeling tools for

predicting application processes and indicators. Additionally, the paper discusses the unique aspects of research conducted in this field. (*Research purpose*) The study aims to develop and test application software for numerical modeling of the processes and indicators involved in protective spraying of agricultural targets using multicopters. (*Materials and methods*) The paper integrates scientific and technical information, experimental data, system analysis methods, applied statistics, mathematical modeling of physical objects and processes, and solutions to differential and integral equations. These tools are used to describe the processes, building on previously developed methodological approaches for studying the aerial distribution of substances. (*Results and discussion*) A software package for modeling the processes and parameters of spraying by multicopters has been developed, with its detailed functional block diagram provided. The paper illustrates the implementation features of the system's main blocks and modules, including modeling the inductive wave of a multicopter, droplet deposition, working fluid application indicators and full-area coverage. The adequacy, reliability, and acceptable accuracy of the modeling results are validated through comparison with experimental data. The paper presents the results of correlation and multiple regression analyses obtained through multivariate numerical modeling, using the *DJI Agras T20* hexacopter as an example for protective spraying. (*Conclusions*) The paper confirms the functionality and potential of the developed and tested computational and software system for numerical modeling of protective spraying. This system is designed to address both scientific and practical challenges related to the implementation of multicopters in agricultural production. The study identifies qualitative and quantitative relationships between individual parameters and target indicators of protective spraying from multicopters. Additionally, significant multi-parameter power regressions are determined for assessing the target indicators of spraying.

Keywords: unmanned aerial vehicle, agricultural production, protective spraying, process modeling, application rate, application quality, processing efficiency.

For citation: Asovsky V.P., Kuzmenko A.S. Numerical simulation of protective spraying by helicopter-type unmanned aerial vehicles. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N3. 63-74 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-63-74. EDN: FNNREO.

Одним из наиболее перспективных направлений развития гражданских беспилотных систем и технологий во всем мире считается использование беспилотных воздушных судов (БВС) в отраслях агропромышленного комплекса. В этой сфере в ближайшие годы может быть задействовано до 80-90% всех коммерческих БВС, из них 30-40% для внесения пестицидов и агрохимикатов [1].

Приоритетными для целей защитного опрыскивания в силу особенностей летно-технических и функциональных характеристик являются беспилотные системы вертолетного типа, прежде всего мультироторной схемы – мультикоптеры (МК) [2]. В настоящее время расширяются масштабы преимущественно экспериментальных исследований аспектов применения разнообразных типов БВС, обрабатываемых культур, рабочих режимов полета, параметров внесения веществ, внешних условий обработки агрохимикатами и других факторов.

Анализ многочисленных исследований по вопросам обработки агрообъектов с помощью БВС показал в значительной степени бессистемность, ограниченный характер и во многих случаях противоречивость использованных методов и полученных результатов [3]. В связи с этим одной из важнейших задач для внедрения БВС в массовое сельскохозяйственное производство определена необходимость создания средств адекватного моделирования процессов и показателей внесения пестицидов и агрохимикатов, учитывающих множество значимых факторов.

Основными для исследования различных процессов являются методы физического и численного (математического) моделирования. Использование методов физического моделирования внесения БВС рабочих веществ ввиду его сложного многофакторного характера, как показывает анализ, ограничивается преимущественно изучением отдельных элементов или процессов внесения: например, скоростей потока винтов БВС [4], работы вращающихся распылителей жидкости в потоке [5], распределения капель для реального мультикоптера в закрытом пространстве [6] и т.д. К сожалению, физическое моделирование достаточно затратно и не позволяет системно описать процесс обработки беспилотными воздушными судами, однако дает возможность решать узкоспециальные задачи, результаты которых могут использоваться, в том числе для численного моделирования внесения веществ.

В части математического моделирования до настоящего времени практиковались в основном упрощенные подходы описания индуктивного следа пилотируемых воздушных судов и движения в нем частиц вещества, которые могут быть адаптированы и для БВС [7]. Вместе с тем в последние годы за рубежом выполнен ряд работ, базирующихся на более мощных и точных специальных сеточных методах решения полной системы уравнений Навье-Стокса для моделирования некоторых элементов внесения рабочих веществ, например, описания поля скоростей мультикоптера в ближ-

нем следе [8] и динамики движения облака распыленных с БВС частиц [9]. Однако такие подходы ввиду сложности и трудоемкости ограничивают возможности полномасштабного моделирования внесения веществ в процессе практической обработки регламентов авиационного применения пестицидов и агрохимикатов в отношении БВС.

В России, в частности НПК «ПАНХ» (АО НПК «Применение авиации в народном хозяйстве»), сформирован значительный задел по математическому моделированию внесения веществ и обработок сельскохозяйственных угодий с использованием различных видов пилотируемой (изложены, в частности, в монографии В.П. Асовского «Теория и практика авиационного распределения веществ». М.: Воздушный транспорт. 2008. 580 с.) и беспилотной, например, авиационной, техники [10]. Данные наработки можно использовать для решения актуальных научно-практических задач, в том числе в рамках принятой «Стратегии развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года» (принята Распоряжением Правительства РФ от 21 июня 2023 г. № 1630-р).

Цель исследований – разработать и апробировать прикладные программные средства численного моделирования процессов и показателей защит-

ного опрыскивания мультикоптерами в сельскохозяйственном производстве.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Исследования проводились на базе имеющейся научно-технической информации и полученных экспериментальных данных с использованием методов системного анализа, прикладной статистики, математического моделирования физических объектов и процессов, численных методов решения дифференциальных и интегральных уравнений описания процессов с применением отработанных ранее методических подходов описания авиационного распределения веществ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для решения специальных научно-практических задач в среде программирования *DELPHI* сформирован и апробирован универсальный расчетно-программный комплекс моделирования процессов и показателей внесения рабочих жидкостей (опрыскивания) с применением БВС вертолетного типа, включая МК (рис. 1).

Блок ввода исходных данных комплекса обеспечивает ввод значимых параметров задачи и проведение предварительных расчетов вспомогательных показателей, необходимых для моделирования внесения БВС (МК) рабочих веществ в ожидаемых условиях обработок на базе сформированной в исследованиях системы математических моделей.



Рис. 1. Общая функциональная блок-схема программного комплекса моделирования внесения мультикоптерами рабочих жидкостей

Fig. 1. General functional block diagram of the software package for simulating the application of working fluids by multicopters

К исходным данным программного комплекса относятся:

- основные летно-технические характеристики рассматриваемого БВС (массовые, геометрические, аэродинамические, количество и параметры несущих винтов (НВ), эксплуатационные ограничения и т.д.);
- принятые с учетом ограничений параметры полета БВС (полетная масса, скорость и высота полета) в процессе опрыскивания;
- внешние условия выполнения обработок (температура T_H , давление P_H и влажность B наружного воздуха, направление и скорость ветра, уклон Ag и характер растительности обрабатываемой поверхности, параметры приземного слоя атмосферы и т.д.);
- показатели (свойства) вносимой рабочей жидкости (состав, физико-химические свойства компонентов и др.);
- параметры выпуска жидкости при обработке (количество, положение, ориентация и типоразмер распылителей (форсунок), секундный выпуск жидкости и т.д.).

Блок моделирования осаждения капель рабочей жидкости программного комплекса (рис. 1) оперирует введенными исходными данными и предусматривает реализацию вспомогательных и основных расчетных модулей.

Вспомогательные модули предназначены для обеспечения функционирования общих и итерационных процедур основных модулей. В частности, модуль аэродинамических расчетов определяет ориентацию и специальные показатели БВС при выполнении полета с заданными параметрами (крен, тангаж, рыскание, координаты несущих винтов и форсунок, начальная циркуляция связанных вихрей и др.), влияющих на конфигурацию и интенсивность вихревого следа. При этом модуль оценки локальных возмущений потока от элементов конструкции позволяет учесть данные эффекты на начальном этапе формирования вихревого следа и движения выпущенных капель.

Определяющим для моделирования движения выпущенных с БВС частиц (капель) является модуль формирования вихревого следа. Показатели этого модуля с использованием известных расчетных процедур оценки индуктивных скоростей интегрированием по элементарным отрезкам системы вихрей следа определенной конфигурации на базе формулы Био-Савара позволяют однозначно описать поле индуктивных скоростей. Модуль построен с применением метода дискретных вихрей, который при построении дальнего вихревого следа требует в 10^3 - 10^4 меньше вычислительных ресурсов в сравнении с отмеченным ранее сеточным методом (по данным А.С.Гиневского, А.И. Желаннико-

ва А.И. «Вихревые следы самолетов». М.: Физматлит, 2008. 170 с.). В нем реализована итерационная процедура оценки координат распространения свободных вихрей, связанных с параметрами несущих винтов (НВ) мультикоптера П-образных вихревых комбинаций, в которой учитываются влияние ветра и потоков в приземном слое, локальные возмущения конструкции БВС, взаимная индукция вихрей и экранный эффект подстилающей поверхности.

Для примера моделирования вихревого следа БВС на рисунке 2 показана его расчетная конфигурация (скриншот, вид спереди) для полета гексакоптера *DJI Agras T20* с полетной массой 42 кг на высоте 5 м со скоростью 5 м/с в типовых для утренних обработок условиях ($T_H = 20^\circ\text{C}$, $B = 80\%$, $P_H = 760$ мм рт. ст.) при слабой неустойчивости атмосферы и безветрии соответственно для горизонтальной поверхности ($Ag = 0$) и склона при $Ag = 15^\circ$.

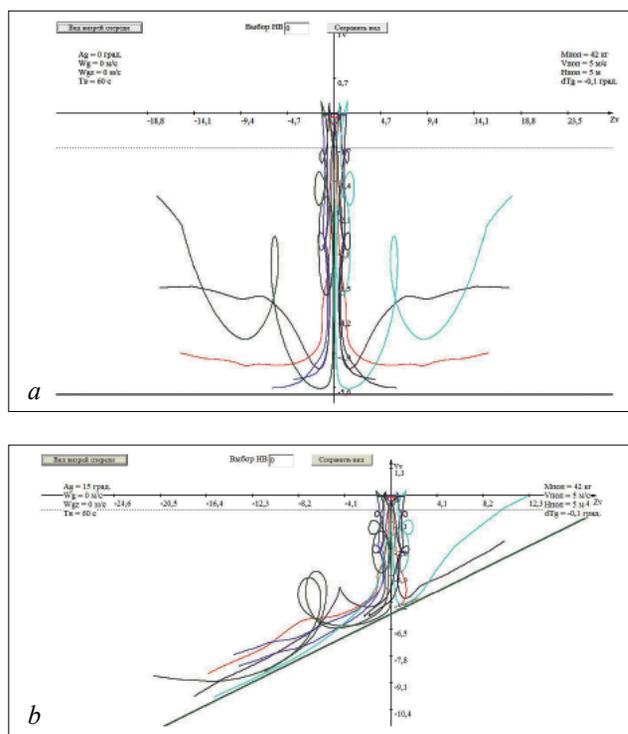


Рис. 2. Расчетная конфигурация вихревого следа гексакоптера *DJI Agras T20* при полете на скорости 5 м/с и высоте 5 м в условиях слабой неустойчивости атмосферы (безветрие): а – над горизонтальной поверхностью; б – вдоль склона 15°

Fig. 2. Calculated vortex wake configuration of the *DJI Agras T20* hexacopter during flight at a speed of 5 m/s and an altitude of 5 m under conditions of slight atmospheric instability (windlessness): a – above the horizontal surface; b – along a 15° slope

Расчеты вихревого следа МК показали высокую чувствительность его конфигурации и параметров к указанным исходным данным БВС, режиму и внешним условиям полета, особенно связанных с асим-

метричностью следа параметрам бокового ветра и поперечного склона, что оказывает значительное влияние на поле индуктивных скоростей в следе БВС и показатели движения (внесения) частиц в нем.

Работу модуля определения поля скоростей в следе БВС иллюстрирует *рисунок 3*. На нем представлены расчетная векторная диаграмма индуктивных скоростей в поперечной плоскости в 2 м за легким агрокоптером при полете над горизонтальной поверхностью на высоте 2 м при скорости 4 м/с и безветрии, а также и его экспериментальная визуализация.

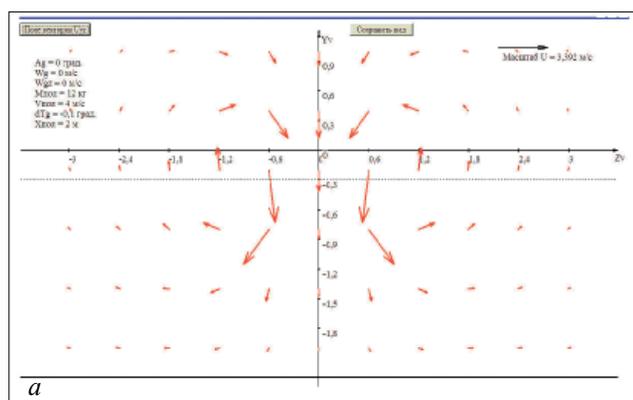


Рис. 3. Расчетное поле индуктивных скоростей (а) и его визуализация (б) для агрокоптера при полете над горизонтальной поверхностью на высоте 2 м при скорости 4 м/с и безветрии

Fig. 3. Calculated induced velocity field (a) and its visualization (b) for an agrocopter during flight above a horizontal surface at a altitude of 2 m at a speed of 4 m/s, in calm windless conditions

Как видно из этого рисунка, расчетные и экспериментальные данные поля индуктивных скоростей в следе МК для типового режима внесения веществ качественно идентичны и примечательны наличием двух мощных центров вращения воздушной среды, что характерно для известных видов летательных аппаратов с аэродинамическим принципом обеспечения полета. Такая особенность следа

за пролетающим воздушным судном, в том числе МК, при полетах на малых высотах (вблизи экрана) связана с формированием в зоне осаждения веществ расходящихся от линии пролета преимущественно горизонтальных потоков воздуха, которые определяют присущую авиационному способу внесения веществ ширину захвата, во много раз превышающую поперечные габариты воздушного судна, что физически не достижимо для традиционной наземной техники.

Сравнительные расчеты с использованием комплекса для имеющихся экспериментальных и расчетных на базе сеточных методов данных, например [8], подтвердили качественную и количественную общность соответствующих показателей, в частности по распределению в пространстве и величинам векторов индуктивных скоростей в следе тестовых МК. Расчеты показывают, что в следе наиболее распространенных средних и тяжелых МК на режимах опрыскивания локальные скорости в следе могут достигать 10-15 м/с, что, несмотря на меньшие масштабы БВС, сопоставимо с показателями тяжелых пилотируемых самолетов и вертолетов.

Известное поле скоростей в зоне полета БВС совместно с начальными параметрами выпуска капель позволяют в рамках комплекса сформировать систему дифференциальных уравнений изменения значимых показателей капель в процессе осаждения. Совместное решение этой системы в рамках пошаговых итерационных процедур с учетом начальных и конечных условий, а также принятых физических и расчетных ограничений дает возможность получить в соответствующем модуле численные данные показателей движения заданной капли с момента ее выпуска до осаждения или прекращения расчетов, например при полном испарении. К основным показателям движения рассмотренной капли во временном разрезе относятся ее базовые координаты в земной системе координат и накопленные в процессе движения среднеквадратические отклонения от базовой траектории по соответствующим осям, мгновенные скорости частицы и ее вращения, текущие диаметр капли с учетом испарения и дробления и объем компонентов в ней.

Для примера моделирования движения частиц в следе БВС показаны расчетные базовые траектории движения капель 10%-го водного раствора «среднего» пестицида с начальным диаметром 200 мкм, выпущенных из ориентированной вниз поперек потока задней внешней щелевой форсунки с расчетным углом раскрытия факела 120° (давление 0,3 МПа) гексакоптера *DJI Agras T20* с полетной массой 42 кг при опрыскивании в указанных выше типовых условиях на скорости 5 м/с и рабо-

чей высоте 5 м (рис. 4а) и 3 м (боковой ветер 2 м/с (рис. 4б) горизонтальной растительной поверхности при слабой неустойчивости атмосферы.

Из рисунка 4 можно отметить серьезные отличия характера движения капель при изменении лишь двух параметров (высота полета, ветер) при неизменных прочих условиях, что также указывает на высокую чувствительность показателей движения выпущенных микрооптером капель рабочей жидкости к выделенным ранее параметрам. Примечательно, что, как показывают расчеты, при опрыскивании с использованием БВС крупные капли с начальным диаметром более 300 мкм движут-

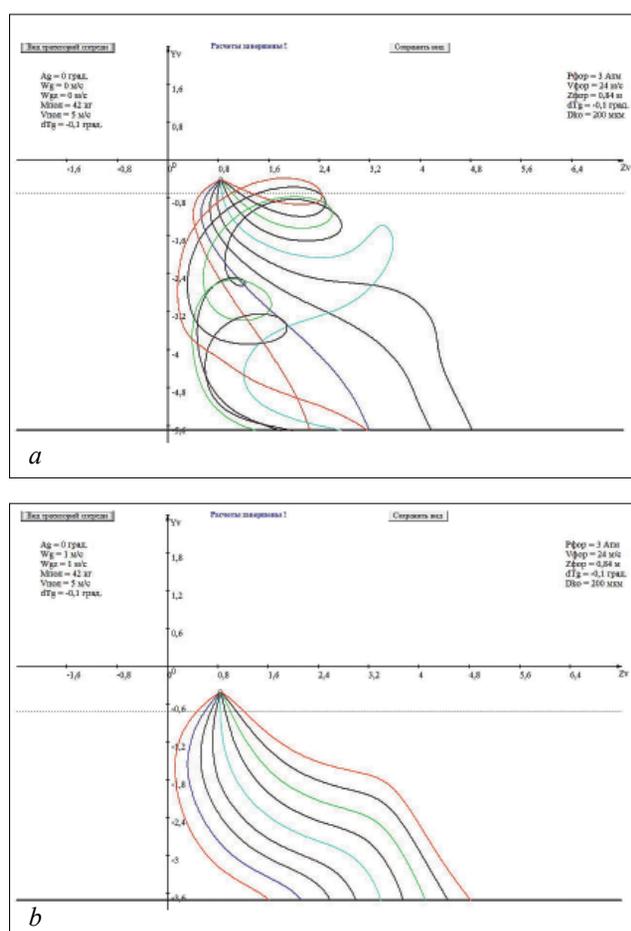


Рис. 4. Расчетные траектории движения капель водного раствора пестицида с начальным диаметром 200 мкм, выпущенных из задней внешней целевой форсунки гексакоптера DJI Agras T20 при полете в типовых условиях на скорости: а – 5 м/с и рабочей высоте 5 м (безветрие); б – 3 м (боковой ветер 1 м/с) над горизонтальной растительной поверхностью

Fig. 4. Calculated trajectories of pesticide water solution droplets with an initial diameter of 200 μm , released from the rear external slit nozzle of the DJI Agras T20 hexacopter during flight under typical conditions: a – at a speed of 5 m/s and an operating altitude of 5 m (windlessness); b – at a speed of 3 m (side wind of 1 m/s) above a horizontal plant surface

ся преимущественно по массово-инерционному механизму с минимальными изменениями размеров и состава, времени осаждения и смещения от линии пролета. В то же время для более мелких капель преобладают уже аэродинамические воздействия, особенно при размерах до 100 мкм, с нелинейным ростом длительности осаждения, потерь из-за испарения и сноса капель и возможного размаха волны осаждения рабочей жидкости.

Необходимая схема вариантов расчетов показателей движения (по дисперсности капель, параметрам задействованных форсунок, учету отдельных процессов и т.д.) в блоке моделирования уточняется при реализации соответствующего модуля (см. рис. 1), который позволяет для заданного режима полета МК проводить дополнительный анализ и выбор технологических параметров опрыскивания (норма внесения, исходная концентрация препаратов, типоразмер форсунок и т.д.).

Конечные результаты моделирования показателей движения частиц для заданного режима (координаты осаждения на обрабатываемую поверхность и параметры осевших капель) являются входной информацией для блока моделирования внесения веществ.

В рамках начальных модулей этого блока осуществляется первичный анализ совокупности полученных расчетных данных и их аппроксимация полиномами 3-5 порядка для упрощения и ускорения дальнейших процедур моделирования, а также уточнение на этой базе параметров учетного полигона внесения по размаху, количеству, шагу и размерам учетных площадок на нем.

Модуль оценки показателей волны осаждения жидкости на базе сформированных аппроксимационных выражений с учетом решаемой задачи реализует многоуровневые процедуры перебора выпущенной в полете БВС рабочей жидкости по задействованным форсункам, начальному спектру диспергирования капель и параметрам их выпуска с оценкой попадания соответствующих капель на учетные площадки полигона с последующим суммированием и выделением на них количества, размеров, объема рабочей жидкости и ее компонентов для осевших капель, что обеспечивает построение соответствующих эпюр волны осаждения по ее размаху.

На рисунке 5 для примера реализации этого модуля показаны расчетные величины счетного (а) и объемного (б) распределения (по форсункам и в целом) на горизонтальном участке при внесении рабочей жидкости (водный 10%-ный раствор пестицида) с нормой 10 л/га для расчетной ширины захвата 6 м гексакоптером DJI Agras T20 (четыре задние форсунки Tee Jet XR 110-01) на скорости 5 м/с и высоте 5 м в отмеченных ранее характерных условиях (штиль).

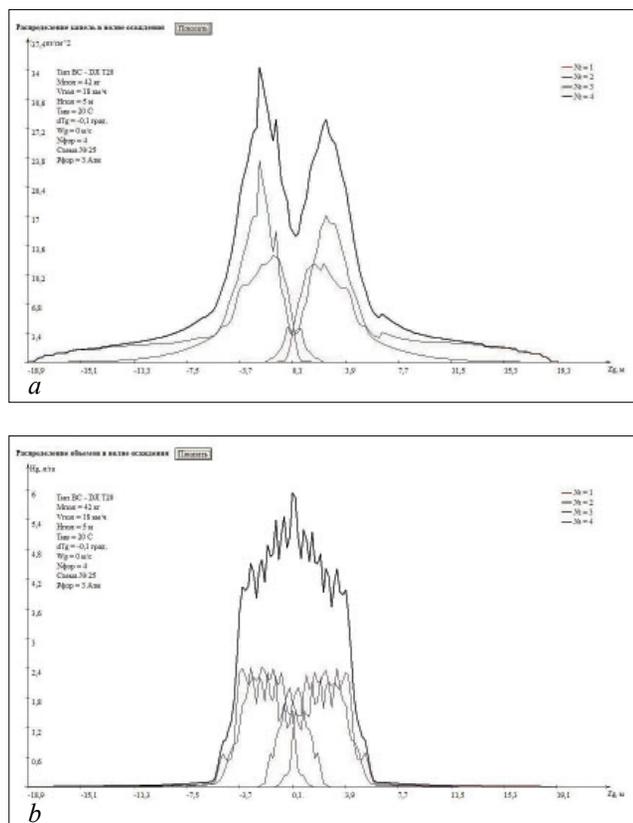


Рис. 5. Расчетное счетное (а) и объемное (б) распределение рабочей жидкости при ее внесении с нормой 10 л/га гексакоптером DJI Agras T20

Fig. 5. Calculated numerical (a) and volumetric (b) distribution of the working fluid when applied at a rate of 10 l/ha by the DJI Agras T20 hexacopter

Оценка адекватности и достоверности результатов моделирования проводилась сравнением расчетных и экспериментальных данных. На *рисунке 6* приведены показатели плотности покрытия каплями в волне осаждения рассмотренного выше расчетного варианта опрыскивания (*рис. 5а*) и полученные в эксперименте в сопоставимых внешних условиях данные замеров по бумажным (БК, 3 повторности) и стеклянным (СК) учетным коллекторам.

Можно отметить близость качественных и количественных показателей экспериментальных и расчетных данных (наличие и положение на эпюре локальных экстремумов – «пиков» и «впадин», уровень плотности каплей и т.д.). Выполненный с использованием критериев согласия Фишера (F) и Пирсона (χ^2) анализ соответствия этих показателей подтвердил случайный характер отличий между ними:

$$F_{1/18} = 152,70 - 188,65 > F_{\text{табл}} = 4,42$$

$$\text{и } \chi^2_{19} = 22,51 - 28,21 < \chi^2_{\text{табл}} = 30,14$$

для уровня значимости 0,05 при коэффициенте детерминации около 90%. Это позволяет считать адекватным и достоверным модельное описание

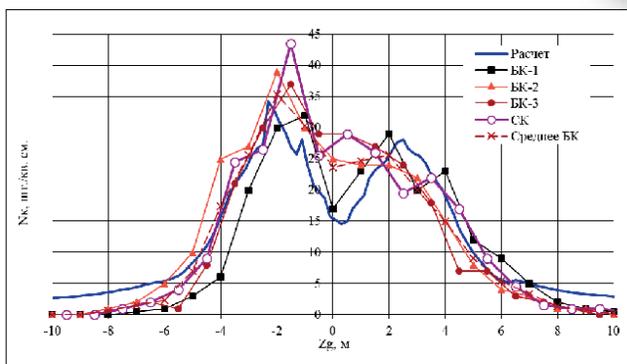


Рис. 6. Расчетное и экспериментальное распределение плотности покрытия каплями при опрыскивании гексакоптером DJI Agras T20 горизонтального участка с нормой 10 л/га при скорости 5 м/с и высоте 5 м при слабой неустойчивости атмосферы и безветрии

Fig. 6. Calculated and experimental distribution of droplet coverage density during spraying by the DJI Agras T20 hexacopter over a horizontal area at a rate of 10 l/ha, at a speed of 5 m/s and an altitude of 5 m under conditions of slight atmospheric instability and windlessness

процесса внесения жидкости. В отношении адекватности программного комплекса следует отметить, что ввиду стохастического характера осаждения каплей при авиационном опрыскивании даже полученные одновременно различные экспериментальные данные, например, распределения плотности покрытия каплями (*рис. 6*), отличаются разбросом своих значений. При этом степень корреляции экспериментальных распределений между собой примерно соответствует отмеченному выше уровню для экспериментальных и расчетных показателей.

Моделирование сплошной обработки участка реализовано в программном комплексе последовательным наложением полученных ранее волн осаждения для соответствующей расчетной рабочей ширины захвата (перехода) Z_p с последующим анализом интегральных показателей по участку и выделением значимых показателей внесения жидкости и качества проведенной БВС обработки. Для примера реализации этих модулей рассмотренного выше варианта опрыскивания показаны модельные зависимости от перехода Z_p средних по обработанному участку плотности каплей и нормы внесения рабочей жидкости (*рис. 7а*) и коэффициентов вариации (неравномерности) этих показателей (*рис. 7б*) для экспериментальных и расчетных данных.

Как видно из этих графиков, зависимости экспериментальных и расчетных средних и коэффициентов неравномерности показателей внесения рабочей жидкости идентичны и качественно не отличаются от аналогичных зависимостей для других видов авиационной техники. Примечательно,

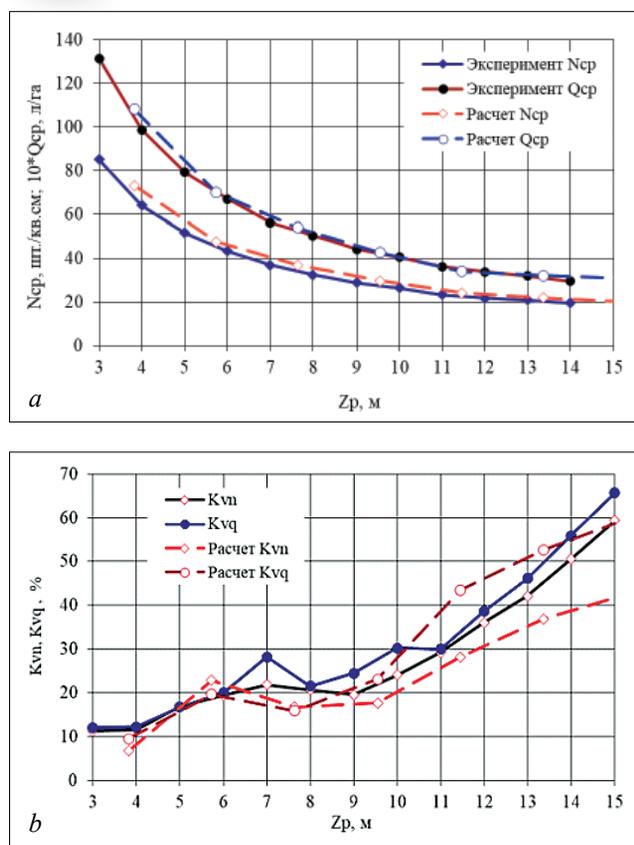


Рис. 7. Модельные зависимости средних плотностей капель и нормы внесения рабочей жидкости (а) и их коэффициентов вариации (б) от рабочей ширины захвата для экспериментальных и расчетных данных опрыскивания гексакоптером DJI Agras T20

Fig. 7. Model dependences of average droplet densities and working fluid application rates (a) and their coefficients of variation (b) on the working width for experimental and calculated data of spraying by the DJI Agras T20 hexacopter

что для перехода 6 м отличия средних величин плотности капель N_{cp} , нормы внесения Q_{cp} и коэффициентов вариации этих показателей K_{vn} и K_{vq} для расчетов и экспериментов не превышают 3%. То есть, моделирование внесения МК рабочих жидкостей с использованием сформированного программного комплекса обеспечивает приемлемую адекватность и точность определения основных интегральных показателей такого внесения и может использоваться для оценки обработки сельскохозяйственных угодий по биологической эффективности $P_{эф}$ и ожидаемой экономической эффективности $K_{эф}$. Под биологической эффективностью подразумевается интегральная вероятность превышения по участку показателей внесения над требуемыми для достижения необходимого воздействия препарата на целевые объекты с учетом случайного характера процесса. Экономическая эффективность обработки – отношение стоимости прибавки урожая к полным затратам на ее проведение.

На сегодняшний день для уточнения рациональных режимов (регламентов) БВС обработок сельскохозяйственных культур пестицидами во всем мире выполняются десятки многовариантных экспериментальных работ по определению в разных условиях влияния на показатели внесения и эффективность таких значимых параметров, как скорость и высота опрыскивания [11], норма внесения [12], тип форсунок (дисперсность распыла) и рабочая скорость [13], скорость полета и норма внесения [14] и других сочетаний. Разработанный расчетно-программный комплекс с учетом реализованного в нем функционала позволяет оперативно и с меньшими затратами проводить такие оценки и существенно расширить диапазон соответствующего анализа, в частности, для решения таких актуальных научно-практических задач, как выбор рациональных параметров защитного опрыскивания [15] и комплексная оценка показателей сноса рабочей жидкости (препаратов) за пределы обрабатываемого участка [16].

В процессе исследований для оценки влияния параметров и условий обработки БВС на показатели внесения рабочих жидкостей и обработки сельскохозяйственных культур с использованием разработанного программного комплекса проведены многовариантные расчеты опрыскивания гексакоптером DJI Agras T20 горизонтальных участков водным раствором типовых пестицидов с нормой их внесения 1 л/га при рабочей ширине захвата 6 м, 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 штатными форсунками типа Tee Jet XR 110 с учетом взаимосвязей их расходных и дисперсных характеристик, условий стратификации приземного слоя атмосферы (параметр Тернера) и боковой составляющей ветра (W_{z2}) в нем и некоторых других параметров.

Для полученных при моделировании данных проведен корреляционный анализ связей параметров и показателей опрыскивания. Некоторые результаты (парные коэффициенты корреляции r_{xy}) для указанных выше параметров с отдельными показателями (размах волны осаждения Z_{go} ; степень осаждения 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_{vn} ; расчетная биологическая эффективность внесения рабочей жидкости для обработки гербицидами пшеницы $P_{эфгп}$ и риса $P_{эфгр}$, фунгицидом риса $P_{эффр}$, а также средняя экономическая эффективность указанной обработки фунгицидом $K_{эффр}$) с соответствующими диапазонами изменчивости представлены в *таблице 1*.

Таблица 1

Table 1

КОЭФФИЦИЕНТЫ КОРРЕЛЯЦИИ ПАРАМЕТРОВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПРЫСКИВАНИЯ ГЕКСАКОПТЕРОМ DJI AGRAS T20
CORRELATION COEFFICIENTS BETWEEN PARAMETERS AND THE SPRAYING PERFORMANCE OF THE DJI AGRAS T20 HEXACOPTER

Параметр, показатель	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)
<i>Показатели волны осаджения</i>						
$Z_{го}$ (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
<i>Показатели сплошной обработки</i>						
$C_{сп}$ (765-922 мл/га)	0,025	-0,065	0,127	0,282	0,193	-0,578
$N_{сп}$ (7,3-86,2 см ²)	-0,537	-0,060	0,859	-0,429	0,320	-0,328
$K_{вн}$ (8,6-98,1%)	0,835	0,093	-0,293	0,601	0,445	-0,219
$K_{вс}$ (7,8-46,2%)	0,701	0,133	-0,184	0,386	0,382	0,186
<i>Показатели эффективности обработки</i>						
$P_{эфгл}$ (0,2879-0,9992)	-0,876	-0,245	0,470	-0,553	0,180	-0,309
$P_{эфгр}$ (0,2467-0,9992)	-0,728	-0,137	0,518	-0,491	0,264	-0,496
$P_{эффр}$ (0,2401-0,9901)	-0,611	-0,055	0,620	-0,466	0,321	-0,495
$K_{эффр}$ (1,238-4,803)	-0,575	-0,007	0,474	-0,457	0,240	-0,432

В частности, можно отметить следующее.

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

- Рост рабочей скорости и высоты 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 ($H_{вн}$) до 20 л/га, напротив, благотворно и серьезно сказывается на целевых показателях качества и эффективности обработок, несмотря на некоторое снижение их производительности для больших норм внесения.

- Укрупнение выпуска жидкости (D_M) для больших 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 эюры и в конечном итоге отрицательно влияет на эффективность обработок, что требует использования ограничений по этому параметру.

С целью оценки многофакторности процессов и показателей авиационного внесения веществ БВС для полученного при моделировании массива данных дополнительно выполнен его регрессионный анализ для принятых выше параметров (факторов) с построением множественных степенных регрессий. Параметры 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 [таблице 2](#), где параметр W_{2Z} с учетом физической природы процесса заменен на комбинацию $1+|W_{2Z}|$.

Из представленных в таблице данных можно отметить высокую статистическую значимость полученных многопараметрических регрессий (для значимости $0,05 F_{6/15} > F_{табл} = 2,79$), которые для шести 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. Показатели степеней указанных 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 мультикоптера на 1 м/с для повышения летной производительности и снижения себестоимости обработок примерно на 5% приводит к падению уровня осадения капель и внесения фунгицида и его неравномерности, что в комплексе более чем на 25% уменьшает ожидаемую биологическую и экономическую эффективность

Таблица 2

Table 2

ПАРАМЕТРЫ МНОЖЕСТВЕННЫХ СТЕПЕННЫХ РЕГРЕССИЙ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПРЫСКИВАНИЯ DJI AGRAS T20
PARAMETERS OF MULTIPLE POWER REGRESSIONS FOR EVALUATING THE SPRAYING PERFORMANCE OF THE DJI AGRAS T20

Показатель	A	V_p	H_p	$H_{вн}$	D_m	P_T	$1+ W_{zz} $	$R^2/F_{6/15}$
$Z_{го}, M$	39,36	-0,405	0,210	-0,004	0,081	-0,045	0,166	0,892/20,68
$K_k, \%$	0,59	-2,550	-0,117	-0,016	1,508	0,039	-0,769	0,910/25,18
$N_{ср}, см^{-2}$	4025,90	-2,419	-0,008	0,964	-0,555	0,066	-0,693	0,955/52,59
$K_{вн}, \%$	0,0017	3,416	-0,607	-0,149	0,937	0,492	0,054	0,914/26,68
$P_{эффр}$	20,30	-1,996	-0,011	0,527	-0,240	0,031	-0,880	0,929/32,68
$K_{эффр}$	114,58	-1,963	-0,025	0,439	-0,238	0,029	-0,881	0,915/26,92

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 обработок примерно на 30%, однако существенное улучшение при этом качественных показателей внесения и распределения фунгицида определяет в конечном итоге рост расчетной эффективности такой обработки на 35%. Характерно, что для этого случая использование с целью обеспечения большего выпуска форсунок следующей ступени принятого типоразмерного ряда (рост D_m на 30 мкм) может уменьшить эффективность обработки примерно на 5%. Эти обстоятельства определяют высокую значимость выбора системы технологических параметров внесения при формировании регламента применения препаратов для соответствующих обработок. Примечательно, что период 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 на 2%.

Выводы. Разработанный и апробированный в процессе исследований расчетно-программный комплекс численного моделирования защитного опрыскивания мультикоптерами обеспечивает общую адекватность и приемлемую точность комплексной оценки значимых показателей защитных обработок и может быть использован для решения актуальных научно-практических задач перспективного внедрения таких БВС.

Внесение пестицидов БВС осуществляется в его индуктивном следе, что принципиально отличает его от наземного метода и является сложным многофакторным процессом, показатели которого определяются комплексом характеристик БВС и режимом его полета, данными и конфигурацией системы опрыскивания, свойствами рабочих веществ и требованиями их выпуска, параметрами обрабатываемого участка и приземного слоя атмосферы.

Для рассмотренного типового случая защитного опрыскивания гексакоптером *DJI Agras T20* горизонтальных сельскохозяйственных участков водным раствором пестицида изменчивость значимых показателей внесения жидкости и обработки участков примерно на 90% описывается влиянием комплекса шести условно независимых параметров режима полета БВС (V_p, H_p), выпуска рабочей жидкости ($H_{вн}, D_m$) и внешних условий обработки (P_T, W_{zz}), каждый из которых по отдельности влияет на целевые показатели опрыскивания, однако не определяет их единственным образом.

Полученные с использованием результатов численного 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. et al. Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV). *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 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*. 2021. June. 34. DOI: 10.1787/9240f8eb-en.

4. Liu X., Zhang W., Fu H.B. et al. Distribution regularity of downwash airflow under rotors of agricultural UAV for plant protection. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. 14(3). 46-57. DOI: 10.25165/ijabe.20211403.4036.
5. Zhu H., Jiang Y., Li H.Z. et al. Effects of application parameters on spray characteristics of multi-rotor UAV. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*. 2019. 2(1). 18-25. DOI: 10.33440/j.ijpaa.20190201.0025.
6. Hanif A.S., Han X., Yu S.-H. et al. Modeling of the control logic of a UASS based on coefficient of variation spraying distribution analysis in an indoor flight simulator. *Frontiers in Plant Science*. 2013. 14:1235548. DOI: 10.3389/fpls.2023.1235548.
7. Teske M.E., Wachspress D.A., 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. DOI: 10.13031/trans.12701.
8. Zhang H.Y., Lan Y.B., Shen N.W. et al. 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. et al. Key technologies for testing and analyzing aerial spray deposition and drift: A comprehensive review. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*. 2020. 3(2). 13-27. DOI: 10.33440/j.ijpaa.20200302.80.
10. Асовский В.П., Кузьменко А.С. Особенности опрыскивания с использованием беспилотных воздушных судов вертолетного типа // *Защита и карантин растений*. 2019. N5. С. 40-44. EDN: ZIMLZZ.
11. Cao Y.L., Yu F.H., Xu T.Y. et al. Effects of plant protection UAV-based spraying on the vertical distribution of droplet deposition on Japonica rice plants in Northeast China. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. 14(5). 27-34. DOI: 10.25165/ijabe.20211405.5490.
12. Jeevan N., Pazhanivelan S., Kumaraperumal R. et al. Effect of different herbicide spray volumes on weed control efficiency of a battery-operated Unmanned aerial vehicle sprayer in transplanted rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Applied and Natural Science*. 2023. 15(3). 972-977. DOI: 10.31018/jans.v15i3.4753.
13. Biglia A., Grella M., Bloise N. et al. UAV-spray application in vineyards: Flight modes and spray system adjustment effects on canopy deposit, coverage, and off-target losses. *Science of the Total Environment*. 2022. 845. 157292. DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2022.157292.
14. Wang G.B., Li X., Andaloro J. et al. Deposition and biological efficacy of UAV-based low-volume application in rice fields. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*. 2020. 3(2). 65-72. DOI: 10.33440/j.ijpaa.20200302.86.
15. Vera-Vaca C.V., Acosta-Lua C., Perez-Cruz J.H., Vaca-Garcia C.C. Determination of flight parameters of a sprayer UAV according to the disease in corn crops at the reproductive stage. *Hindawi, Mathematical Problems in Engineering*. Vol. 2023. DOI: 10.1155/2023/9932885.
16. Chen P., Douzals J.P., Lan Y. et al. Characteristics of unmanned aerial spraying systems and related spray drift: A review. *Frontiers in Plant Science*. 2022. 13.870956. DOI: 10.3389/fpls.2022.870956.

REFERENCES

1. Del Cerro J., Cruz Ulloa C., Barrientos A. et al. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A survey. *Agronomy*. 2021. 11(2). 203 (In English). DOI: 10.3390/agronomy11020203.
2. Chen H.B., Lan Y.B., Fritz B.K. et al. Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV). *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. 14(1). 38-49 (In English). DOI: 10.25165/ijabe.20211401.5714.
3. State of the knowledge literature review on Unmanned Aerial spray systems in agriculture. OECD Working Party on Pesticides (WPP), OECD Drone Sub-Group Bonds Consulting Group LLC. *Australian Pesticides and Veterinary Medicines Authority*. 2021. June. 34 (In English). DOI: 10.1787/9240f8eb-en.
4. Liu X., Zhang W., Fu H.B. et al. Distribution regularity of downwash airflow under rotors of agricultural UAV for plant protection. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. 14(3). 46-57 (In English). DOI: 10.25165/ijabe.20211403.4036.
5. Zhu H., Jiang Y., Li H.Z. et al. Effects of application parameters on spray characteristics of multi-rotor UAV. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*. 2019. 2(1). 18-25 (In English). DOI: 10.33440/j.ijpaa.20190201.0025.
6. Hanif A.S., Han X., Yu S.-H. et al. Modeling of the control logic of a UASS based on coefficient of variation spraying distribution analysis in an indoor flight simulator. *Frontiers in Plant Science*. 2013. 14:1235548 (In English). DOI: 10.3389/fpls.2023.1235548.
7. Teske M.E., Wachspress D.A., 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 (In English). DOI: 10.13031/trans.12701.
8. Zhang H.Y., Lan Y.B., Shen N.W. et al. Numerical analysis of downwash flow field from quad-rotor unmanned aerial vehicles. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*. 2020. 3(4). 1-7 (In English). DOI: 10.33440/j.ijpaa.20200304.138.
9. Zhang R.R., Chen L.P., Wen Y. et al. Key technologies for testing and analyzing aerial spray deposition and drift: A comprehensive review. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*. 2020. 3(2). 13-27 (In English). DOI: 10.33440/j.ijpaa.20200302.80.

10. Asovsky V.P., Kuzmenko A.S. Some features of spraying using the unmanned aerial vehicles of the helicopter type. *Plant Protection and Quarantine*. 2019. N5. 40-44 (In Russian). EDN: ZIMLZZ.
11. Cao Y.L., Yu F.H., Xu T.Y. et al. Effects of plant protection UAV-based spraying on the vertical distribution of droplet deposition on Japonica rice plants in Northeast China. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. 14(5). 27-34 (In English). DOI: 10.25165/j.ijabe.20211405.5490.
12. Jeevan N., Pazhanivelan S., Kumaraperumal R. et al. Effect of different herbicide spray volumes on weed control efficiency of a battery-operated Unmanned aerial vehicle sprayer in transplanted rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Applied and Natural Science*. 2023. 15(3). 972-977 (In English). DOI: 10.31018/jans.v15i3.4753.
13. Biglia A., Grella M., Bloise N. et al. UAV-spray application in vineyards: Flight modes and spray system adjustment effects on canopy deposit, coverage, and off-target losses. *Science of the Total Environment*. 2022. 845. 157292 (In English). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157292.
14. Wang G.B., Li X., Andaloro J. et al. Deposition and biological efficacy of UAV-based low-volume application in rice fields. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*. 2020. 3(2). 65-72 (In English). DOI: 10.33440/j.ijpaa.20200302.86.
15. Vera-Vaca C.V., Acosta-Lua C., Perez-Cruz J.H., Vaca-Garcia C.C.. Determination of flight parameters of a sprayer UAV according to the disease in corn crops at the reproductive stage. *Hindawi, Mathematical Problems in Engineering*. Vol. 2023 (In English). DOI: 10.1155/2023/9932885.
16. Chen P., Douzals J.P., Lan Y. et al. Characteristics of unmanned aerial spraying systems and related spray drift: A review. *Frontiers in Plant Science*. 2022. 13.870956 (In English). DOI: 10.3389/fpls.2022.870956.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Асовский В.П. – формирование информационной базы, целей и задач исследований, разработка общей структуры и основных модулей программного комплекса, подготовка общих и промежуточных выводов, редактирование статьи;

Кузьменко А.С. – разработка, адаптация и тестирование отдельных модулей и программного комплекса, проведение и анализ результатов многовариантных расчетов, подготовка и оформление статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Asovsky V.P. – formation of the information base, setting the research goals and objectives, development of the overall structure and main modules of the software package, preparation of general and intermediary conclusions, manuscript proofreading;

Kuzmenko A.S. – development, adaptation and testing of individual modules and the software package, conducting and analyzing multivariate calculation results, manuscript preparation and design.

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

07.11.2023
20.08.2024