

УДК 629.73

DOI 10.51955/2312-1327_2023_4_78

ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ САМОЛЁТНОГО ТИПА

*Сергей Викторович Скоробогатов,
orcid.org/0000-0002-9370-6402,
кандидат технических наук
Московский государственный технический
университет гражданской авиации (Иркутский филиал),
ул. Коммунаров, 3
Иркутск, 664047, Россия
maestro.ru@mail.ru*

*Дмитрий Александрович Бутуров,
orcid.org/0009-0006-8996-8895,
Московский государственный технический университет
гражданской авиации (Иркутский филиал),
ул. Коммунаров, 3
Иркутск, 664047, Россия
dimabatur345@gmail.com*

Аннотация. Сегодня беспилотная авиация нашла широкое применение во многих сферах человеческой деятельности. За последние пару десятков лет такая техника перешла из разряда военной или экспериментальной экзотики в нечто прикладное и повсеместно распространённое. Занимая всё новые ниши, беспилотные воздушные суда (БВС) получают все новые функции, для реализации которых конструкторами порой принимаются довольно смелые решения, редко встречающиеся в «большой» пилотируемой авиации. В статье исследуется текущее состояние отрасли гражданских БВС самолётного типа на предмет их конструктивных особенностей, а также специфики применения в различных отраслях экономики. Анализу подвергаются принципы, лежащие в основе выбора той или иной аэродинамической схемы БВС на этапе его проектирования. Рассматриваются преимущества, недостатки и ограничения конкретной компоновки планера БВС, применяемой силовой установки и конструктивных материалов в контексте сценариев возможного применения БВС. На основе обобщения параметров, подвергнутых анализу, выделяется ряд классификационных признаков, которые в дальнейшем возможно использовать в качестве основы для выполнения всесторонней классификации широкого спектра представителей беспилотной авиации гражданского назначения.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, беспилотная авиационная система, БВС, БАС, БПЛА, дрон, беспилотник, классификация, аэродинамическая компоновка, особенности применения, анализ отрасли.

APPROACHES TO DESIGN AND PRACTICE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES OF THE AIRPLANE TYPE

*Sergey V. Skorobogatov,
orcid.org/0000-0002-9370-6402,
Candidate of Technical Sciences
Moscow State Technical University
of Civil Aviation (Irkutsk branch),
3, Kommunarov
Irkutsk, 664047, Russia
maestro.ru@mail.ru*

*Dmitry A. Buturov,
orcid.org/0009-0006-8996-8895,
Moscow State Technical University
of Civil Aviation (Irkutsk branch),
3, Kommunarov
Irkutsk, 664047, Russia
dimabatur345@gmail.com*

Abstract. Nowadays unmanned aviation has found wide application in many fields of human activity. Over the last two decades, such technology has moved from the category of military or experimental exotics to something applied and ubiquitous. Occupying more and more new spheres, unmanned aerial vehicles (UAVs) get all the new functions. For their implementation the designers often take quite bold decisions, which are rare in the «big» manned aviation. The article examines the current state of the civilian airplane-type UAVs industry in terms of their design features, as well as the specifics of their application in various sectors of the economy. The authors analyse the principles underlying the choice of this or that aerodynamic scheme of a UAVs on the process of its design. In the context of possible UAVs application scenarios the advantages and disadvantages as well as limitations of a particular UAVs airframe layout, applied engine unit and construction materials are under consideration. Based on a summary of the parameters analysed, it stands out a number of classification features, which can be used as a basis for a comprehensive classification of a wide range of unmanned civil aviation.

Keywords: unmanned aircraft, unmanned aviation system, UAV, UAS, drone, classification, aerodynamic layout, application features, industry analysis.

Введение

Дебют беспилотной авиации состоялся в 1849 году, во время осады Венеции Австрийской империей. Австрийская армия не могла подвести свою артиллерию достаточно близко к городу из-за его обороны, поэтому молодой австрийский лейтенант-артиллерист Франц фон Юхатиус предложил использовать воздушные шары, пущенные по ветру, для атаки на город. На шарах были установлены взрывчатка и взрыватель замедленного действия, который в расчетное время взрывал воздушный шар, в результате чего взрывчатка падала на город (рисунок 1).

Во время Первой мировой войны во многих передовых странах мира велись работы по созданию беспилотных летательных аппаратов, «летающих торпед» [Shaker et al., 1988; Van Wyen, 1969]. Несмотря на революционность этих немногочисленных машин, они не успели принять участия в войне. Тем не менее, начатые разработки продолжились в межвоенный период.

В 1931 году британские инженеры создали беспилотник-летающую мишень на основе биплана Fairey III, произведенный небольшой партией. Разработки продолжились, и в 1935 году была выпущена летающая мишень de Havilland Queen Bee на базе учебно-тренировочного биплана de Havilland Tiger Moth. Серия составила 405 экземпляров. Крыло не подверглось изменениям, но фюзеляж изготавливался отдельно – из дерева [Clark, 2000] (рисунок 2).

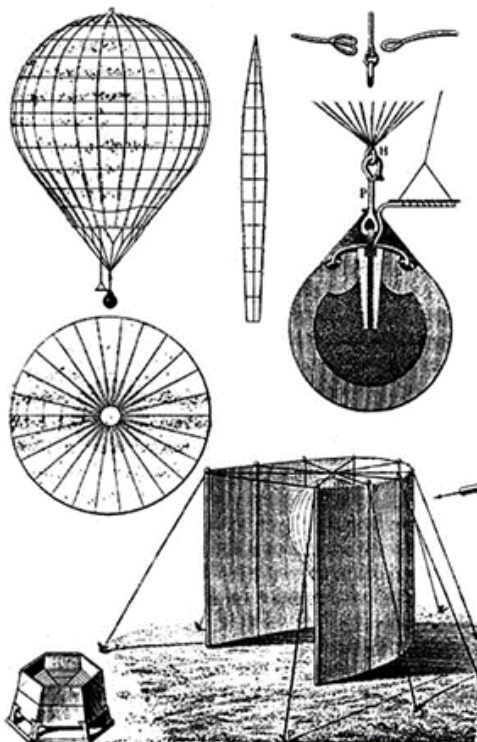


Рисунок 1 – Аэростат-бомбардировщик. *Источник: <https://goo.su/s8Wp8D>*



Рисунок 2 – Летящая мишень de Havilland Queen Bee.
Источник: <https://goo.su/s8Wp8D>

Аналогичные разработки велись в США: выпуск «радиопланов», применявшихся армией США в качестве летающей мишени, составил тысячи единиц. «Радиопланы» приводились в движение двухтактным двухцилиндровым двигателем. Взлёт осуществлялся с помощью разгонной катапульты. Несмотря на наличие шасси, посадка (если БВС не был сбит в ходе учений) осуществлялась с помощью парашюта, который открывался при отсутствии управляющего сигнала. В более поздних моделях «радиопланов» шасси отсутствовало (рисунок 3).



Рисунок 3 – «Радиоплан» во время подготовки к полёту.

Источник: <https://goo.su/nRXov>

В 1937-1940 годах в Советском Союзе, под руководством авиаинженеров С. Ф. Валка и В. В. Никитина, велась разработка «Планеров специального назначения». Предполагалось, что планер будет подниматься в воздух самолетом-носителем, а затем дистанционно наводиться на цель – по радио или инфракрасному лучу. «Планер специального назначения» представлял из себя цельнодеревянный низкоплан с трапециевидным крылом с ярко выраженной стреловидностью. Рули и элероны – дюралевые с обтяжкой полотном. Было произведено несколько экземпляров. Предполагалось, что носителем будет выступать самолёт ТБ-3 [Петров, 2000].

Первым массовым и широко применяющимся беспилотником стал немецкий самолет-снаряд Фау-1. Оснащенные пульсирующим воздушно-реактивным двигателем беспилотники могли развивать скорость до ~700 км/ч и нести боевую часть до 1000 кг. За годы войны было произведено около 30 тыс. единиц. Снаряд управлялся автопилотом, которому задавали курс и высоту полета (рисунок 4) [Sarhidai, 1986].

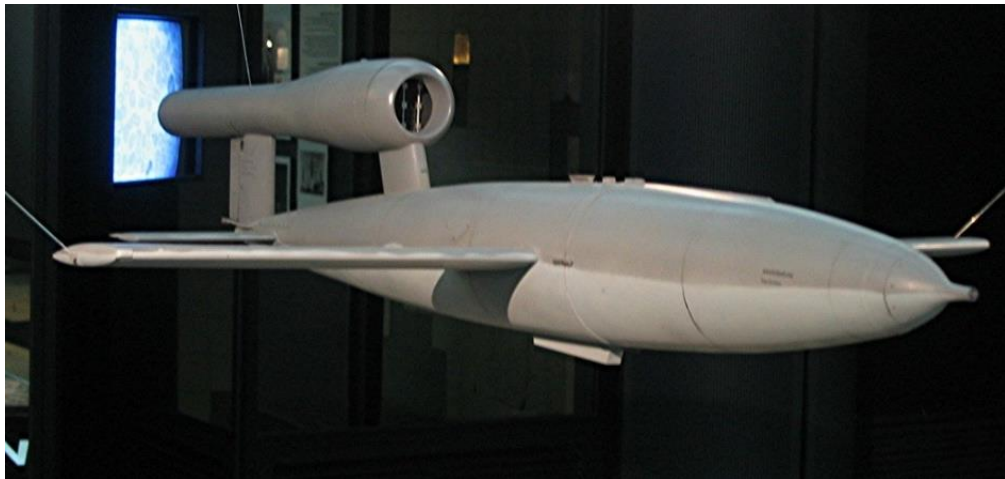


Рисунок 4 – БВС Фау-1. *Источник: <https://goo.su/tQzcN>*

В 1953 году компания «Northrop» начала работу над сверхзвуковым БВС «АQM-35». БВС совершил первый полёт в 1956 году. Он смог развивать скорость до 1,5 Маха. Предназначался для подготовки подразделений ПВО к борьбе со сверхзвуковыми самолётами, но программа была остановлена, поскольку аппарат развивал настолько высокую скорость, что системы не могли его зафиксировать [Pilóta nélküli..., 2013].

Во второй половине XX века ведущими странами мира широко использовались беспилотники-разведчики: советские Ту-123 «Ястреб», Ту-141 «Стриж» и Ту-143 «Рейс», американские «АQM-34» и более поздние MQ-1 «Predator», MQ-9 «Reaper» и другие (рисунок 5).



Рисунок 5 – Ту-143 «Рейс». *Источник: <https://goo.su/Jehasj>*

Во время Войны во Вьетнаме модели «АQM-34», находящиеся на вооружении 100-го разведывательного крыла США, совершили около 3,4 тыс. вылетов. Эти БВС имели и ударную конфигурацию, также применялись для

«вскрытия» расположения ракет противовоздушной обороны [Pilóta nélküli..., 2013].

В 1982 году, в ходе операции «Арцав-19», Израиль применил БПЛА IAI Scout и Mastiff (рисунок 6). Они проводили разведку сирийских аэродромов и осуществляли наблюдение за передвижением войск противника. По получаемым данным израильское командование принимало решения о нанесении ракетных ударов.

MQ-9 «Reaper», впервые поднявшийся в воздух в 2001 году, использовался для разведки на большой высоте, хотя его главной задачей оставалось нанесение ударов по наземным целям. Данные беспилотники показали самый высокий уровень эксплуатационной готовности из всех имеющихся в арсенале США, часто превышающий 99%.

Как видно из этой краткой исторической ретроспективы, БВС до последнего времени применялись в основном для военных целей. Однако сегодня для беспилотной авиации открываются всё новые ниши в различных отраслях гражданского сектора экономики.



Рисунок 6 – IAI Scout. *Источник: <https://goo.su/whu8>*

Развитие систем связи и навигации, удешевление электронных компонентов, развитие технологии аддитивного производства, а также широкое распространение и доступность химических источников питания на основе лития обеспечили огромный рост сферы беспилотной авиации за последние годы. Многим крупным изданиям, которые публиковали прогнозы касательно дальнейшего развития рынка БВС, пришлось неоднократно менять свои оценки. В 2014 году «Business Insider» опубликовал отчет о беспилотниках, в котором мировой рынок гражданских БВС к 2020 году оценивался примерно в 1 млрд долларов. Менее двух лет спустя в новом отчете сообщалось, что только поставки корпоративных беспилотников превысят 12 млрд к 2021 году [McNabb, 2016].

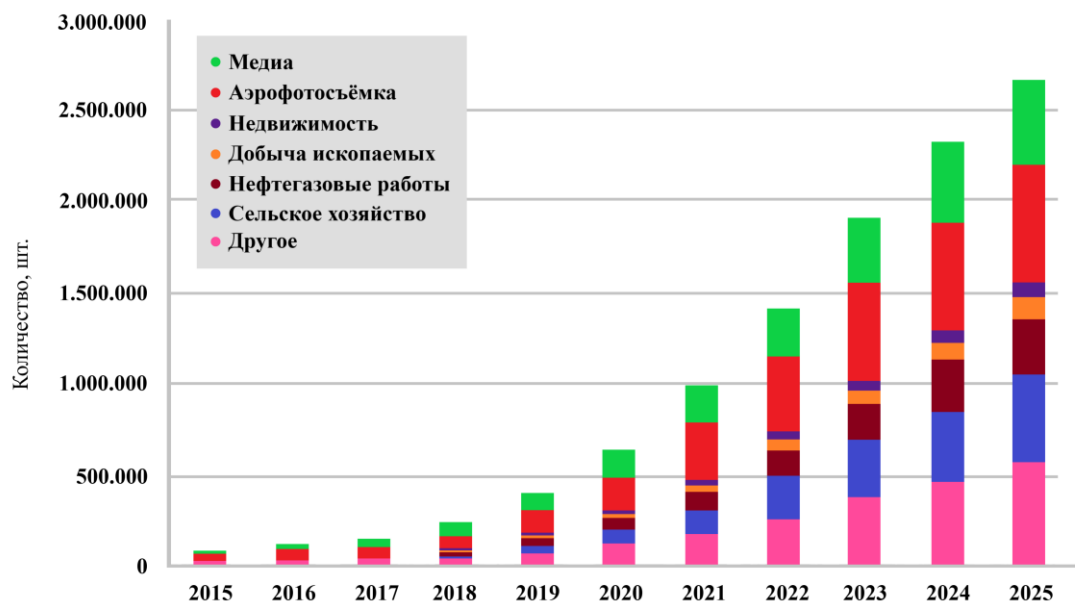


Рисунок 7 – Развитие отрасли БВС в последние годы и прогноз на ближайшие

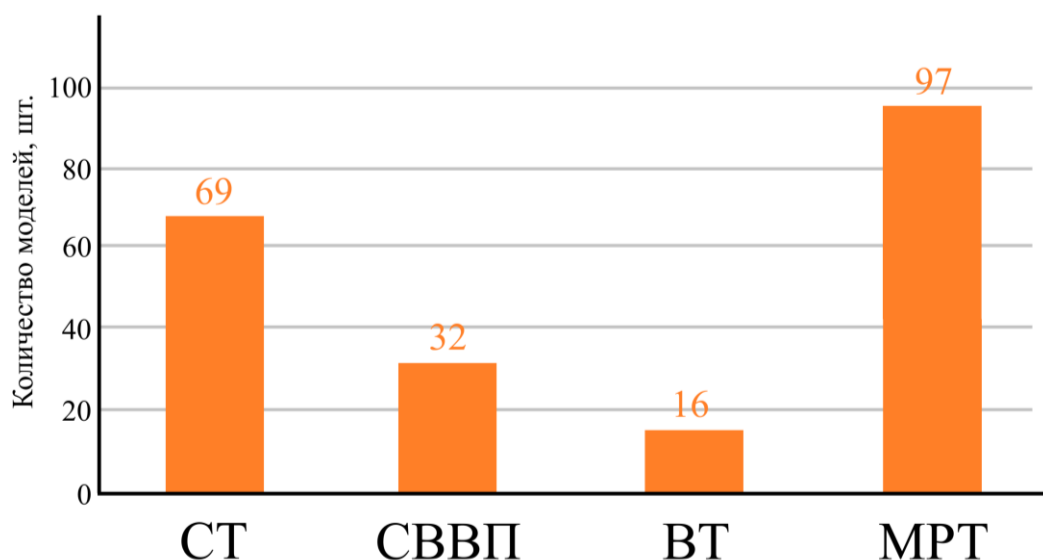
Материалы и методы

Поскольку данная научная статья носит обзорный характер, в работе использовался преимущественно метод анализа, а также статистический метод и метод прогнозирования.

Дискуссия

Рынок беспилотных авиационных систем (БАС) на сегодняшний день представлен БВС различного типа. По данным портала «аэронет», наибольшее распространение получили мультироторные БВС вертикального взлёта и посадки (рисунок 8). Причём разделение БВС на вертолётный и мультироторный тип в указанной классификации носит скорее условный характер, в связи с чем, данные две категории можно объединить в одну – БВС вертолётного типа, от чего доля таких аппаратов в общей массе станет ещё значительнее. Такая распространённость вертолётных БВС объясняется относительной простотой их устройства – применение электрической силовой установки на мультикоптерах позволяет обойтись без использования автомата перекося со сложной и ненадёжной механикой. В то же время, в отличие от БВС самолётного типа с вертикальным взлётом и посадкой, у чисто вертолётных БВС отсутствуют переходные режимы полёта от вертолётного к самолётному и обратно, которые представляют особую трудность в плане технической реализации и увеличивают стоимость разработки воздушного судна.

Несмотря на это, начать анализ рынка БАС хотелось бы с БВС самолётного типа, придерживаясь общей хронологии развития авиации как отрасли в целом.



СТ – самолётного типа; СВВП – самолётного типа с вертикальным взлётом и посадкой; VT – вертолётного типа; МРТ – мультироторного типа (мультикоптер)

Рисунок 8 – Доля различных типов БВС на рынке коммерческих БАС РФ.

Источник: <https://xn--2035-43d4a7chr0j.xn--p1ai/dashboard>

БВС самолётного типа имеют свои преимущества и недостатки. Из числа первых основным можно считать бóльшую эффективность в сравнении с вертолётными БВС [Panagiotou et al., 2019]. Поскольку на этапе горизонтального полёта используется неподвижное крыло, которое создаёт подъёмную силу в набегающем потоке, то самолётные БВС, как правило, имеют тяговооружённость меньше единицы, что предъявляет куда меньшие требования к габаритам и массе силовой установки и обеспечивает более продолжительный полёт на бóльшие дистанции при прочих равных условиях. Также данный тип БВС обладает более широким диапазоном высот и скоростей полёта, а простота конструкции планера с неподвижным крылом делает такие аппараты надёжными и относительно дешёвыми.

Основной недостаток самолётных БВС состоит в необходимости использования дополнительных мер для обеспечения взлёта и посадки. Помимо этого, для большинства БВС характерны малые линейные размеры относительно крупных пилотируемых самолётов, что неизбежно накладывает свой отпечаток на их лётно-технические и пилотажные характеристики. Такие БВС очень чувствительны к направлению и скорости ветра. В некоторых случаях тихоходные БВС самолётного типа не могут достичь положительной путевой скорости при встречном ветре, а наличие порывистого бокового ветра может приводить к частичной или полной потере управляемости самолёта, за счёт чего их использование возможно лишь в узком диапазоне погодных условий [Unconventional control..., 2018]. В то же время, самолётам требуется постоянное поступательное движение в воздушной среде, что делает невозможным применение такого типа БВС внутри тесных помещений. Малые линейные размеры дронов сопряжены с полётом при малых числах Рейнольдса, что требует дополнительных мер для предотвращения сваливания воздушного

судна на малых скоростях [Павленко и др., 2015, Low-Reynolds-number airfoil..., 2022].

Несмотря на вышеперечисленные недостатки, обратной стороной малых размеров большинства БВС самолётного типа является относительная простота обеспечения их взлёта и посадки, что вкупе с неоспоримыми преимуществами выводит такие БВС на первый план по соотношению цена/эффективность.

В хронологическом отношении самолёты возникли раньше вертолётов и за всю историю их существования инженерами и учёными предпринималось множество попыток усовершенствовать их внешний облик. На рисунке 9 была предпринята попытка представить значительную часть из всего разнообразия компоновочных схем воздушных судов самолётного типа.

Несмотря на столь богатую палитру схем, одной из самых распространённых по-прежнему продолжает оставаться нормальная аэродинамическая схема. Это объясняется тем, что при такой компоновке БВС облегчается балансировка корпуса относительно центра масс, обеспечивается большая свобода в расположении и выборе размеров аэродинамических поверхностей, а также в выборе схемы управления. При заднем расположении рулей, приложенные к корпусу изгибающие моменты оказываются сравнительно небольшими, что уменьшает нагрузку на него¹. Основной же недостаток данной схемы заключается в выраженных потерях на балансировку. Наиболее распространённый вариант нормальной схемы – высокоплан с классическим хвостовым оперением (рисунок 10а).

Высокопланы обладают рядом преимуществ, в частности это снижение вредной интерференции между крылом и фюзеляжем, широкий диапазон центровок, хорошая устойчивость. Поэтому если к БВС самолётного типа не предъявляются специальных требований, то конструкторы, как правило, выбирают именно такую компоновку.

¹ Аэродинамика: учебник / А. Г. Голубев, А. С. Епихин, В. Т. Калугин, А. Ю. Луценко. 3-е изд., испр. М. : МГТУ им. Баумана, 2017. 607 с. С. 356

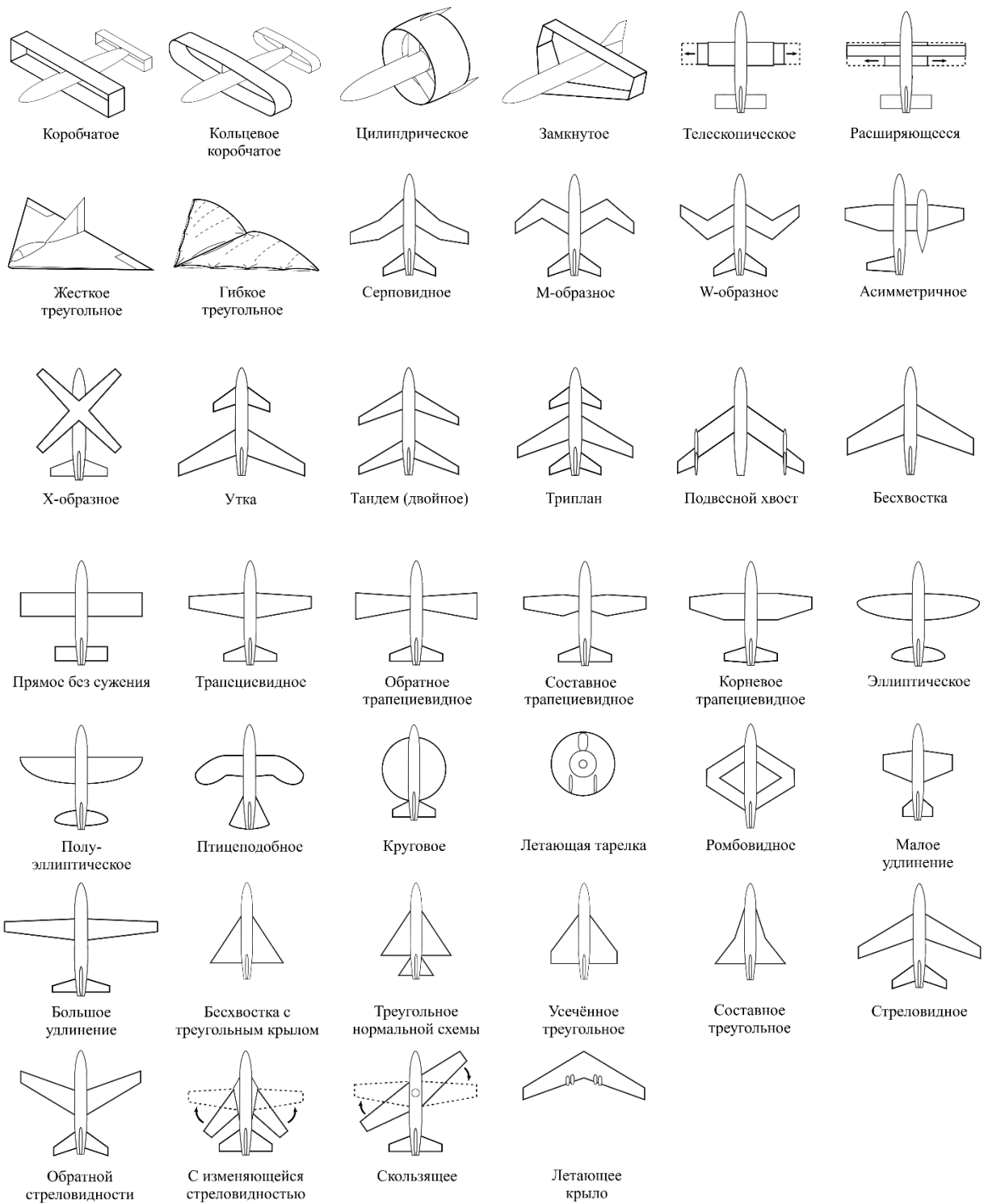


Рисунок 9 – Возможные варианты форм фюзеляжа и крыла в плане



а – высокоплан с классическим оперением;



б – низкоплан с Т-образным оперением



в – среднеплан с V-образным оперением Рудлицкого

Рисунок 10 – Вариации планера БВС нормальной аэродинамической схемы.

Источник: а – <https://goo.su/ZMJVF0>; б – <https://goo.su/5UBI8Q>;

в – <https://goo.su/LbkT>

Низкопланы (рисунок 10б) среди БВС встречаются довольно редко, поскольку данная схема менее устойчива в полёте, менее эффективна с аэродинамической точки зрения и неудобна в плане размещения полезной нагрузки. Однако подобное расположение крыла может иметь плюсы, характерные для представителей «большой» авиации: удобное обслуживание двигателей на крыле, принятие крылом ударной нагрузки при аварийной посадке, выраженное проявление экранного эффекта при полёте у поверхности. Поэтому такое компоновочное решение иногда принимается для достаточно крупных и тяжёлых БВС, осуществляющих взлёт и посадку с подготовленных аэродромов.

В отличие от «большой» авиации, среднепланы среди БВС довольно распространены. Прежде всего это объясняется снижением эффективной площади рассеивания (ЭПР) в боковой проекции, за счёт чего такую компоновку часто можно встретить среди военных БВС (рисунок 10в) [Вождаев и др., 2018]. Этими же соображениями продиктовано применение V-образного хвостового оперения, которое помимо снижения радиолокационной заметности также обеспечивает небольшое уменьшение массы конструкции планера и обладает наименьшим уровнем паразитной интерференции с фюзеляжем, в соответствии с рисунком 11 [Мерзликин, 1982, с. 64].

В некоторых случаях на БВС самолётного типа применяют Т-образное хвостовое оперение. Это позволяет избавиться от так называемого бафтинга – тряски, спровоцированной попаданием оперения в зону возмущённого крылом потока. В то же время, при такой компоновке снижается жёсткость оперения, что может привести к флаттеру¹ – сочетанию самовозбуждающихся незатухающих изгибающих и крутящих автоколебаний элементов оперения, способных привести к разрушению БВС в полёте.

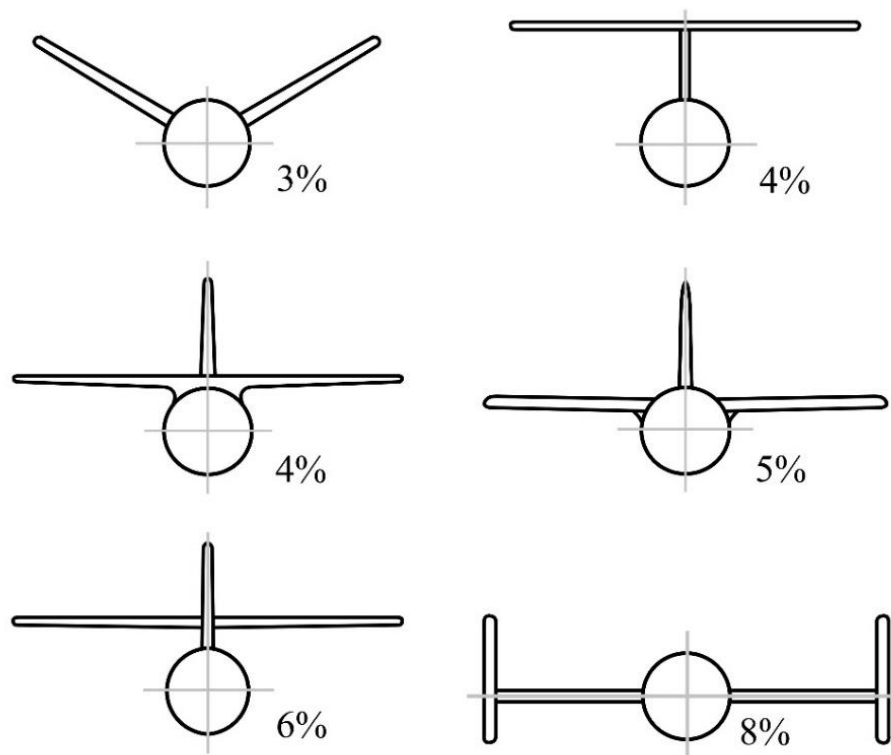


Рисунок 11 – Прирост сопротивления хвостового оперения за счёт интерференции с фюзеляжем при различных компоновочных схемах [Мерзликин, 1982, с. 64]

Второй достаточно распространённой среди БВС самолётного типа схемой является двухбалочная аэродинамическая схема (рисунок 12). Данную схему чаще всего используют при размещении толкающего винта за фюзеляжем, поскольку компоновка хвостового оперения позволяет обеспечить наибольшую эффективность такого решения. Также двухбалочная конструкция создаёт замкнутый силовой контур, за счёт чего обеспечивается очень высокая жёсткость всей конструкции. Силовые балки выступают хорошей основой для крепления двигателей и стоек шасси, за счёт чего к такой схеме также нередко прибегают на крупногабаритных БВС с двухмоторной силовой установкой (рисунок 12а). Помимо этого, именно по данной схеме обычно выполняют БВС с вертикальным взлётом и посадкой (ВВП) со сдвоенной винтомоторной группой (рисунок 12г). В этом случае группа подъёмных винтов очень

¹ Аэродинамика: учебник / А. Г. Голубев, А. С. Епихин, В. Т. Калугин, А. Ю. Луценко. 3-е изд., испр. М. : МГТУ им. Баумана, 2017. 607 с. С. 357.

гармонично вписывается в двухбалочный силовой каркас, в то время как позади фюзеляжа может быть расположен маршевый двигатель (часто внутреннего сгорания), не конфликтуя при этом с хвостовым оперением [Nugroho et al., 2022a; Wang et al., 2017].

Среди недостатков аналогично нормальной схеме – потери на балансировку и дополнительно увеличение массы и лобового сопротивления.



а – U-образное оперение, тянущие винты;



б – обратное V-оперение, толкающий винт;



в – П-образное оперение, толкающий винт;



г – адаптация схемы под ВВП

Рисунок 12 – Вариации планера БВС двухбалочной схемы.

Источник: а – <https://goo.su/W55NN>; б – <https://goo.su/SQmQ0ag>;

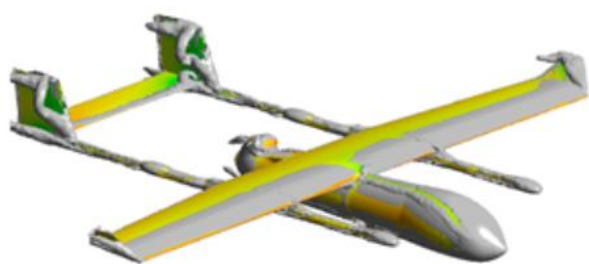
в – <https://goo.su/6RgWKz>; г – <https://goo.su/SvhU>

Что касается хвостового оперения, на двухбалочной схеме оно выбирается также исходя из множества факторов. Варианты компоновочных схем хвостового оперения весьма широки и разнообразны (рисунок 13).

Однако прежде всего, роль хвостового оперения состоит в обеспечении устойчивости БВС [Kurukularachchi et al., 2016, Static stability..., 2021]. Так, в работе [Nugroho et al., 2022b] были сопоставлены различные варианты хвостового оперения двухбалочной схемы. В результате исследований было установлено, что наилучшую боковую устойчивость обеспечивает обратное V-образное оперение с дополнительной горизонтальной проставкой (рисунок 14г). Таким образом, специалистами в области аэродинамики до сих пор выполняются поисковые исследования, направленные на улучшение характеристик уже известных и отработанных компоновочных решений.



Рисунок 13 – Возможные варианты компоновки хвостового оперения



а – U-образное оперение



б – П-образное оперение



в – обратное V-образное оперение



г – обратное V-обр. с горизонтальной проставкой

Рисунок 14 – Численное моделирование полёта со скольжением при различных компоновочных схемах элементов хвостового оперения [Nugroho et al, 2022b]

Нередко можно встретить БВС, выполненные по схеме бесхвостка. Чаще всего это летающее крыло – частный случай данной схемы, при которой фюзеляж практически полностью вырождается, переходя в одно целое с крылом самолёта (рисунок 15б, 15г). Данная схема привлекательна по многим

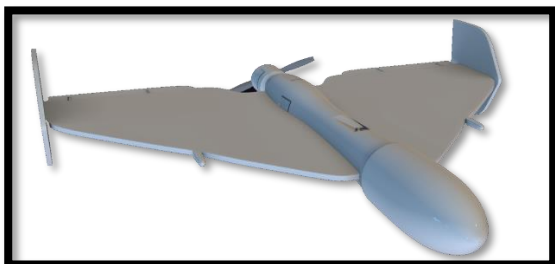
причинам. Во-первых, в ней наибольшая часть аэродинамических поверхностей участвует в создании подъёмной силы, за счёт чего в таких БВС можно достичь повышенной весовой отдачи планера [Конюхов, 2018]. Во-вторых, БВС такой схемы имеют самые большие линейные размеры крыла по хорде, что позволяет при уменьшении масштаба планера держать значения полётных чисел Рейнольдса на приемлемом уровне. По данной причине малогабаритные БВС часто выполняются в компоновке летающих крыльев. В-третьих, БВС рассматриваемой схемы имеют наименьшую лобовую проекцию, что востребовано в военных целях для снижения ЭПР [Вожаев и др., 2018].



а – адаптация схемы под ВВП



б – летающее крыло большого удлинения



в – концевые шайбы-стабилизаторы



г – летающее крыло малого удлинения

Рисунок 15 – Вариации планера БВС, выполненных по схеме бесхвостка.

Источник: а – <https://goo.su/KJZpp>; б – <https://goo.su/rweXT6>;

в – <https://goo.su/dHmS5>; г – <https://goo.su/qQbuSG>

Но данной схеме присущи и свои недостатки. Например проблемы с обеспечением устойчивости по всем осям. Так, для обеспечения продольной устойчивости такие БВС должны иметь S-образный профиль, который сильно ограничивает полётный диапазон C_y , либо необходимо наличие стреловидного крыла в сочетании с отрицательной круткой его концевых профилей [Alsahlan et al., 2017]. Положительная стреловидность по передней кромке крыла позволяет увеличить максимальную скорость полёта, но, в то же время, это увеличивает скорость сваливания самолёта и усложняет процесс расчёта при проектировании. Поскольку подавляющее большинство БВС самолётного типа эксплуатируется на скоростях $M < 0.4$, то наличие стреловидности не даёт каких-либо существенных преимуществ, за исключением некоторого роста путевой устойчивости. Кроме того, сама концепция летающего крыла зачастую

предполагает наличие большого количества поверхностей двойной кривизны и сложных геометрических переходов между ними по размаху крыла, что существенно усложняет производство и затрудняет закладывание в конструкцию планера возможности сборки и разборки для транспортировочных нужд. Также в связи с малыми плечами действия отклоняемых аэродинамических поверхностей, для обеспечения управляемости на малых скоростях у БВС данной схемы органы управления должны быть очень развитыми.

Аэродинамическую схему утка среди БВС можно встретить относительно нечасто. Объясняется это нюансами проектирования переднего горизонтального оперения, которые необходимо учесть для обеспечения стабильного полёта, особенно на этапе взлёта и посадки. В остальном данная схема обладает существенными преимуществами, среди которых отсутствие потерь на балансировку, а также чрезвычайно высокая устойчивость к штопорению [Panayotov et al., 2017]. Кроме того, данная схема хорошо адаптирована для выполнения ВВП (рисунок 16а).



а – адаптация схемы для ВВП;

б – концевые шайбы-стабилизаторы



в – интегральный планер с крылом переменной стреловидности

Рисунок 16 – Вариации планера БВС, выполненного по схеме утка. *Источник:*
а – <https://goo.su/2fRBo>; б – <https://goo.su/73yкzH>; в – <https://goo.su/z92Dh>

Замкнутое (кольцевое) крыло встречается очень редко. Тем не менее, существуют представители БВС такой схемы, в том числе и производимые серийно (Guizhou WZ-7, рисунок 17а), в связи с чем её нельзя отнести к чисто

экспериментальной. Данное решение привлекательно тем, что обеспечивает значительное снижение индуктивного сопротивления и расширяет диапазон докритических углов атаки, снижая тем самым скорость сваливания и увеличивая предельную дальность и продолжительность полёта. Также замыкание контура крыла существенно увеличивает жёсткость конструкции планера [Zafirov et al., 2014].



а – замыкание нормальной аэродинамической схемы;



б – замыкание летающего крыла

Рисунок 17 – Вариации планера БВС с замкнутым крылом.

Источник: а – <https://goo.su/XICXLMq>; б – <https://goo.su/OlrvNfR>

Ключевым недостатком замкнутого крыла является сложность проектирования с точки зрения как аэродинамических, так и прочностных расчётов. Кроме того, существуют исследования, результаты которых говорят о принципиальной возможности уменьшения индуктивных потерь до уровня замкнутого крыла на С-образных крыльях с разомкнутым контуром [Bikkannavar et al., 2016; Naveen, 2018; Skinner et al., 2018; Suresh et al., 2015]. Тем не менее, исследования БВС с такой аэродинамической схемой продолжаются.

Особенностью проектирования некоторых БВС самолётного типа является применение тонкого композитного крыла большого удлинения

($\lambda > 15$). В этом случае имеет место выраженный прогиб крыла в полётной конфигурации, что эквивалентно наличию положительной поперечной V (рисунок 18). Такое решение способствует сильному повышению поперечной статической устойчивости¹. Однако в некоторых случаях это может приводить к динамической неустойчивости БВС (голландский шаг).



Рисунок 18 – Прогиб упругого крыла большого удлинения как ожидаемое условие при лётной эксплуатации БВС.

Источник: а – <https://goo.su/e3zNvy>; б – <https://goo.su/b17KW>

В качестве основы силовой установки БВС самолётного типа применяются электрические двигатели, тепловые двигатели внутреннего сгорания (поршневые, газотурбинные), а также их комбинация (рисунок 19). Причём в сегменте малогабаритных БВС практически повсеместно доминируют электродвигатели, а в случае более крупных воздушных судов, как правило, используются поршневые двигатели. Гибридная силовая установка преимущественно применяется для БВС со сдвоенной винтомоторной группой (рисунок 12г). Газотурбинные двигатели используются редко, в основном на очень крупных и тяжёлых БВС, либо на БВС, которые должны быть способны развивать крайне высокую скорость.

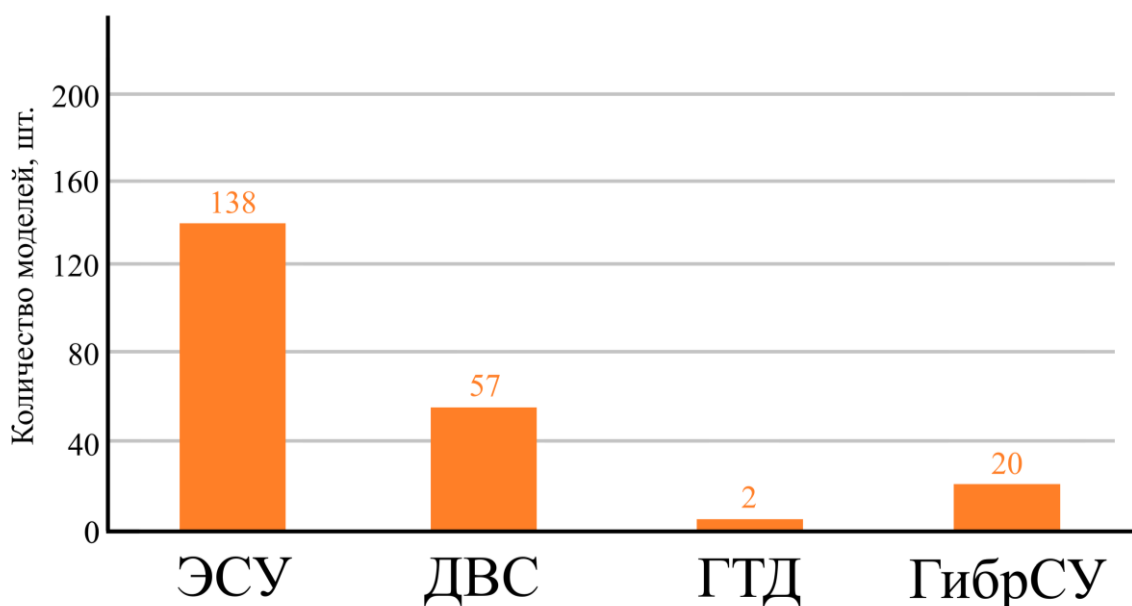
С точки зрения компоновки винтомоторной группы, у БВС самолётного типа применяются тянущие и толкающие винты. Причём в отличие от «большой» авиации, где использование толкающих винтов является скорее исключением, нежели правилом, в беспилотной авиации ситуация противоположна.

Размещение тянущего винта в носовой части фюзеляжа не выгодно с точки зрения качества обзора для подвесной фото-видеоаппаратуры. В случае применения поршневого двигателя, его размещение в носовой части фюзеляжа приводит к тепловому загрязнению планера и увеличению инфракрасной заметности, что очень критично для военных БВС [Макаренко и др., 2020].

Толкающий винт избавлен от вышеперечисленных недостатков. Кроме того, лёгкость и компактность электромоторов в совокупности с широким разнообразием применяемых аэродинамических схем БВС даёт возможность

¹ Баженов С. Г. Основы динамики полета: учебник. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2021. 432 с.

располагать толкающие винты в выгодных частях планера. Это позволяет раскрыть их аэродинамический потенциал и увеличить дальность и продолжительность полёта, что особенно важно для БВС, выполняющих функцию разведки и патрулирования.



ЭСУ – электрическая силовая установка; ДВС – силовая установка с поршневым двигателем внутреннего сгорания; ГТД – газотурбинная силовая установка; ГибрСУ – гибридная силовая установка

Рисунок 19 – Доля коммерческих БВС с различными типами силовой установки. *Источник: <https://xn--2035-43d4a7chr0j.xn--p1ai/dashboard>*

В случае наличия нескольких винтов, их обычно размещают на крыле и делают тянущими. Во-первых, это может быть удобно при определённых компоновочных решениях в конструкции планера (двухбалочная схема). Во-вторых, ометание воздушным потоком за винтом поверхности крыла обеспечивает прирост подъёмной силы и существенно увеличивает эффективность механизации. На БВС самолётного типа с ВВП класса «tailsitter» (рисунок 15а, 16а) размещение тянущих двигателей на крыле является важным условием для обеспечения управляемости в вертолётном режиме, но бывают и исключения. Например, компоновка импеллерных монокоптеров такого не предполагает (рисунок 20). Также на гражданских БВС, где фото-видеоаппаратуры нет, либо угол её обзора не конфликтует с элементами силовой установки (к примеру, некоторые геодезические БВС), можно встретить компоновочные решения с тянущим воздушным винтом, расположенным в носовой части фюзеляжа.

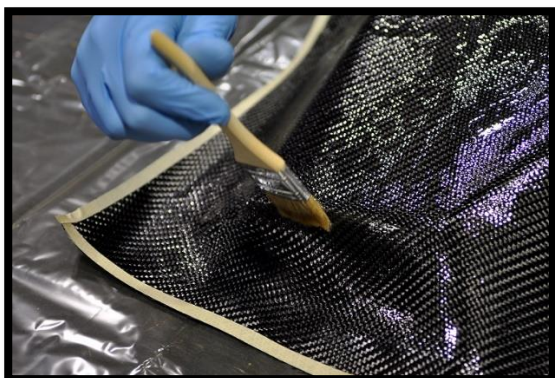
При выборе конструкционных материалов и технологии изготовления БВС самолётного типа, специалисты руководствуются целым рядом критериев, таких как габариты и масса будущего аппарата, его целевое назначение, объем производства и закладываемый ресурс. При этом можно выделить четыре основных группы материалов, используемых при производстве БВС.



Рисунок 20 – Импеллерный монокоптер с ВВП Martin UAV V-BAT.
Источник: <https://goo.su/q7mMj>

Вспененный полипропилен (рисунок 21б) применяется в основном на бюджетных и малогабаритных БВС. Ключевым преимуществом данного материала является высокая технологичность производства, поскольку с его помощью возможно изготавливать детали сложной геометрии путём подачи пенополипропилена в многоразовые формы [Steam-chest molding..., 2017]. Причем на этапе изготовления в форму конечного изделия возможно заложить технологические ниши и полости, которые в дальнейшем могут быть использованы для размещения полезной нагрузки, аккумуляторов, двигателей, бортовых электронных компонентов и элементов силового каркаса планера. Данный материал достаточно мягкий и эластичный, благодаря чему он способен амортизировать энергию удара в случае жесткой или аварийной посадки [Optimization..., 1995]. По этой же причине пенополипропилен весьма податлив при постобработке. Также он обладает крайне высокой ремонтопригодностью.

К недостаткам вспененного полипропилена можно отнести его невысокую прочность, а также большое объёмное заполнение, поскольку из данного материала невозможно изготавливать тонкостенные элементы. В связи с этим внутри планера остаётся меньше места под полезную нагрузку.



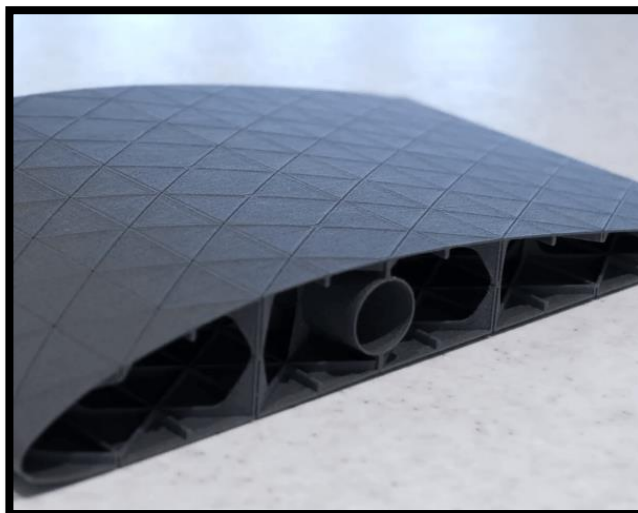
а – стекло- и углепластики;



б – вспененный полипропилен;



в – сотовпласты;



г – термопласты (3D печать)

Рисунок 21 – Основные конструкционные материалы, используемые при производстве БВС. *Источник:* а – <https://goo.su/GgIOdnQ>; б – <https://goo.su/JVOKUs>; в – <https://goo.su/eSe7H>; г – <https://goo.su/Sizlz4u>

В более габаритных БВС взлётной массой свыше 15 кг элементы из пенополипропилена практически не встречаются. Вместо этого используются сотовпласты или композитные материалы на основе стекло- угле- или иных волокон. Сотовпласты представляют из себя панель, в которой сотовый силовой каркас размещён между двумя частями листового материала (рисунок 21в). Механические свойства сотовпластовых заготовок, как и технология придания им необходимой формы, могут сильно отличаться в зависимости от материала, используемого при изготовлении сот [Equivalent mechanical..., 2023; Experimental investigation..., 2023; Flatwise compression..., 2022]. Чаще всего плоские заготовки из сотовпласта деформируются путём термоформовки по специальным матрицам, в результате это позволяет получить жёсткую и прочную конструкцию сложной аэродинамической формы, что в совокупности с низкой плотностью материала является неоспоримым преимуществом.

Самый существенный недостаток сотовпласта заключается в постоянстве сотовых структур по своей форме, составу и ориентации, что не позволяет задавать различные механические свойства конечного изделия в различных его частях. Хотя сейчас предпринимаются попытки нивелировать данный

недостаток путём топологической оптимизации сотовых структур [Shen et al, 2023]. Также сотопласты обеспечивают несколько меньшую свободу в плане сложности получаемых форм изделий в сравнении с остальными материалами.

Стекло- и углепластики в авиации применяются в основном для изготовления плоских силовых элементов путём раскроя листовых заготовок, либо для изготовления элементов сложной геометрии путём нанесения стеклоуглеткани на матрицу с последующим пропитыванием эпоксидными, полиэфирными, винилэфирными или фенольными смолами (рисунок 21а) [Путилина и др., 2023]. Такая технология предполагает большое количество ручной работы с токсичными материалами, которую практически невозможно автоматизировать на текущий момент. Это негативно сказывается на стоимости конечного изделия и времени его изготовления. Однако применение композитных материалов на основе углепластиков позволяет добиться наивыгоднейшего соотношения массы конструкции планера с его прочностными и ресурсными характеристиками, а также обеспечить изготовление тонкостенных элементов с геометрией почти любой сложности [A Review..., 2023]. При производстве крупных БВС с массой свыше 30 кг, композитные материалы не имеют альтернатив в принципе, кроме использования металлических сплавов в некоторых особонагруженных частях планера. Также определённые композиционные материалы обладают свойствами, обеспечивающими снижение радиолокационной и акустической заметности, за счёт чего они нашли применение в БАС военного назначения [Broadband stealth..., 2022; Motor noise..., 2022; Stealth technology..., 2019].

Аддитивные технологии (3D печать термопластичными полимерами) активно развиваются последние годы (рисунок 21г). На сегодняшний день существует принципиальная возможность печатать большие фрагменты БВС и даже весь планер полностью [Material Extrusion..., 2023]. При выполнении печати практически нет ограничений на сложность внутренней структуры изделия. Некоторые элементы, изготавливаемые на 3D принтере, в принципе не могут быть изготовлены как одно целое больше никаким другим способом [Additive manufacturing..., 2017]. А использование во время печати сразу нескольких материалов, обладающих различными свойствами (к примеру, токопроводящие материалы), позволяет обеспечить небывалый уровень технологичности изделия и высокую скорость проектирования [Термопластичные материалы..., 2017, Технологические..., 2017].

Основными недостатками 3D печати являются низкая прочность получаемого изделия ввиду особенностей спекания наплавливаемых слоёв материала, невысокая точность, связанная с температурными усадочными деформациями у некоторых материалов (особенно на крупных деталях), а также достаточно высокий процент брака при серийном производстве [Venturi et al., 2023]. В связи с этим, сегодня аддитивные технологии обычно носят вспомогательную функцию и применяются в основном для прототипирования, а также при изготовлении опытных образцов БВС и различной периферии (проставки, подвесы, кронштейны специальной формы и т.п.). В некоторых

случаях 3D печать может использоваться для штучного и мелкосерийного производства малогабаритных БВС или их отдельных элементов.

Существуют различные способы обеспечения взлёта и посадки БВС самолётного типа (рисунок 22, 23). Каждый из этих способов имеет свои преимущества, недостатки и ограничения.

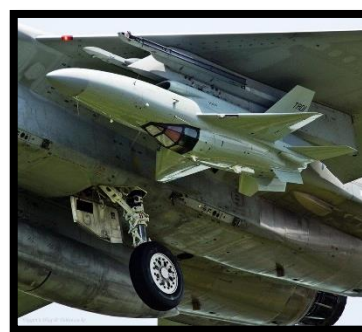
Традиционный вариант разбега самолёта по взлётно-посадочной полосе (ВПП) позволяет обеспечить взлёт воздушного судна любой весовой категории. Как правило, такой способ взлёта применяется у тяжёлых и крупногабаритных БВС, для которых взлёт иными способами организовать невозможно. Недостаток такого способа является продолжением его достоинства – обеспечение взлёта тяжёлых БВС требует подготовленного твёрдого покрытия, что привязывает базирование таких дронов к аэродромам или авианесущим крейсерам.



а – с разбегом по ВПП;



б – разгон катапультной;



в – запуск с носителя;



г – разгон леером;



д – запуск с руки;



е – реактивный или пневматический ускоритель

Рисунок 22 – Способы взлёта БВС самолётного типа. *Источник:*

а – <https://goo.su/9sCxl4u>; б – <https://goo.su/RzxrFNv>;

в – <https://goo.su/dqF6>; г – <https://goo.su/K1ka>;

д – <https://goo.su/5cZYCq>; е – <https://goo.su/UHzNtiO>

В случае старта БВС лёгкой весовой категории, взлёт допустимо организовать с помощью разгонной катапульты, которую можно относительно быстро собрать в полевых условиях. Плюсом выступает точность и повторяемость траектории запуска, а также контроль интенсивности разгона БВС. Минус состоит в необходимости операторов брать с собой данное устройство и тратить время на его монтаж/демонтаж.

Отчасти компенсировать недостатки, присущие катапульте, способен пневматический разгонный блок. В этом случае БВС выстреливается из заранее снаряжённого состояния за счёт энергии сжатого газа. Недостатком выступает необходимость наличия специального разгонного приспособления и адаптация конструкции планера под него, а также одноразовость такого приспособления (после запуска требуется устанавливать новый заряженный баллон) [Szczepaniak et al., 2017]. Поэтому данный способ в основном применяется на военных БВС класса барражирующий боеприпас.

Для запуска БВС средней весовой категории также может применяться реактивный ускоритель. Преимущества и недостатки у данного способа такие же, как и у пневматического. Отличие состоит в предельной массе БВС, взлёт которого может быть осуществлён таким образом.

В ряде случаев возможно применение леерного троса, что, с одной стороны, снижает общий вес БАС. С другой стороны, леер не даёт такого жёсткого ограничения траектории и интенсивности разгона как катапульта и успешность взлёта во многом зависит от опытности и слаженности действий оператора, запускающего БВС.

Взлёт очень лёгких БВС возможно осуществлять с рук. В этом случае отсутствует необходимость в наличии дополнительного оборудования для разгона БВС, но цена ошибки оператора при запуске дрона значительно возрастает.

В ряде случаев возможен запуск БВС с внешнего носителя – автомобиля, поезда, корабля или воздушного судна (в том числе и беспилотного). Преимуществом в данном случае выступает высокая мобильность и оперативность запуска с широким территориальным охватом. Как правило, это востребовано при использовании БВС в военных целях.

Для организации посадки также возможно применение ВПП. Однако не всегда посадка БВС предполагает наличие специально подготовленного покрытия.

Наиболее распространённым способом посадки многоцветного БВС самолётного типа является применение посадочных парашютов. Преимущество данного способа заключается в возможности осуществления безопасной посадки почти в любом месте без риска повредить БВС. Недостаток кроется в необходимости возить этот парашют на борту, а значит выделять под него полезный объём и снижать вес полезной нагрузки на величину веса парашюта. Также таким способом бывает проблематично организовать точную посадку на малогабаритную площадку, особенно в ветренную погоду, а посадка на движущийся корабль в принципе не возможна.

Использование посадочного троса или посадочных сетей позволяет уйти от недостатков, связанных с наличием парашюта на борту. Но тогда для безопасной посадки БВС необходимо размещение на посадочной площадке дополнительных приспособлений, а также тщательная доводка алгоритмов управления (при осуществлении посадки в автоматическом режиме) [Aerodynamic configuration..., 2023].



а – на парашюте;



б – с применением посадочного троса



в – посадка с пробегом по ВПП;



г – с помощью посадочных сетей

Рисунок 23 – Способы посадки БВС самолётного типа.

Источник: а – <https://goo.su/Gj87pi>; б – <https://goo.su/dj94>;

в – <https://goo.su/hn5vRa>; г – <https://goo.su/cg3IO7>

БАС самолётного типа нашли широкое применение в различных отраслях экономики. В гражданском секторе, чаще всего это съёмка земли с воздуха в различных вариациях (рисунок 24).

Функционал БАС самолётного типа крайне востребован в области землеустройства и кадастра, в частности при выполнении анализа землепользования, определении границ земельных участков, проведении инвентаризации, выявлении актов самозахвата земель [Овчинникова и др., 2019].

В области сельского хозяйства применение БАС позволяет осуществлять контроль агромероприятий, определять уровень биомассы по нормализованному относительному индексу растительности, выполнять химическую обработку с воздуха сельскохозяйственных культур [Использование беспилотных..., 2019].

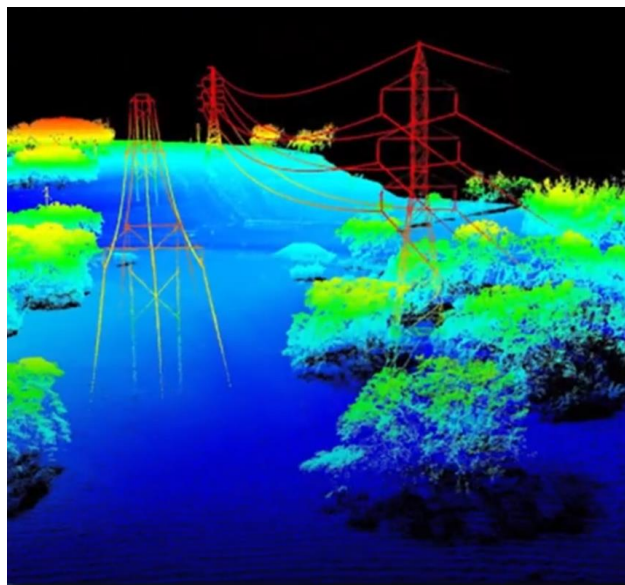
БАС находят своё применение в области дорожного хозяйства, а именно в анализе состояния дорожной инфраструктуры и контроля выполнения инженерных работ по строительству и ремонту дорожного полотна [Бреус и др., 2022; Суконников и др., 2017,].

В плане охраны окружающей среды БАС позволяют своевременно выявлять следы экологического бедствия, обнаруживать несанкционированные

свалки, осуществлять мониторинг популяции диких животных и многое другое [Второй и др., 2017; Опыт применения..., 2022].



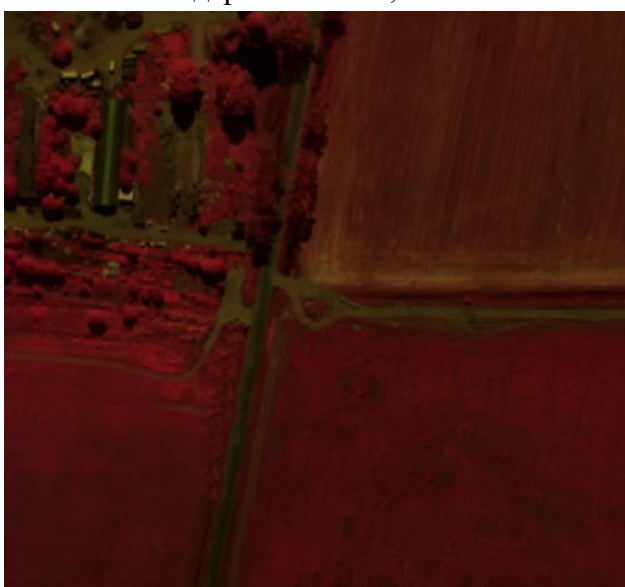
а – видео и аэрофотосъёмка;



б – лидарная съёмка;



в – тепловизионная съёмка;



г – мультиспектральная съёмка

Рисунок 24 – Функционал БАС в зависимости от имеющейся бортовой аппаратуры. *Источник: <https://goo.su/IVnQK>*

В сфере лесного хозяйства БАС чрезвычайно востребованы для проведения мониторинга, а также для анализа границ лесного фонда, участков вырубки, верификации мест рубок, таксации и учёта, определения породного состава лесов [Коптев и др., 2018; Скуднева, 2014].

БАС активно используются для координации служб при возникновении чрезвычайных ситуаций. Это обнаружение очагов лесных пожаров, поисково-спасательные работы и авиапатрулирование [Скуднева и др., 2020].

БАС также активно применяются для оказания содействия правоохранительным структурам. С их помощью может обеспечиваться

фиксация факта правонарушений, а также осуществляться сбор доказательной базы [Бегалиев, 2019; Котарев и др., 2017].



Рисунок 25 – Основные сферы применения БАС в гражданском секторе.

Источник: <https://goo.su/VjTNsOM>

Также имеет место применение БАС с целью доставки грузов. Хотя и для этих целей преимущественно используются БВС вертолётного типа, в ряде случаев встречаются исключения. Например, американская компания Zipline создала программу, включающую возможность доставки медикаментов и крови в Руанде. Такой способ доставки грузов показал высокую эффективность и надёжность (рисунок 26а). Также американской компанией Silent Arrow была представлена БАС GD-2000, позволяющая организовывать управляемый сброс

грузов с воздушного носителя с последующим автономным приземлением по указанным координатам (рисунок 26б).



а – грузовой дрон Zipline для оперативной доставки крови и медикаментов;



б – проект одноразового грузового БВС Silent Arrow GD-2000

Рисунок 26 – Применение БВС самолётного типа для доставки грузов.

Источник: а – <https://goo.su/wYB4>; б – <https://goo.su/TLZd>

Отдельного упоминания заслуживают стратосферные БВС, используемые в качестве псевдоспутников. Псевдоспутниками в контексте БАС принято называть БВС самолётного типа, которые способны выполнять длительный полёт на высотах около 20 км [Klimenko, 2018]. Для этого они имеют крыло свехрбольшого удлинения и малый вес планера. Наличие большого числа солнечных панелей позволяет им пребывать в воздухе длительное время, от нескольких дней до нескольких месяцев и даже более года (БВС PHASA-35).

Функционал псевдоспутников довольно широк. Они позволяют осуществлять длительное наблюдение за обширной территорией с возможностью оперативной передислокации. Также они могут применяться для координации действий различных гражданских служб или военных подразделений. Важнейшая функция псевдоспутников – это возможность ретранслировать сигнал с наземного, воздушного или космического источника с широким территориальным охватом [On the capabilities..., 2018].

Само по себе изготовление, запуск и обслуживание таких БВС обходятся в несколько десятков раз дешевле вывода спутника на орбиту Земли, а допустимая высота и продолжительность полёта современных стратолётов обеспечивают их тотальное доминирование на фоне аэростатных БВС.



Рисунок 27 – Применение БВС в качестве псевдоспутников.

Источник: <https://goo.su/DtnPz>

Результаты

Проанализировав текущее состояние отрасли БАС самолётного типа на предмет конструктивных особенностей БВС и специфики их применения, авторы выделили основные технические решения в области беспилотного самолётостроения. На основе обобщения параметров, подвергнутых анализу, можно выделить ряд классификационных признаков, которые в дальнейшем допустимо использовать в качестве основы для выполнения всесторонней классификации широкого спектра БВС гражданского назначения.

На сегодняшний день уже существуют всевозможные классификации БВС, к примеру одна из таких представлена в таблице 1 [Беспилотная авиация..., 2014, с. 82]. Однако подобные классификации не учитывают множество критериев БВС конкретного типа. Кроме того, они разрабатывались на том этапе развития беспилотной авиации, когда подавляющая её часть была

представлена в военной сфере. Сегодня ситуация изменилась. Появилось большое количество БВС, используемых чисто для гражданских нужд, что требует особого подхода при выполнении их классификации.

Таблица 1 – Классификация БВС по их лётным характеристикам

Группа	Категория		Взлётная масса, кг	Дальность полёта, км	Высота полёта, км	Продолжительность полёта, ч
	Рус.	Англ.				
Малые БЛА	Нано-БЛА	Nano	<0,025	<1	100	1
	Микро-БЛА	Micro (μ)	<5	<10	250	1
	Мини-БЛА	Mini	5-150*	<10	150-300*	<2
Тактические БЛА	Лёгкие для контроля края обороны	Close Range (CR)	25-150	10-30	3000	2-4
	Легкие с малой дальностью полёта	Short Range (SR)	50-250	30-70	3000	3-6
	Средние	Medium Range (MR)	150-500*	70-200	5000	6-10
	Средние с большой продолжит. полёта	Medium Range Endurance (MRE)	500-1500	>500	8000	10-18
	Маловысотные для проникновения в глубину обороны противника	Low Altitude Deep Penetration (LADP)	250-2500	>250	50-9000	0,5-1
	Маловысотные с большой продолжит. полёта	Low Altitude Long Endurance (LALE)	15-25	>500	3000	>24
	Средневысотные с большой продолжит. полёта	Medium Altitude Long Endurance (MALE)	1000-1500	>500	5000-8000	24-48
Стратегические БЛА	Высотные с большой продолжит. полёта	High Altitude Long Endurance (HALE)	2500-5000	>2000	20000	24-48
	Боевые (ударные)	Unmanned Combat Aerial Vehicles (UCAV)	>1000	1500	12000	2
БЛА специального назначения	Оснащенные боевой частью (летального действия)	Lethal (LET) (Offensive)	-	300	4000	3-4
	Ложные цели	Decoys (DEC)	150-500	0-500	50-5000	<4
	Стратосферные	Stratospheric (STRA)	>2500	>2000	>2000	>48
	Экзо-стратосферные	Exo-stratospheric (EXO)	-	-	>30500	-

* - зависит от ограничений, принятых в каждой конкретной стране

К числу выделенных классификационных признаков БВС самолётного типа можно отнести: аэродинамическую компоновку планера в целом с конкретизацией отдельных элементов (крыла, оперения, системы управления); тип используемой силовой установки; компоновку винтомоторной группы; компоновку шасси; способ осуществления взлёта и посадки; целевое назначение. Также следует принять во внимание массо-габаритные

характеристики БВС; предельные высоту, дальность и продолжительность полёта.

Что касается военных БВС, их количество и разнообразие также многократно возросло, как и их значимость в современных военных конфликтах. Поэтому таким БВС целесообразно иметь свою собственную, отдельную классификацию, которая должна составляться военными специалистами с учётом особенностей применения данных БВС по их целевому назначению [Евтодьева и др., 2019].

Заключение

В статье был рассмотрен широкий спектр критериев, обуславливающих выбор подхода к проектированию БВС самолётного типа. Произведён анализ факторов, влияющих на выбор того или иного компоновочного решения и технологии изготовления в контексте целевого назначения будущего БВС. На основании этого был сформулирован ряд классификационных признаков.

Поскольку самолётные БВС обладают своей спецификой, то распространять часть вышеупомянутых классификационных признаков на вертолётные БВС недопустимо. Однако исследование состояния отрасли вертолётных БАС выходит за рамки текущей статьи, поэтому для составления полной классификации рынка БАС необходимо продолжить работу в данном направлении.

Библиографический список

- Бегалиев Е. Н.* О перспективах применения беспилотных летательных аппаратов в ходе производства отдельных следственных действий // Вестник Восточно-Сибирского института МВД России. 2019. № 2(89). С. 163-172. DOI 10.24411/2312-3184-2019-00016. EDN ZTSUTZ.
- Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние / В. С. Фетисов, Л. М. Неугодникова, В. В. Адамовский, Р. А. Красноперов. Уфа: ФОТОН, 2014. 217 с.
- Бреус Н. Л.* Технологии беспилотного пилотирования при контроле строительства и эксплуатации линейных объектов капитального строительства / Н. Л. Бреус, А. Е. Токарев, А. А. Токарев // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14, № 3. С. 14. EDN YCKHWN.
- Вождаев В. В.* Характеристики радиолокационной заметности летательных аппаратов / В. В. Вождаев, Л. Л. Теперин. М.: Физматлит, 2018. 376 с
- Второй В. Ф.* Перспективы экологического мониторинга сельскохозяйственных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов / В. Ф. Второй, С. В. Второй // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2017. № 92. С. 158-166. EDN ZMEBEN.
- Евтодьева М. Г.* Беспилотные летательные аппараты военного назначения: тенденции в сфере разработок и производства / М. Г. Евтодьева, С. В. Целицкий // Пути к миру и безопасности. 2019. № 2(57). С. 104-111. DOI 10.20542/2307-1494-2019-2-104-111. EDN PGAVPH.
- Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве / Ю. Н. Зубарев, Д. С. Фомин, А. Н. Чащин, М. В. Заболотнова // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2019. № 2. С. 47-51. DOI 10.7242/2658-705X/2019.2.5. EDN TTLEP.
- Конюхов И. К.* Анализ применения аэродинамической схемы "летающее крыло" на беспилотных летательных аппаратах класса "воздух-поверхность" // Труды МАИ. 2018. № 99. С. 4. EDN OSRBXB.

Коптев С. В. О возможностях применения беспилотных летательных аппаратов в лесохозяйственной практике / С. В. Коптев, О. В. Скуднева // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2018. № 1(361). С. 130-138. DOI 10.17238/issn0536-1036.2018.1.130. EDN YNMFUDU.

Котарев С. Н. Использование беспилотных летательных аппаратов для обеспечения безопасности на объектах транспорта / С. Н. Котарев, О. В. Котарева, А. Н. Александров // Вестник Восточно-Сибирского института МВД России. 2017. № 4(83). С. 199-204. EDN YLQBDD.

Макаренко С. И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения / С. И. Макаренко, А. В. Тимошенко, А. С. Васильченко // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109-146. DOI 10.24411/2410-9916-2020-10105. EDN Y1BVMFH.

Мерзлякин В. Е. Радиоуправляемые модели планеров. М.: ДОСААФ, 1982. 160 с.

Овчинникова Н. Г. Применение беспилотных летательных аппаратов для ведения землеустройства, кадастра и градостроительства / Н. Г. Овчинникова, Д. А. Медведков // Экономика и экология территориальных образований. 2019. № 1. С. 98-108. DOI 10.23947/2413-1474-2019-3-1-98-108. EDN VUULFW.

Опыт применения БПЛА в экологических исследованиях популяции байкальской нерпы (*Pusa sibirica* Gm.) в период начала формирования береговых лежбищ / К. М. Иванов, А. Б. Купчинский, М. Е. Овдин [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 8(122). С. 5. DOI 10.23670/IRJ.2022.122.106. EDN ARRVEN.

Павленко А. М. Исследования обтекания модели летающего крыла при натуральных числах Рейнольдса / А. М. Павленко, Б. Ю. Занин, М. М. Катасонов // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. 2015. Т. 10. № 3. С. 19-25. EDN VHLLPJ.

Петров Г. Ф. Гидросамолёты и экранопланы России 1910-1999. РУСАВИА, 2000. 243 с.

Скуднева О. В. Беспилотные летательные аппараты в системе лесного хозяйства России // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2014. № 6(342). С. 150-154. EDN TALVRL.

Скуднева О. В. Навигационно-пилотажная система беспилотного летательного аппарата для мониторинга лесных пожаров / О. В. Скуднева, С. В. Коптев, С. В. Иванцов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 6(378). С. 194-203. DOI 10.37482/0536-1036-2020-6-194-203. EDN XPQVNO.

Суконников О. Г. Анализ применимости БПЛА при геодезическом контроле строящихся и эксплуатируемых автомобильных дорог / О. Г. Суконников, А. А. Неретин, В. А. Гурьев // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2017. № 2(9). С. 44-48. DOI 10.17273/CADGIS.2017.2.5. EDN XOSZNR.

Термопластичные материалы нового поколения для авиации / Г. Н. Петрова, С. А. Ларионов, М. М. Платонов, Д. Н. Перфилова // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 420-436. DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-S-420-436. EDN YRVMHN.

Технологические и электропроводящие свойства полимерных композиций на основе бутадиев-стирольного блока сополимера / А. Б. Глазырин, А. А. Басыров, А. И. Султанов [и др.] // Достижения науки и образования. 2017. № 1(14). С. 14-17. EDN XQSGUL.

A Review on Composite Aerostructure Development for UAV Application / S. M. F. B. S. Hairi, S. J. M. B. M. Saleh, A. H. Ariffin, Z. B. Omar // Green Hybrid Composite in Engineering and Non-Engineering Applications. 2023. P. 137-157.

Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential / G. D. Goh, S. Agarwala, G. L. Goh, V. Dikshit, S. L. Sing, W. Y. Yeong // Aerospace Science and Technology. 2017. Vol. 63. P. 140-151.

Aerodynamic configuration and control optimization for a novel horizontal-rope shipborne recovery fixed-wing UAV system / L. Chu, F. Gu, X. Du, M. Zhang, Y. He, C. Chen // Aerospace Science and Technology. 2023. Vol. 137. P. 108253.

Alsahlan A. A. Aerofoil design for unmanned high-altitude aft-swept flying wings / A. A. Alsahlan, T. Rahulan // *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2017. Vol. 9. P. 335-345.

Bikkannavar K. Investigation and design of a C-Wing passenger aircraft / K. Bikkannavar, D. Scholz // *INCAS Bulletin*. 2016. Vol. 8. № 2. P. 25.

Broadband stealth composite metastructure with high penetration protection / L. Liang, Y. Lin, Y. Huang, M. Chen // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2022. Vol. 160. P. 107069.

Clark R. M. Uninhabited combat aerial vehicles: airpower by the people, for the people, but not with the people. Alabama : Air University Press, 2000. 89 p.

Equivalent mechanical model of resin-coated aramid paper of Nomex honeycomb / J. Sun, Y. Wang, P. Zhou, M. Wang, R. Kang, Z. Dong // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2023. Vol. 240. P. 107935.

Experimental investigation on mechanical behaviors of composite sandwich panels with a hybrid facesheet / S. Zhu, Y. Wang, L. Zhou, W. Yi, L. Hu, J. Liu, X. Kang, H. Li // *Polymer Composites*. 2023. 44(6). p. 3196-3208.

Flatwise compression behavior of composite Nomex® honeycomb sandwich structure / W. Zhao, R. Jia, X. Li, J. Zhao, Z. Xie // *Journal of Sandwich Structures & Materials*. 2022. Vol. 24. № 2. P. 1169-1188.

Klimenko N. N. First Operational Pseudo-satellites for Military and Civil Users // *Aerospace Sphere Journal*. 2018. № 3(96). P. 64-77. DOI 10.30981/2587-7992-2018-96-3-64-77. – EDN UXASBM.

Kurukularachchi P. L. Stability analysis for a twin boom H-tail Medium Scale UAV through simulated dynamic model / P. L. Kurukularachchi, S. R. Munasinghe, H. De Silva // 2016 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon). IEEE, 2016. P. 415-420.

Low-Reynolds-number airfoil design optimization using deep-learning-based tailored airfoil modes / J. Li, M. Zhang, C. M. J. Tay, N. Liu, Y. Cui, S. C. Chew, B. C. Khoo // *Aerospace Science and Technology*. 2022. Vol. 121. P. 107309.

Material Extrusion Additive Manufacturing of the Composite UAV Used for Search-and-Rescue Missions / S. M. Zaharia, I. S. Pascariu, L. A. Chicos, G. R. Buican, M. A. Pop, C. Lancea, V. M. Stamate // *Drones*. 2023. Vol. 7. № 10. P. 602.

McNabb M. Changing Forecasts: The Drone Industry Surprise // [Электронный ресурс]. – 2016. URL: <https://dronelife.com/2016/04/08/comparing-drone-industry-forecasts/> (дата обращения 10.11.2023).

Motor noise reduction of unmanned aerial vehicles / H. Xu, D. Kong, Y. Qian, X. Tang // *Applied Acoustics*. 2022. Vol. 198. P. 108979.

Naveen R. Aerodynamic Analysis of C-Wing Aircraft // *INCAS Bulletin*. 2018. Vol. 10. № 3. P. 157-165.

Nugroho G. Aerodynamic Performance Analysis of VTOL Arm Configurations of a VTOL Plane UAV Using a Computational Fluid Dynamics Simulation / G. Nugroho, Y. D. Hutagaol, G. Zuliardiansyah // *Drones*. 2022a. Vol. 6. № 12. P. 392.

Nugroho G. Performance Analysis of Empennage Configurations on a Surveillance and Monitoring Mission of a VTOL-Plane UAV Using a Computational Fluid Dynamics Simulation / G. Nugroho, G. Zuliardiansyah, A. A. Rasyiddin // *Aerospace*. 2022b. Vol. 9. № 4. P. 208.

On the capabilities and limitations of high altitude pseudo-satellites / J. Gonzalo, D. López, D. Domínguez, A. García, A. Escapa // *Progress in Aerospace Sciences*. 2018. Vol. 98. P. 37-56.

Optimization of expanded polypropylene foam coring to improve bumper foam core energy absorbing capability / G. Frederick, G. A. Kaupp, C. M. Kudelko, P. J. Schuster, F. Domas, U. G. Haardt, W. Lenz // *SAE transactions*. 1995. P. 394-400.

Panagiotou P. Aerodynamic efficiency and performance enhancement of fixed-wing UAVs / P. Panagiotou, K. Yakinthos // *Aerospace Science and Technology*. 2019. Vol. 99. P. 105575. DOI 10.1016/j.ast.2019.105575.

Panayotov H. Experimental study of canard UAV aerodynamics / H. Panayotov, S. Penchev, D. Kolibarov // *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences. 2017. Vol. 133. P. 01002.

Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek / B. Békési, I. Makkay, M. Palik, Z. Bottyán, P. Dunai, T. A. Halászné, T. Wühl. Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2013. 323 p.

Sarhidai G. Robotrepülőgépek. Budapest: Zrínyi Katonai Kiadó, 1986. 63 p.

Shaker S. M. War Without Men: Robots on the Future Battlefield / S. M. Shaker, A. R. Wise. Washington: Pergamon-Brassey's, 1988. 196 p.

Shen B. Topology optimization of UAV structure based on homogenization of honeycomb core / B. Shen, H. Liu, S. Lv // *AIP Advances*. 2023. Vol. 13. № 5. P. 055223.

Skinner S. N. Study of a C-wing configuration for passive drag and load alleviation / S. N. Skinner, H. Zare-Behtash // *Journal of Fluids and Structures*. 2018. Vol. 78. P. 175-196.

Static stability analysis on twin tail boom UAV using numerical method / A. Septiyana, M. L. Ramadiansyah, E. B. Jayanti, K. Hidayat, A. Rizaldi, N. Atmasari, P. A. P. Suseno // *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2021. Vol. 2366. № 1. P. 030002.

Stealth technology: Methods and composite materials—A review / H. Ahmad, A. Tariq, A. Shahzad, M. S. Faheem [et al.] // *Polymer Composites*. 2019. Vol. 40. № 12. P. 4457-4472.

Steam-chest molding of expanded thermoplastic polyurethane bead foams and their mechanical properties / C. Ge, Q. Ren, S. Wang, W. Zheng, W. Zhai, C. B. Park // *Chemical Engineering Science*. 2017. Vol. 174. P. 337-346.

Suresh C. Aerodynamic performance analysis of a non-planar C-wing using CFD / C. Suresh, K. Ramesh, V. Paramaguru // *Aerospace Science and Technology*. 2015. Vol. 40. P. 56-61.

Szczepaniak P. Research of pneumatic distributors for launcher of unmanned aerial vehicle (UAV) / P. Szczepaniak, M. Jóźko // *Journal of KONBiN*. 2017. Vol. 43. № 1. P. 249-276.

Unconventional control solutions for small fixed wing unmanned aircraft / A. Panta, A. Mohamed, M. Marino, S. Watkins, A. Fisher // *Progress in Aerospace Sciences*. 2018. Vol. 102. P. 122-135.

Van Wyen A. O. Naval Aviation in World War I. Washington, D.C. : Chief of Naval Operations, 1969. 91 p.

Venturi F. Additive Manufacturing in the Context of Repeatability and Reliability / F. Venturi, R. Taylor // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023. P. 1-21.

Wang A. Conceptual Design of a QuadPlane Hybrid Unmanned Aerial Vehicle / A. Wang, A. R. Wang // 2017 AIAA Student Conference Region VII-AU. 2017. P. 6-11.

Zafirov D. Joined-wing test bed UAV / D. Zafirov, H. Panayotov // *CEAS Aeronautical Journal*. 2014. Vol. 6. № 1. P. 137-147.

References

Ahmad H., Tariq A., Shehzad A., Faheem M. S., Shafiq M., Rashid I. A., Khaliq Z. (2019). Stealth technology: Methods and composite materials—A review. *Polymer Composites*. 40(12): 4457-4472.

Alsahlan A. A., Rahulan T. (2017). Aerofoil design for unmanned high-altitude aft-swept flying wings. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 9: 335-345.

Begaliev E. N. (2019). On the prospects for the use of unmanned aerial vehicles during the production of certain investigative actions. *Bulletin of the East-Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2(89): 163-172. (in Russian)

Békési B., Makkay I., Palik M., Bottyán Z., Dunai P., Halászné T. A., Wühl T. (2013). Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek. Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2013. 323 p.

Bikkannavar K., Scholz D. (2016). Investigation and design of a C-Wing passenger aircraft. *INCAS Bulletin*. 8(2): 25.

Breus N. L., Tokarev A. E., Tokarev A. A. (2022). Technologies of unmanned piloting in the control of construction and operation of linear objects of capital construction. *Bulletin of Eurasian science*. 14(3): 14. (in Russian)

Chu L., Gu F., Du X., Zhang M., He Y., Chen C. (2023). Aerodynamic configuration and control optimization for a novel horizontal-rope shipborne recovery fixed-wing UAV system. *Aerospace Science and Technology*. 137: 108253.

- Clark R. M. (2000). Uninhabited combat aerial vehicles: airpower by the people, for the people, but not with the people. Alabama: Air University Press. 2000. 89 p.
- Evtodjeva M. G., Tselitsky S. V. (2019). Unmanned aerial vehicles for military use: trends in development and production. *Ways to Peace and Security*. 2(57): 104-111. (in Russian)
- Fetisov V. S., Neugodnikova L. M., Adamovsky V. V., Krasnoperov R. A. (2014). Unmanned aviation: terminology, classification, current state. Ufa: *PHOTON*, 2014. 217 p. (in Russian)
- Frederick G., Kaapp G. A., Kudelko C. M., Schuster P. J., Domas F., Haardt U. G., Lenz W. (1995). Optimization of expanded polypropylene foam coring to improve bumper foam core energy absorbing capability. *SAE transactions*. 394-400.
- Ge C., Ren Q., Wang S., Zheng W., Zhai W., Park C. B. (2017). Steam-chest molding of expanded thermoplastic polyurethane bead foams and their mechanical properties. *Chemical Engineering Science*. 174: 337-346.
- Glazyrin A. B., Basyrov A. A., Sultanov A. I., Zaripov T. F., Nurgaleev I. I. (2017). Technological and electrical conductive properties of polymer compositions based on butadiene-styrene block copolymer. *Dostizhenie nauki i obrazovanie*. 1(14): 14-17. (in Russian)
- Goh G. D., Agarwala S., Goh G. L., Dikshit V., Sing S. L., Yeong W. Y. (2017). Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential. *Aerospace Science and Technology*. 63: 140-151.
- Gonzalo J., López D., Domínguez D., García A., Escapa A. (2018). On the capabilities and limitations of high altitude pseudo-satellites. *Progress in Aerospace Sciences*. 98: 37-56.
- Hairi S. M. F. B. S., Saleh S. J. M. B. M., Ariffin A. H., Omar Z. B. (2023). A Review on Composite Aerostructure Development for UAV Application. *Green Hybrid Composite in Engineering and Non-Engineering Applications*. 137-157.
- Ivanov K. M., Kupchinsky A. B., Ovdin M. E., Petrov E. A., Syrovatsky A. A., Shabanov D. E. (2022). Experience of using UAV in ecological studies of the Baikal seal (*pusa sibirica* gm.) population during the period of the beginning of the formation of coastal rookeries. *International Research Journal*. 8(122): 5. (in Russian)
- Klimenko N. N. (2018). First Operational Pseudo-satellites for Military and Civil Users. *Aerospace Sphere Journal*. (3): 64-77.
- Konyukhov I. K. (2018). Analysis of the application of the aerodynamic scheme «flying wing» on unmanned aerial vehicles of the class «air-surface». *Proceedings of MAI*. 99: 4. (in Russian)
- Koptev S. V., Skudneva O. V. (2018). On the possibilities of using unmanned aerial vehicles in forestry practice. *Izvestia vysshee obrazovaniya. Forestry journal*. 1(361): 130-138. (in Russian)
- Kotarev S. N., Kotareva O. V., Aleksandrov A. N. (2017). The use of unmanned aerial vehicles to ensure security at transportation facilities. *Vestnik of the East-Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 4(83): 199-204. (in Russian)
- Kurukularachchi P. L., Munasinghe S. R., De Silva H. R. P. S. (2016). Stability analysis for a twin boom H-tail Medium Scale UAV through simulated dynamic model. In *2016 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*. 415-420.
- Li J., Zhang M., Tay C. M. J., Liu N., Cui Y., Chew S. C., Khoo B. C. (2022). Low-Reynolds-number airfoil design optimization using deep-learning-based tailored airfoil modes. *Aerospace Science and Technology*. 121: 107309.
- Liang L., Lin Y., Huang Y., Chen M. (2022). Broadband stealth composite metastructure with high penetration protection. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 160: 107069.
- Makarenko S. I., Timoshenko A. V., Vasilchenko A. S. (2020). Analysis of means and methods of counteraction to unmanned aerial vehicles. Part 1. Unmanned aerial vehicle as an object of detection and defeat. *Control Systems, Communications and Security*. 1: 109-146. (in Russian)
- McNabb M. (2016). Changing Forecasts: The Drone Industry Surprise. Available at: <https://dronelife.com/2016/04/08/comparing-drone-industry-forecasts/> (accessed 10 November 2023).
- Merzlikin V. E. (1982). Radio-controlled models of gliders. Ripol Classic. 1982. 160 p. (in Russian)
- Naveen R. (2018). Aerodynamic Analysis of C-Wing Aircraft. *INCAS Bulletin*. 10(3): 157-165.

- Nugroho G., Hutagaol Y. D., Zuliardiansyah G. (2022). Aerodynamic Performance Analysis of VTOL Arm Configurations of a VTOL Plane UAV Using a Computational Fluid Dynamics Simulation. *Drones*. 6(12): 392.
- Nugroho G., Zuliardiansyah G., Rasyiddin A. A. (2022). Performance Analysis of Empennage Configurations on a Surveillance and Monitoring Mission of a VTOL-Plane UAV Using a Computational Fluid Dynamics Simulation. *Aerospace*. 9(4): 208.
- Ovchinnikova N. G., Medvedkov D. A. (2019). Application of unmanned aerial vehicles for land management, cadastre and urban planning. *Economics and ecology of territorial formations*. 1: 98-108. (in Russian)
- Panagiotou P., Yakinthos K. (2020). Aerodynamic efficiency and performance enhancement of fixed-wing UAVs. *Aerospace Science and Technology*. 99: 105575.
- Panayotov H., Penchev S., Kolibarov D. (2017). Experimental study of canard UAV aerodynamics. *MATEC Web of Conferences. EDP Sciences*. 133: 01002.
- Panta A., Mohamed A., Marino M., Watkins S., Fisher A. (2018). Unconventional control solutions for small fixed wing unmanned aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*. 102: 122-135.
- Pavlenko A. M., Zanin B. Yu., Katasonov M. M. (2015). Investigations of a flying wing model streamline at natural Reynolds numbers. *Bulletin of Novosibirsk State University. Series: Physics*. 10(3): 19-25. (in Russian)
- Petrov G. F. (2000). Hydroplanes and wing-in-surface-effect vehicles of Russia 1910-1999. *RUSAVIA*, 2000. 243 p. (in Russian)
- Petrova G. N., Larionov S. A., Platonov M. M., Perfilova D. N. (2017). Thermoplastic materials of new generation for aviation. *Aviation materials and technologies*. S: 420-436. (in Russian)
- Sarhidai G. Robotrepülógépek. Budapest: Zrínyi Katonai Kiadó, 1986. 63 p.
- Septiyana A., Ramadiansyah M. L., Jayanti E. B., Hidayat K., Rizaldi A., Atmasari N., Suseno P. A. P. (2021). Static stability analysis on twin tail boom UAV using numerical method. *AIP Conference Proceedings. AIP Publishing*. 2366(1): 030002.
- Shaker S. M., Wise A. R. (1988). War without men. Robots on the future battlefield. Washington: Pergamon-Brassey's, 1988. 196 p.
- Shen B., Liu H., Lv S. (2023). Topology optimization of UAV structure based on homogenization of honeycomb core. *AIP Advances*. 13(5): 055223
- Skinner S. N., Zare-Behtash H. (2018). Study of a C-wing configuration for passive drag and load alleviation. *Journal of Fluids and Structures*. 78: 175-196.
- Skudneva O. V. (2014). Unmanned aerial vehicles in the system of forestry in Russia. *Izvestiya vysshee obrazovaniye. Lesnoy zhurnal*. 6(342): 150-154. (in Russian)
- Skudneva O. V., Koptev S. V., Ivantsov S. V. (2020). Navigation and piloting system of an unmanned aerial vehicle for monitoring forest fires. *Izvestia vysshee obrazovaniya. Forest journal*. 6(378): 194-203. (in Russian)
- Sukonnikov O. G., Neretin A. A., Guriev V. A. (2017). Analysis of the applicability of UAVs in geodetic control of roads under construction and in operation. *CAD and GIS of highways*. 2(9): 44-48. (in Russian)
- Sun J., Wang Y., Zhou P., Wang M., Kang R., Dong Z. (2023). Equivalent mechanical model of resin-coated aramid paper of Nomex honeycomb. *International Journal of Mechanical Sciences*. 240: 107935.
- Suresh C., Ramesh K., Paramaguru V. (2015). Aerodynamic performance analysis of a non-planar C-wing using CFD. *Aerospace Science and Technology*. 40: 56-61.
- Szczepaniak P., Józko M. (2017). Research of pneumatic distributors for launcher of unmanned aerial vehicle (UAV). *Journal of KONBiN*. 43(1): 249-276.
- Van Wyen A. O. Naval Aviation in World War I. Washington, D.C. : Chief of Naval Operations, 1969. 91 p.
- Venturi F., Taylor R. (2023). Additive Manufacturing in the Context of Repeatability and Reliability. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 1-21.

- Vozhdaev V. V., Teperin L. L. (2018). Characteristics of radar conspicuity of aircraft. Moscow: Fizmatit, 2018. 376 p. (in Russian)
- Vtoruj V. F., Vtoruj S. V. (2017). Prospects of environmental monitoring of agricultural facilities using unmanned aerial vehicles. *AgroEcoEngineering*. 92: 158-166. (in Russian)
- Wang A., Wang A. R. (2017). Conceptual Design of a QuadPlane Hybrid Unmanned Aerial Vehicle. In *2017 AIAA Student Conference Region VII-AU*. 6-11.
- Xu H., Kong D., Qian Y., Tang X. (2022). Motor noise reduction of unmanned aerial vehicles. *Applied Acoustics*. 198: 108979.
- Zafirov D., Panayotov H. (2015). Joined-wing test bed UAV. *CEAS Aeronautical Journal*. 6(1): 137-147.
- Zaharia S. M., Pascariu I. S., Chicos L. A., Buican G. R., Pop M. A., Lancea C., Stamate V. M. (2023). Material Extrusion Additive Manufacturing of the Composite UAV Used for Search-and-Rescue Missions. *Drones*. 7(10): 602.
- Zhao W., Jia R., Li X., Zhao J., Xie Z. (2022). Flatwise compression behavior of composite Nomex® honeycomb sandwich structure. *Journal of Sandwich Structures & Materials*. 24(2): 1169-1188.
- Zhu S., Wang Y., Zhou L., Yi W., Hu L., Liu J., Li H. (2023). Experimental investigation on mechanical behaviors of composite sandwich panels with a hybrid facesheet. *Polymer Composites*. 44(6): 3196-3208.
- Zubarev Y. N., Fomin D. S., Chashchin A. N., Zabolotnova M. V. (2019). Use of unmanned aerial vehicles in agriculture. *Vestnik of Perm Federal Research Center*. 2: 47-51. (in Russian)