Технический облик беспилотной авиационной системы вертолетного типа для внесения пестицидов и удобрений

Леонид Анатольевич Марченко¹,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник, e-mail: marchenko1312@mail.ru;
Михаил Васильевич Мызин²,
руководитель проектов,
e-mail: m.myzin@rhc.aero;

Иван Васильевич Кузнецов³,
технический руководитель
по перспективным проектам,
e-mail: i.kuznecov@kamov.ru;
Артем Юрьевич Спиридонов¹,
младший научный сотрудник,
e-mail: artyom-spiridonov@yandex.ru

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;

²АО «Вертолеты России», Москва, Российская Федерация;

³АО «Камов», г. Люберцы, Московская область, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что при формировании технического облика беспилотной авиационной системы для внесения пестицидов и удобрений необходимо учитывать взаимосвязь беспилотного и наземного авиационных комплексов. (*Цель исследований*) Разработать технический облик беспилотной авиационной системы для внесения пестицидов и удобрений. (*Материалы и методы*) Использовали Методические рекомендации по применению средств химизации в системе точного земледелия (ВИМ), нормативно-техническую документацию на беспилотные авиационные системы. (*Результаты и обсуждение*) Разработали блок-схему алгоритма формирования облика беспилотной авиационной системы вертолетного типа для внесения удобрений и пестицидов, включающую разработку как беспилотного, так и наземного авиационных комплексов. Рассчитали аэродинамические характеристики беспилотного воздушного судна с соосной схемой несущих винтов, при взлетной массе 280 килограммов и полезной нагрузке 100 килограммов. Предложили опрыскиватель в виде модульной конструкции. Обосновали структуру наземного авиационного комплекса в виде мобильного транспортировщика-заправщика с базовой транспортной платформой, подъемно-транспортным и заправочным модулями, универсальным наземным пультом управления пилота-оператора. (*Выводы*) Сформировали рациональный технический облик беспилотной авиационной системы вертолетного типа для дифференцированного внесения пестицидов и удобрений в системе точного земледелия. Определили летно-технические ограничения при внесении удобрений и пестицидов беспилотным воздушным судном вертолетного типа: полезная нагрузка не менее 100 килограммов, рабочая высота полета 1,0-1,5 метра с огибанием рельефа сельскохозяйственного поля и уходом от возможных препятствий, рабочая скорость полета не выше 60 километров в час, автоматические взлет и посадка на ограниченную площадку, автоматический полет на скорости 60 километров в час на высоте 1 метр в режиме галсирования. Показали, что запас по статическому потолку без влияния земли при полетной массе 280 килограммов составляет 1300 метров, что позволяет летать в горных районах, например для обработки виноградников пестицидами.

Ключевые слова: беспилотная авиационная система, технический облик, беспилотное воздушное судно, наземный комплекс, внесение пестицидов и удобрений.

Для цитирования: Марченко Л.А., Мызин М.В., Кузнецов И.В., Спиридонов А.Ю. Технический облик беспилотной авиационной системы вертолетного типа для внесения пестицидов и удобрений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №3. С. 63-72. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-63-72.

Technical Configurations of a Helicopter Type Unmanned Aerial System for Pesticide and Fertilizer Application

Leonid A. Marchenko¹,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: marchenko1312@mail.ru;
Mikhail V. Myzin²,
project manager, e-mail: m.myzin@rhc.aero;

Ivan V. Kuznetsov³,
prospective projects technical supervisor,
e-mail: i.kuznecov@kamov.ru;
Artem Yu. Spiridonov¹,
junior researcher, e-mail: artyom-spiridonov@yandex.ru

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

²JSC Russian Helicopters, Moscow, Russian Federation;

³JSC “Kamov”, Lyubertsy, Moscow region, Russian Federation

Abstract. It was noted that when forming the configurations of an unmanned aerial system for pesticide and fertilizer application, it is necessary to take into account the interdependence of unmanned and ground-based aerial systems. (*Research purpose*) To develop the configurations of an unmanned aerial system for pesticide and fertilizer application. (*Materials and methods*) The authors used Methodological recommendations on the use of chemicals in the precision farming system (VIM), regulatory and technical documentation for unmanned aerial systems. (*Results and discussion*) The authors developed a flowchart of the algorithm for forming the configurations of a helicopter type unmanned aerial system for fertilizer and pesticide application, including the formation of both unmanned and ground-based aerial systems. The authors calculated the aerodynamic characteristics of an unmanned coaxial rotor aircraft with a take-off weight of 280 kilograms and a payload of 100 kilograms. A modular-designed sprayer was offered. The authors substantiated the structure of the ground-based aerial complex in the form of a mobile transporter-tanker with a basic transport platform, lifting and transporting and refueling modules, and a universal ground control panel for the pilot-operator. (*Conclusions*) The authors formed reasonable configurations of a helicopter type unmanned aerial system for pesticide and fertilizer differentiated application in the precision farming system. Aircraft performance limitations were identified for the application of fertilizers and pesticides by a helicopter type unmanned aerial vehicle: the payload of at least 100 kilograms, the operating altitude of 1.0-1.5 meters when bypassing the agricultural field topography and avoiding possible obstacles, the operating airspeed kept below 60 kilometers per hour, automatic take-off and landing on a limited area, autoflight at the speed of 60 kilometers per hour at a one meter altitude in a tacking mode. It was showed that the static ceiling margin, without taking the earth influence into account, with a 280-kilogram flight mass, is 1300 meters, which allows flying in mountainous areas, for example, for the treatment of vineyards with pesticides

Keywords: unmanned aerial system, technical configurations, unmanned aerial vehicles, ground-based aerial systems, application of pesticides and fertilizers.

For citation: Marchenko L.A., Myzin M.V., Kuznetsov I.V., Spiridonov A.Yu. Tekhnicheskiy oblik bespilotnoy aviatsionnoy sistemy vertoletnogo tipa dlya vneseniya pestitsidov i udobreniy [Technical configurations of a helicopter type unmanned aerial system for pesticide and fertilizer application]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N3. 63-72 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-63-72.

Технический облик авиационного комплекса представляет совокупность количественных и качественных показателей (характеристик, параметров, свойств), определяющих его конструктивно-аэродинамическую схему, силовую установку и вид топлива, состав и характеристики модулей бортового оборудования, полезную нагрузку [1]. Технический облик беспилотных воздушных судов (БВС) формируют на основе системного подхода, анализа и синтеза [2-4]. Для оценки эффективности летательных аппаратов предложены показатели экономической, технической, целевой, транспортной, производственной и эксплуатационной эффективности [5-7]. Формирование облика БВС включает при прочих равных условиях аэродинамическую, объемно-массовую и силовую компоновки [8, 9]. Проанализированы критерии эффективности применения БВС: относительная масса полезной нагрузки, время полета, удельная стоимость полета, стоимость жизненного цикла, а также предложена методика определения рационального облика БВС [10, 11]. В зависимости от назначения и постановки задачи в качестве критериев оптимальности целевой функции для воздушного судна (ВС) могут быть приняты также прямые эксплуатационные расходы, себестоимость тонно-километра,

топливная эффективность и др. [12]. Рассмотрен подход к формированию облика БВС вертолетного типа (БВС ВТ) с учетом посадки на сложно движущуюся платформу. Установлено, что БВС ВТ, базирующиеся на платформе, должны иметь объемно-массовые характеристики, оптимизированные в сторону уменьшения размеров полетной и транспортировочной конфигурации в ходе складывания лопастей несущих винтов (НВ) вдоль фюзеляжа и снятия выступающих элементов конструкции. При этом конструктивно-силовую схему определяют исходя из принятой общей компоновки изделия и нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации [13].

Цель исследований – формирование технического облика беспилотной авиационной системы вертолетного типа для внесения пестицидов и удобрений.

Материалы и методы. Разработку проводили с учетом «Методических рекомендаций по применению средств химизации в системе точного земледелия» (ВИМ, 2016), нормативно-технической документации: ГОСТ Р 57258-2016. Системы беспилотные авиационные. Термины и определения; ГОСТ 56122-2014. Воздушный транспорт. Беспилотные авиационные системы. Общие требования; ГОСТ 20058. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины,

определения, обозначения, Циркуляр 328 ИКАО. Беспилотные авиационные системы (БАС), Правила проведения авиационно-химических работ в соответствии с Приказом Минтранса РФ от 17.07.2008 № 108 (ред. от 23.06.2009) «Об утверждении федеральных авиационных правил «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации».

Результаты и обсуждение. На основании методики структурно-параметрического синтеза конструктивно-компоновочного облика беспилотного летательного аппарата [3, 4, 10] и методики формирования облика беспилотного воздушного судна вертолетного типа [11, 13] разработана блок-схема алгоритма формирования облика беспилотной авиационной системы вертолетного типа (БАС ВТ) для внесения пестицидов и удобрений (рис. 1).

БАС составляет основу технологии дифференцированного внесения пестицидов и удобрений и включает:

- беспилотный авиационный комплекс (БАК), содержащий определенное число БВС для мониторинга сельскохозяйственных угодий, а также для внесения пестицидов, удобрений и других агрохимикатов;
- наземный авиационный комплекс (НАК), представленный техническими средствами транспортировки БВС к сельскохозяйственному полю, заправки топливом, рабочими жидкостями пестицидов и удобрений, взлетно-посадочными техническими средствами, наземным пунктом пилота-оператора.

Отдельными модулями входят [14]:

- средства интеграции с другими системами в воздушном пространстве;
- средства ремонта и технического обслуживания;
- вспомогательные средства;
- эксплуатационно-техническая документация;
- технический персонал.

При формировании технического облика БАС для внесения пестицидов и удобрений важно учитывать взаимосвязь БАК и НАК.

Для внесения средств защиты растений и удобрений в системе точного земледелия предпочтительны БВС многоразового использования, безаэродромного базирования, с небольшой разбежкой для взлета или с вертикальным взлетом и вертикальной посадкой, низковысотные, вертолетного, винтокрылого и мультироторного типов, оснащенные автопилотом и системой дифференцированного распределения рабочих жидкостей удобрений и пестицидов по заданной программе, разработанной в соответствии с агрохимической картограммой и картой фитосанитарного состояния поля [14, 15].

Определены летно-технические ограничения при внесении удобрений и пестицидов БВС ВТ:

- полезная нагрузка не менее 100 кг;
- рабочая высота полета 1,0-1,5 м с огибанием ре-

Рис. 1. Блок-схема формирования облика беспилотной авиационной системы вертолетного типа

Fig. 1 Flowchart for forming the configurations of a helicopter type unmanned aerial system

льефа сельскохозяйственного поля и уходом от возможных препятствий;

- рабочая скорость полета не выше 60 км/ч;
- автоматические взлет и посадка на ограниченную площадку;
- автоматический полет на скорости 60 км/ч на высоте 1 м в режиме галсирования [16].

На базе вертолета Ка-137 разработано БВС вертолетного типа БВС-137 ВИМ соосной схемы для внесения пестицидов [17]. Определяющим в аэродинамической характеристике вертолета стало количество НВ. Симметричная аэродинамическая соосная схема НВ, в отличие от традиционной одновинтовой, включает протяженную механическую трансмиссию рулевого винта и, как следствие, сам рулевой винт. Это позволяет вертолету взлетать с площадок небольшого размера при ветровой нагрузке с любого направ-

ления, обеспечивает высокую маневренность и стабильность при полетах на разных высотах, что повышает безопасность применения беспилотного вертолета. Однако сферическая форма фюзеляжа недостаточно оптимальна с точки зрения его внутренней компоновки, удобства технического обслуживания и эксплуатации вертолета (рис. 2). Поэтому было разработано БВС ВТ с аэродинамической компоновкой фюзеляжа традиционной формы с хвостовой балкой, горизонтальным и вертикальным оперением (рис. 3).

Рис. 2. Общий вид БВС-137 ВИМ на базе беспилотного вертолета Ка-137

Fig. 2. General view of BVS-137 VIM based on the Ka-137 unmanned helicopter

Некоторые геометрические параметры и летно-технические характеристики вертолетов показывают перспективность аэродинамической компоновки БВС-137 ВИМ (таблица).

В аэродинамических расчетах использовали следующие основные исходные данные:

- максимальная взлетная масса, кг 280;
- объем топливного бака, л 60;
- диаметр НВ, м 5,3;
- хорда лопасти, мм 120;
- количество лопастей, шт. 4;

Рис. 3. Общий вид БВС-137 ВИМ традиционной схемы

Fig. 3. General view of BVS-137 VIM of the traditional scheme

- коэффициент заполнения НВ 0,058;
- окружная скорость концов лопастей, м/с 180;
- площадь миделева сечения, м² 0,684;
- вредная пластинка $C_x S$, м² 0,572;
- профильная компоновка лопасти – на базе аэродинамического профиля *NACA 230-12*.

К основным аэродинамическим характеристикам относятся также силы и моменты на фюзеляже, зависящие от угла атаки и угла скольжения:

$$c_{xa} = f(\alpha); c_{ya} = f(\alpha); c_{z\phi} = f(\beta); \quad (1)$$

$$m_{x\phi} = f(\beta); m_{y\phi} = f(\alpha); m_{z\phi} = f(\alpha), \quad (2)$$

где α – угол атаки фюзеляжа, град.;

β – угол скольжения фюзеляжа, град.;

c_{xa} – коэффициент сопротивления фюзеляжа;

c_{ya} – коэффициент подъемной силы фюзеляжа;

$c_{z\phi}$ – коэффициент боковой силы фюзеляжа;

$m_{x\phi}$ – коэффициент поперечного момента фюзеляжа;

$m_{y\phi}$ – коэффициент путевого момента фюзеляжа;

m_z – коэффициент продольного момента фюзеляжа.

В расчетах использовали коэффициенты численных аэродинамических продольных сил и момента, полученные с использованием промышленного пакета программ вычислительной гидродинамики *ANSYS CFX*.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ЛЕТНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРТОЛЕТОВ COMPARATIVE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF THE HELICOPTERS		
Показатели / Indicators	Ка-137 / Ka-137	БВС-137ВИМ / BVS-137 VIM
Площадь миделева сечения, м ² Midsection area, m ²	1,130	0,684
Вредная пластинка $C_x S$, м ² Harmful plate $C_x S$, m ²	0,700	0,357
Максимальная скорость полета, км/ч Maximum flight speed, km/h	125	160
Максимальная скороподъемность, м/с Maximum rate of climb, m/s	8,9	9,5
Часовой расход при полете на скорости 60 км/ч, кг/ч Hourly consumption at a flight speed of 60 km/h, kg/h	18,9	18,7
Продолжительность полета на скорости 60 км/ч при запасе топлива на полет 20 кг/ч, ч Flight duration at a speed of 60 km/h with a fuel reserve for the flight of 20 kg/h, h	1,06	1,07
Дальность полета на скорости 60 км/ч при запасе топлива на полет 20 кг/ч, км Flight range at a speed of 60 km/h with the flight fuel range of 20 kg/h, km	63,6	64,2

Рассмотрим зависимость коэффициентов лобового сопротивления фюзеляжа $c_{ха}$, подъемной силы c_{ya} и момента тангажа m_z от угла атаки фюзеляжа α_ϕ (рис. 4).

Рис. 4. Влияние угла атаки фюзеляжа α_ϕ на: а – коэффициент лобового сопротивления $c_{ха}$; б – коэффициент подъемной силы c_{ya} ; в – момент тангажа m_z

Fig. 4. Influence of the fuselage attack angle α_ϕ on: a – drag coefficient $c_{ха}$; b – lift coefficient c_{ya} ; c – pitching moment m_z

Наименьшее значение коэффициента лобового сопротивления фюзеляжа будет при угле атаки примерно 1° . В пределах изменения угла атаки от минус $0,5^\circ$ до $2,5^\circ$ коэффициент подъемной силы изменяется незначительно – от 0,02 до 0,10. Коэффициент подъемной силы фюзеляжа равен нулю на углах атаки, также равных нулю, что свидетельствует об аэродинамической симметрии фюзеляжа. Следовательно, рационально осуществлять полет на углах атаки фюзеляжа от минус $0,5^\circ$ до $2,5^\circ$. При этом коэффициент мо-

мента тангажа изменяется незначительно – от 0 до 0,01, что говорит об устойчивости полета.

Потребная мощность, подводимая к НВ, при создании потребной тяги зависит от скорости полета и барометрической высоты (рис. 5).

Рис. 5. Зависимость потребной мощности от скорости полета и барометрической высоты

Fig. 5. Dependence of the required power on the flight speed and barometric altitude

Полная потребная мощность достаточно велика в режиме висения и сравнима с максимальными значениями потребной мощности, обеспечивающими наибольшие значения скорости полета на различных барометрических высотах, достигает минимума в середине диапазона скоростей и возрастает с повышением скорости полета вследствие роста вредных потерь. Наименьшее значение потребной мощности при нулевой барометрической высоте имеет место при скорости полета в пределах 60-70 км/ч. В диапазоне рабочих скоростей полета 40-60 км/ч при внесении пестицидов и удобрений потребная мощность составляет 32-35 л.с.

В рабочих пределах скорости 40-60 км/ч и при нулевой барометрической высоте часовой расход топлива не превышает 14 кг/ч, а километровый расход топлива составляет 0,22-0,35 кг/ч (рис. 6, 7).

Запас по статическому потолку без влияния земли при полетной массе 280 кг составляет 1300 м, что позволяет летать в горных районах, например при обработке пестицидами виноградников (рис. 8).

Уравнение существования (массового баланса) летательного аппарата в первом приближении отображает связь взлетной массы со структурными элементами [18]:

$$m_0 = m_{\text{кон}} + m_{\text{cy}} + m_{\text{об.сy}} + m_{\text{т}} + m_{\text{пн}}, \quad (3)$$

где $m_{\text{кон}}$ – масса конструкции, кг;

m_{cy} – масса силовой установки, кг;

$m_{\text{об.сy}}$ – масса бортового оборудования и систем управления, кг;

$m_{\text{т}}$ – масса топлива, кг;

Рис. 6. Зависимости часового расхода топлива от скорости полета и барометрической высоты

Fig. 6. Dependence of hourly fuel consumption on flight speed and barometric altitude

Рис. 7. Зависимости километровых расходов топлива от скорости полета и барометрической высоты

Fig. 7. Dependence of fuel consumption per kilometer on flight speed and barometric altitude

Рис. 8. Зависимости практических и статических потолков (с влиянием земли и без него) от полетной массы на взлетном режиме работы двигателя

Fig. 8. Dependence of practical and static ceilings (with and without the earth effect) on the flight weight in the takeoff engine operation mode

$m_{\text{пн}}$ – масса полезной нагрузки, кг.

Разделив каждый член (9) на m_0 , получим уравнение существования в относительном виде, позволяющем сравнивать летательные аппараты по степени использования единицы массы:

$$1 = \bar{m}_{\text{кон}} + \bar{m}_{\text{сy}} + \bar{m}_{\text{об.сy}} + \bar{m}_{\text{т}} + \bar{m}_{\text{пн}}. \quad (4)$$

Применение БВС ВТ для дифференцированного внесения пестицидов и удобрений приводит к перераспределению его весовой структуры в сторону увеличения полезной нагрузки (массы загружаемой рабочей жидкости, оборудования для ее распределения, бортового оборудования, систем управления) и уменьшения массы топлива на борту. Описана функциональная связь относительной массы полезной нагрузки с основными ее компонентами и технологическими параметрами [19].

У большинства вертолетов соосной схемы центр масс совпадает с осью, проходящей через НВ. Поэтому следует проектировать оборудование таким образом, чтобы при установке на воздушное судно его центр масс совпадал с центром масс вертолета либо не оказывал существенного влияния на развесовку. Общая масса проектируемого оборудования должна соответствовать следующим условиям:

$$m_0 + m_{\text{рж}} \leq 0,85 m_{\text{п}}, \quad (5)$$

где m_0 – масса оборудования, кг;

$m_{\text{рж}}$ – масса рабочей жидкости, кг;

$m_{\text{пн}}$ – максимальная масса полезной нагрузки летательного аппарата, кг.

Такой подход к оценке предельно допустимого веса изделия связан с тем, что емкости, содержащие жидкости, при транспортировке создают высокие динамические нагрузки. Во избежание превышения нормативных эксплуатационных показателей нагрузок рекомендуется иметь запас нагружения, выраженный в 10-15% размера от максимально допустимой массы полезной нагрузки. Габаритные характеристики оборудования должны соответствовать следующим условиям:

$$l_{\text{ш}} \leq 0,85 L_{\text{НВ}}; \quad (6)$$

$$b_0 < b_{\text{ф}}, \quad (7)$$

где $l_{\text{ш}}$ – общая ширина штанги модуля опрыскивателя, м;

$L_{\text{НВ}}$ – диаметр НВ вертолета, м;

b_0 – общая ширина навесных модулей оборудования, м;

$b_{\text{ф}}$ – ширина фюзеляжа воздушного судна, м.

Длину и высоту модулей оборудования, а также способы их крепления выбирают индивидуально, исходя из конструктивных особенностей конкретной модели. Наиболее рационально исполнение опрыскивателя в виде конструкции, включающей четыре основных модуля:

- размещения рабочей жидкости;
- подачи и регулирования расхода рабочей жидкости;
- диспергирования;
- управления (рис. 9).

Рис. 9. Оборудование для внесения средств защиты растений и удобрений к летательному аппарату вертолетного типа соосной схемы

Fig. 9 Plant protection and fertilizer application equipment for a helicopter type aircraft of a coaxial design

В качестве материалов для изготовления авиационного опрыскивателя наиболее оптимальны, при учете соотношения масса/прочность, дюралюминий марки Д16Т либо сплавы на основе алюминия с аналогичными прочностными характеристиками. Коллектор штанги для подачи рабочих жидкостей целесообразнее изготовить из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, поскольку многие пестициды и удобрения представлены химически агрессивными веществами. Для баков лучше использовать композитные материалы (кевлар, углепластик), блочный полиамид марки ПА-6 или их аналоги, так как они имеют меньшую плотность и, соответственно, массу, однако обладают достаточным запасом прочности.

Поскольку рабочее напряжение бортовой сети БВС вертолетного типа находится в пределах 12-24 В, электрооборудование опрыскивателя должно иметь соответствующее напряжение питания. При наличии слабых элементов, относящихся преимущественно к системам управления (напряжение 3,6; 5 В и т.д.), в схему электрооборудования следует включить преобразователи, понижающие напряжение до конкретных значений, предусмотренных для бортовых приборов. Основу НАК составляет мобильный транспортировщик-заправщик, предназначенный для транспортировки БВС-137 ВИМ к сельскохозяйственному полю, заправки рабочей жидкостью и топливом. Его конструкция имеет ряд модулей:

- базовый транспортный;
- подъемно-транспортный;
- заправочный топливом и рабочей жидкостью пестицидов и удобрений;
- универсальный наземный пульт управления пилота-оператора (НПУ).

НПУ может быть сформирован с использованием стандартных компонентов, входящих в состав автоматизированной системы управления воздушным движением [20].

В состав мобильного транспортировщика-заправщика входят:

- автомобиль повышенной проходимости с длиномерной платформой, оснащенный краном-манипулятором;
- емкость цилиндрическая горизонтальная для воды;
- миксер для приготовления рабочей жидкости;
- емкость для промывочной воды;
- насос для рабочей жидкости;
- емкость для топлива;
- бочковой комплект для заправки топливом;
- ящик для хранения канистр с пестицидами;
- ящики с ЗИП и средствами гигиены.

Грузоподъемность автомобиля с краном-манипулятором выбрана с учетом взлетной массы БВС, объема воды, средств химизации и топлива для обеспечения бесперебойной работы на одну смену – 2300 кг. Вместимость емкости для хранения воды, равная 1000 л, рассчитана для приготовления рабочей жидкости средств химизации с учетом того, что средняя доза внесения равна 10 л/га, средняя производительность БВС-137 ВИМ – 14,1 га/ч, продолжительность рабочей смены – 6 ч. Вместимость миксера 100 л выбрана с учетом емкости для рабочей жидкости. Модель крана-манипулятора КМУ UNICURV-374 осуществляет подъем и спуск БВС-137 ВИМ с грузовой платформы на почву (грузовой момент 7,87 т/м, грузоподъемность с минимальным вылетом стрелы 3,03 т/2,6 м, грузоподъемность с максимальным вылетом – 4,8 т/9,8 м). Производительность насоса для заправки емкости рабочей жидкостью составляет 110 л/мин, обеспечивая заправку емкости БВС за 0,5 мин. Бочковой комплект предусмотрен для заправки БВС топливом за 0,5 мин.

Выводы. Разработали блок-схему алгоритма формирования облика беспилотной авиационной системы вертолетного типа для внесения удобрений и пестицидов, включающую формирование как беспилотного, так и наземного авиационных комплексов. Описали функциональные задачи и условия применения беспилотной авиационной системы, направленные на дифференцированное внесение пестицидов и удобрений в системе точного земледелия. Установили исходный базовый состав БАС, объединяющий беспилотный и наземный авиационные комплексы для выполнения всего спектра технологических операций по дифференцированному внесению удобрений и пестицидов в точном земледелии.

Определили летно-технические ограничения при внесении удобрений и пестицидов БВС ВТ: полезная нагрузка не менее 100 кг, рабочая высота полета 1,0-1,5 м с огибанием рельефа сельскохозяйственного поля и уходом от возможных препятствий, рабочая скорость полета не выше 60 км/ч, автоматические взлет и посадка на ограниченную площадку, автоматический полет на скорости 60 км/ч на высоте 1 м в режи-

ме галсирования. Сформировали геометрические и объемно-массовые характеристики БВС ВТ с аэродинамической компоновкой фюзеляжа традиционной формы с хвостовой балкой, горизонтальным и вертикальным оперением, соосной схемой несущих винтов, при взлетной массе 280 кг.

Показали, что запас по статическому потолку БВС ВТ без влияния земли при полетной массе 280 кг составляет 1300 м, что позволяет летать в горных районах, например для обработки виноградников пестицидами.

Предложили исполнение опрыскивателя для БВС ВТ в виде модульной конструкции. Представили структуру наземного авиационного комплекса, основу которой составляет мобильный транспортировщик-заправщик. Сформировали рациональный технический облик БВС ВТ для дифференцированного внесения пестицидов и удобрений в системе точного земледелия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барковский В.И., Скопец Г.М., Степанов В.Д. Методология формирования технического облика экспортно-ориентированных авиационных комплексов. М.: Физматлит. 2008. 243 с.
2. Полтавский А.В., Маклаков В.В., Аверкин А.Е., Полохов А.Н., Бородуля В.М., Бурба А.А., Семенов С.С., Седых Ю.И. Системные принципы создания и применения многоцелевых комплексов беспилотных летательных аппаратов. М.: ИПУ РАН. 2010. 102 с.
3. Гусейнов А.Б. Методика структурно-параметрического синтеза конструктивно-компоновочного облика беспилотного летательного аппарата // *Труды МАИ*. 2014. N49. С. 1-14.
4. Гусейнов А.Б., Маховых А.В. Методика формирования рационального облика бортового комплекса радиолокационной защиты беспилотного летательного аппарата // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2017. Т. 20. N5. С. 98-106.
5. Austin R. Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment. Great Britain. Wiltshire. 2011. 365.
6. Valavanis K.P., George J. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Netherlands. Springer. 2014. 22-30.
7. Duan H., Li P. Bio-inspired Computation in Unmanned Aerial Vehicles. Springer. 2014. 269.
8. Roskam J. Airplane Design, Part IV. DARcorporation. Lawrence, KS. 2007. 403.
9. Проектирование самолетов / под ред. С.М. Егера. М.: Машиностроение. 1983. 616 с.
10. Серебрянский С.А., Парненков А.Е. Подход к формированию технического облика беспилотного воздушного судна // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2019. Т. 19. N3. С. 43-52.
11. Анцев В.Г., Быков В.А., Парненков А.Е. Обоснование критерия эффективности при формировании технического облика беспилотного воздушного судна вертолетного типа // *Вопросы радиоэлектроники*. 2019. N9. С. 63-67.
12. Припадчев А.Д., Межуева Л.В., Султанов Н.З. Концептуальные основы проектирования облика летательного аппарата // *Фундаментальные исследования*. 2013. N6. С. 561-564.
13. Быков В.А., Парненков А.Е. Формирование облика беспилотного воздушного судна вертолетного типа с учетом посадки на сложновдвижущуюся платформу // *Вопросы радиоэлектроники*. 2020. N3. С. 16-22.
14. Марченко Л.А., Артюшин А.А., Смиронов И.Г., Мочкова Т.В., Спиридонов А.Ю., Курбанов Р.К. Технология внесения пестицидов и удобрений беспилотными летательными аппаратами в цифровом сельском хозяйстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N5. С. 38-45.
15. Марченко Л.А., Мочкова Т.В., Курбанов Р.К., Краснородько В.В. Основные требования к беспилотным летательным аппаратам для внесения удобрений и пестицидов // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N4(33). С. 107-112.
16. Марченко Л.А., Личман Г.И., Смиронов И.Г., Мочкова Т.В., Колесникова В.А. Дифференцированное внесение удобрений и пестицидов с использованием беспилотных летательных аппаратов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N3. С. 17-23.
17. Марченко Л.А., Мызин М.В., Кузнецов И.В., Мочкова Т.В., Спиридонов А.Ю. Беспилотное воздушное судно вертолетного типа для внесения пестицидов и удобрений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N1. С. 61-68.
18. Шейнин В.М. Козловский. В.И. Весовое проектирование и эффективность пассажирских самолетов. Т.1. Весовой расчет и весовое проектирование. М.: Машиностроение, 1977. 344 с.
19. Смирнов И.Г., Марченко Л.А., Личман Г.И., Мочкова Т.В., Спиридонов А.Ю. Беспилотные летательные аппараты для внесения пестицидов и удобрений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. Т. 11. N3. С. 17-23.
20. Токарев Ю.П., Макеев М.Р., Юмаев К.Р. Построение комплекса управления беспилотными летательными аппаратами с использованием стандартных компонентов // *Информатика, телекоммуникационное управление*. 2010. N6(113). С. 56-59.

REFERENCES

1. Barkovskiy V.I., Skopets G.M., Stepanov V.D. Metodologiya formirovaniya tekhnicheskogo oblika eksportno-orientirovannykh aviatsionnykh kompleksov [Methodology for the formation of the technical configurations of export-oriented aviation complexes]. Moscow: Fizmatlit. 2008. 243 (In Russian).
2. Poltavskiy A.V., Maklakov V.V., Averkin A.E., Polokhov A.N., Borodulya V.M., Burba A.A., Semenov S.S., Sedykh Yu.I. Sistemnye printsipy sozdaniya i primeneniya mnogotselyvykh kompleksov bespilotnykh letatel'nykh apparatov [System principles for creating and using multipurpose complexes of unmanned aerial vehicles]. Moscow: IPU RAN. 2010. 102 (In Russian).
3. Guseynov A.B. Metodika strukturno-parametricheskogo sinteza konstruktivno-komponovochного oblika bespilotnogo letatel'nogo apparata [Technique for the structural and parametric synthesis of the design and configurations of an unmanned aerial vehicle]. *Trudy MAI*. 2014. N49. 1-14 (In Russian).
4. Guseynov A.B., Makhovyykh A.V. Metodika formirovaniya ratsional'nogo oblika bortovogo kompleksa radiolokatsionnoy zashchity bespilotnogo letatel'nogo apparata [The method of forming a rational aspect of the onboard complex of radar defense unmanned aerial vehicle]. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*. 2017. Vol. 20. N5. 98-106 (In Russian).
5. Austin R. Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment. Great Britain. Wiltshire. 2011. 365 (In English).
6. Valavanis K.P., George J. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Netherlands. Springer. 2014. 22-30 (In English).
7. Duan H., Li P. Bio-inspired Computation in Unmanned Aerial Vehicles. Springer. 2014. 269 (In English).
8. Roskam J. Airplane Design, Part IV. DARcorporation. Lawrence. KS. 2007. 403 (In English).
9. Proektirovanie samoletov [Aircraft design]. pod red. S.M. Egera. Moscow: Mashinostroenie. 1983. 616 (In Russian).
10. Serebryanskiy S.A., Parnenkov A.E. Podkhod k formirovaniyu tekhnicheskogo oblika bespilotnogo vozdušnogo sudna [Approach to shaping the technical appearance of an unmanned aerial vehicle]. *Vestnik YUrGU. Seriya «Mashinostroenie»*. 2019. Vol. 19. N3. 43-52 (In Russian).
11. Antsev V.G., Bykov V.A., Parnenkov A.E. Obosnovanie kriteriya effektivnosti pri formirovanii tekhnicheskogo oblika bespilotnogo vozdušnogo sudna vertoletnogo tipa [Justification of efficiency criterion in formation of technical appearance of a helicopter-type unmanned aircraft]. *Voprosy radioelektroniki*. 2019. N9. 63-67 (In Russian).
12. Pripadchev A.D., Mezhueva L.V., Sultanov N.Z. Kontseptual'nye osnovy proektirovaniya oblika letatel'nogo apparata [The conceptual bases aircraft figure desingning]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013. N6. 561-564 (In Russian).
13. Bykov V.A., Parnenkov A.E. Formirovanie oblika bespilotnogo vozdušnogo sudna vertoletnogo tipa s uchetom posadki na slozhnodvizhushchuyusya platformu [Formation of appearance of helicopter-type unmanned airvehicle with consideration of landing on complex-moving platform]. *Voprosy radioelektroniki*. 2020. N3. 16-22 (In Russian).
14. Marchenko L.A., Artyushin A.A., Smironov I.G., Mochkova T.V., Spiridonov A.Yu., Kurbanov R.K. Tekhnologiya vneseniya pestitsidov i udobreniy bespilotnymi letatel'nymi apparatami v tsifrovom sel'skom khozyaystve [Technology of Pesticides and Fertilizers Application with Unmanned Aerial Vehicles in Digital Agriculture]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 38-45 (In Russian).
15. Marchenko L.A., Mochkova T.V., Kurbanov R.K., Krasnoborod'ko V.V. Osnovnye trebovaniya k bespilotnym letatel'nykh apparatam dlya vneseniya udobreniy i pestitsidov [Basic requirements for unmanned aerial vehicles for fertilizer and pesticides]. *Vestnik VIESH*. 2018. N4(33). 107-112 (In Russian).
16. Marchenko L.A., Lichman G.I., Smironov I.G., Mochkova T.V., Kolesnikova V.A. Differentsirovannoe vnesenie udobreniy i pestitsidov s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Variable rate application of fertilizers and pesticides using unmanned aerial vehicles]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2017. N3. 17-23 (In Russian).
17. Marchenko L.A., Myzin M.V., Kuznetsov I.V., Mochkova T.V., Spiridonov A.Yu. Bespilotnoe vozdušnoe sudno vertoletnogo tipa dlya vneseniya pestitsidov i udobreniy [Unmanned helicopter type aircraft for the pesticides and fertilizers application]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N1. 61-68 (In Russian).
18. Sheynin V.M., Kozlovskiy V.I. Vesovoe proektirovanie i effektivnost' passazhirskikh samoletov [Weight design and efficiency of passenger aircraft.]. Vol. 1. Vesovoy raschet i vesovoe proektirovanie. Moscow: Mashinostroenie. 1977. 344 (In Russian).
19. Smirnov I.G., Marchenko L.A., Lichman G.I., Mochkova T.V., Spiridonov A.Yu. Bespilotnye letatel'nye apparaty dlya vneseniya pestitsidov i udobreniy [Unmanned aerial vehicles for pesticides and fertilizers application in precision farming system]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2017. Vol. 11. N3. 17-23 (In Russian).
20. Tokarev Yu.P., Makeev M.R., Yumaev K.R. Postroenie kompleksa upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami s ispol'zovaniem standartnykh komponentov [The construction of a control complex for unmanned aerial vehicles using standard components]. *Informatika, telekommunikatsionnoe upravlenie*. 2010. N6(113). 56-59 (In Russian).

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Марченко Л.А. – постановка задачи исследования, анализ априорной информации и базового варианта структуры беспилотной авиационной системы, разработка теоретических предпосылок, анализ результатов исследований, написание текста статьи, формирование выводов.

Мызин М.В. – формирование геометрических и объемно-массовых характеристик БВС ВТ, обоснование конструктивно-силовой схемы, анализ аэродинамических характеристик БВС ВТ.

Кузнецов И.В. – расчет летно-технических характеристик БВС ВТ.

Спиридонов А.Ю. – формирование параметров платформы мобильного транспортировщика-заправщика и параметров модуля опрыскивателя.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Marchenko L.A. – setting the research problem, analysis of a priori information and the basic version of the unmanned aviation system structure, development of theoretical premises, analysis of research results, writing the article text, formation of conclusions.

Myzin M.V. – formation of geometrical and volumetric-mass characteristics of a helicopter-type unmanned aircraft, substantiation of the structural and power scheme, analysis of aerodynamic characteristics of a helicopter-type unmanned aircraft.

Kuznetsov I.V. – calculation of flight performance characteristics for a helicopter-type unmanned aircraft.

Spiridonov A.Yu. – formation of the mobile transporter-tanker platform and sprayer module parameters.

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

16.07.2021
13.09.2021