

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА
AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

Солецкий В. В., Нюняйкина М. С., Перевалов А. А., Куриный В. В.
V. V. Soletsky, M. S. Nyunaykina, A. A. Perevalov, V. V. Kurinyi

ДВУХСРЕДНЫЙ БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ

TWO-MEDIUM UNMANNED AERIAL VEHICLE

Солецкий Вячеслав Вадимович – студент группы 4ТС1 самолётостроительного факультета Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел.: + 7 (929) 401-87-77. E-mail: ssf@knastu.ru.

Mr. Vyacheslav V. Soletsky – a student, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: + 7 (929) 401-87-77. E-mail: ssf@knastu.ru.

Нюняйкина Марина Сергеевна – студентка группы 5ТС1 самолётостроительного факультета Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел.: + 7 (924) 211-88-00. E-mail: ssf@knastu.ru.

Ms. Marina S. Nyunaykina – a student, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: + 7 (924) 211-88-00. E-mail: ssf@knastu.ru.

Перевалов Анатолий Анатольевич – кандидат технических наук, ведущий инженер-проектировщик Балтийского инжинирингового центра машиностроения (Россия, Калининград); 236022, г. Калининград, ул. Гайдара, 6. E-mail: Anatoly84@rambler.ru.

Mr. Anatoly A. Perevalov – PhD in Engineering, leading design engineer of the Baltic Engineering Center for Machine Building (Russia, Kaliningrad); 236022, Kaliningrad, 6 Gaidar str. E-mail: Anatoly84@rambler.ru.

Куриный Владислав Викторович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой систем автоматизированного проектирования Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Mr. Vladislav V. Kurinyi – PhD in Engineering, head of the Department of Computer Aided Design, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Аннотация. В статье представлен анализ основных направлений развития беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Отмечен интерес, проявляемый в мире к развитию двухсредных БПЛА. Приведены разработанные на данный момент двухсредные БПЛА. На основании анализа существующих схем двухсредных летательных аппаратов с учётом их слабых мест и недостатков предложена новая компоновочная схема БПЛА в виде конвертоплана. Описаны внешний вид и особенности устройства. Рассчитаны аэродинамические характеристики конвертоплана. Приведены исходные данные для аэродинамического расчёта. Построены поляры зависимостей $C_{xa}(C_{ya})$ и $K(C_{ya})$. Описаны особенности изготовления корпуса БПЛА с применением FDM-технологии на 3D-принтере. Представлены результаты проведённой работы.

Summary. The article presents an analysis of the main directions of development of unmanned aerial vehicles (UAVs). The interest shown in the world to the development of two-medium UAVs is noted. Given developed at the moment, dvuhsvetny UAV. Based on the analysis of the existing schemes of two-medium aircraft, taking into account their weaknesses and shortcomings, a new layout scheme of the UAV in the form of a tiltrotor is proposed. The appearance and features of the device are described. Aerodynamic characteristics of the tiltrotor are calculated. The initial data for aerodynamic calculation are given. Built polars dependency. Describes the features of the construction of the hull of the UAV with the use of FDM technology in 3D printer. The results of the work are presented.

Ключевые слова: БПЛА, двухсредный аппарат, конвертоплан, квадрокоптер, 3D-печать.

Key words: UAV, two-medium unmanned aerial vehicle, tiltrotor, quadcopter, 3D-printing.

УДК 629.735

Работа выполнена при поддержке программы «УМНИК» (Хабаровский край, Договор № 10978ГУ/2016 от 10.02.2017)

В настоящее время отрасль беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является самой перспективной и активно развивающейся. Стимулом к развитию отрасли БПЛА во всём мире служит успешное и широкое использование их армиями США и Израиля в ходе военных операций (Персидский залив, Югославия, Сирия и т. п.). При этом беспилотники зарекомендовали себя как эффективное средство разведки, сопровождения боя; в качестве ложных мишеней, средств доставки грузов и выполнения прочих боевых задач [1].

Однако область применения БПЛА в гражданских целях не менее широка. Это признают фактически все представители стратегических отраслей экономики России. Возможности БПЛА сегодня представлены в решении задач от проведения природоохранных мероприятий до функций мониторинга состояния различных объектов энергетического, топливно-энергетического и железнодорожного комплексов, а также в решении задач предотвращения последствий ЧС природного и техногенного происхождения [2].

Американский еженедельник Aviation Week & Space Technology со ссылкой на аналитиков компании Forecast International в начале 2014 года сообщил, что объём мирового рынка БПЛА в период с 2014 по 2018 год составит 67,3 млрд долларов. Около 35,6 млрд долларов будет израсходовано на производство беспилотных аппаратов, 28,7 млрд долларов – на проведение НИОКР в области беспилотной техники, два-три млрд долларов – на сервисное обслуживание БПЛА. Расходы распределяются следующим образом: производство БПЛА – 14,2 млрд долларов, производство наземных станций управления – 6,6 млрд долларов, выпуск бортовых полезных нагрузок – 14,8 млрд долларов [2].

По оценке ассоциации «АЭРОНЕТ», на гражданском рынке присутствуют 190 +/- 20 компаний, работающих на рынке гражданских БПЛА, имеющих возраст не более трёх лет и имеющих штат до пяти сотрудников. Их суммарная выручка оценивается ассоциацией в 1400 +/- 500 млн рублей. Деятельность этих компаний включает:

- производство и продажу собственных БПЛА и их комплектующих;
- дистрибуцию иностранных дронов и комплектующих;
- предоставление услуг на базе БПЛА (30 % компаний) [3].

Наряду с БПЛА разрабатываются и самоходные автономные необитаемые подводные аппараты (САНПА), они полностью автономны в энергетическом отношении и полностью (или почти полностью) – в информационном. Самоходные автономные необитаемые подводные аппараты являются полным аналогом беспилотных летательных аппаратов, однако среды, в которых они действуют, отличаются тем, что плотность воды в 775 раз выше плотности воздуха. Принципиально различаются и условия распространения физических полей (акустического, электромагнитного, электрического).

Однако известны попытки создания аппаратов, способных двигаться как в воздухе, так и под водой; известны немногочисленные проекты двухсредных аппаратов – летающих подводных лодок (ЛПЛ). [3]. К таким проектам можно отнести ЛПЛ Ушакова, Американский RFS-1 Рейда, СПЛ-1 Четверикова и немногие другие. Все они были революционны, разрабатывались в середине XX века и проектировались как пилотируемые аппараты, однако, к сожалению, так и остались на уровне разработок. Из них самые известные Naviator, SubMurre, Loon Copter.

Naviator – американский беспилотный многоцелевой дрон-амфибия, разработанный специалистами Университета Рутгерса ВМС США. Он проектировался для эксплуатации не только в гражданской, но и военной сфере, что было обусловлено широкими функциональными и эксплуатационными возможностями этого летательного аппарата. *Naviator* был разработан в конфигурации мультикоптера, что позволяет летательному аппарату эксплуатироваться в любых условиях

местности, осуществляя взлёт и посадку в вертикальной плоскости, при этом имея довольно компактные размеры (см. рис. 1) [4].

Беспилотный летательный аппарат оборудован восемью электрическими двигателями, способными разогнать летательный аппарат до максимальной скорости полёта в 40 км/ч при автономности нахождения в воздухе до 30 мин [4].

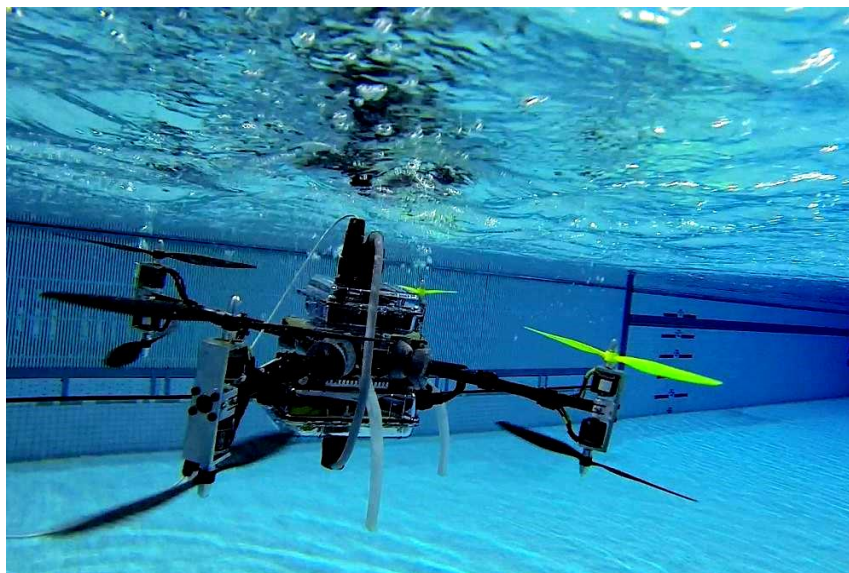


Рис. 1. Двухсредный беспилотный летательный аппарат Naviator

SubMurre – это беспилотная субмарина, способная совершать управляемый полёт. Она разработана компанией Inposop (см. рис. 2). Аппарат имеет все характерные черты субмарины: обтекаемый корпус, два винта, вертикальные, горизонтальные рули и даже подобие рубки, из которой может выдвигаться перископ. Для полёта по воздуху используются четыре традиционных ротора, которые прячутся внутрь корпуса в подводном положении. Аппарат оснащён датчиками и камерами, которые позволяют ему контролировать состояние окружающей среды и производить съёмку [6].

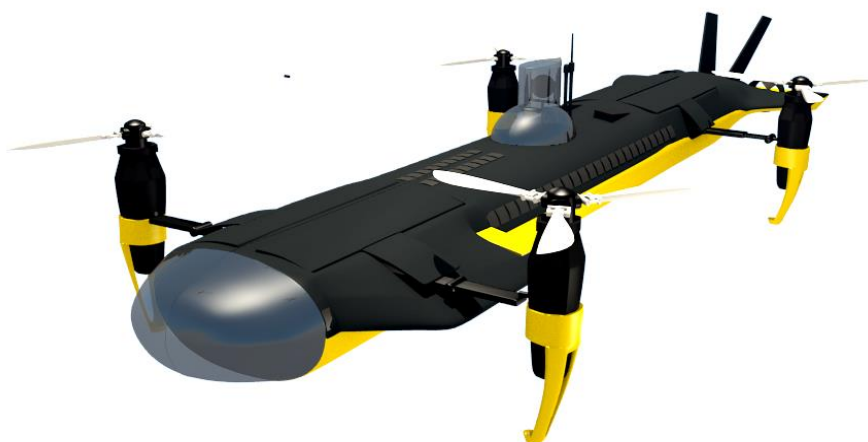


Рис. 2. Беспилотная летающая субмарина SubMurre

Источником энергии для двигателей и электронного оборудования является гибридная дизель-электрическая система. Дизельный двигатель может приводить в движение роторы аппарата напрямую и использоваться для подзарядки аккумуляторных батарей, из которых аппарат, находясь в подводном положении, черпает энергию [6].

Управление субмариной осуществляется дистанционно при помощи беспроводных технологий, аппарат не привязывается к базе кабелем даже во время работы в подводном положении [6].

На рис. 3 изображён *Loon Copter* – двухсредный беспилотный летательный аппарат, созданный специалистами из университета Окленда (Oakland University). Он летает точно таким же способом, как и любой другой квадрокоптер. Когда он касается поверхности воды, то плавает на поверхности в вертикальном положении, а чтобы погрузиться, использует свои балластные ёмкости [8].

Балластные ёмкости аппарата расположены таким образом, что после погружения он принимает горизонтальное положение. Передвижение под водой осуществляется с помощью медленного вращения роторов аппарата, слаженная работа которых даёт ему возможность неплохо маневрировать под водой.

Двигаясь по горизонтали при помощи роторов и по вертикали за счёт изменения количества воды в балластных ёмкостях, аппарат может вести видеосъёмку и собирать любые данные при помощи дополнительных датчиков [8].

Когда аппарату требуется вновь подняться на поверхность, он продувает балластные ёмкости и выныривает на поверхность, принимая вертикальное положение [8].

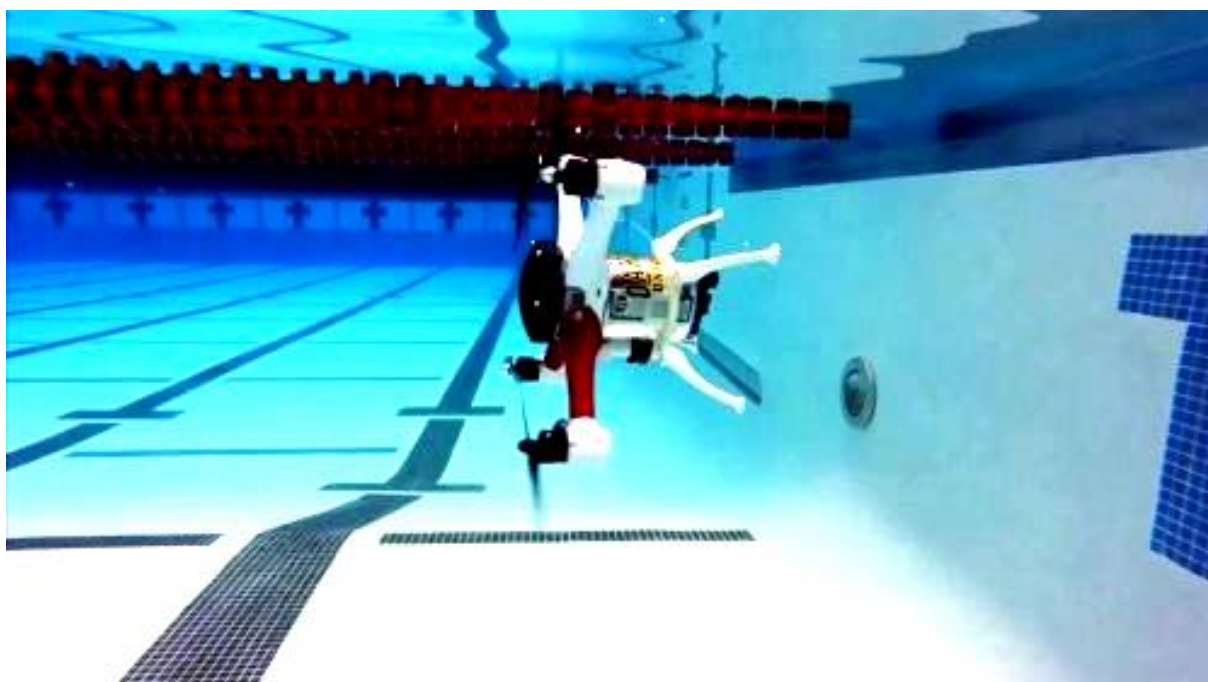


Рис. 3. Двухсредный беспилотный летательный аппарат Loon Copter

На основании анализа существующих схем двухсредных летательных аппаратов с учётом их слабых мест и недостатков нами предлагается новая компоновочная схема аппарата, которая позволит, на наш взгляд, получить лучшие лётно-технические и эксплуатационные характеристики.

Предлагаемый двухсредный БПЛА (см. рис. 4) выполнен в герметичном корпусе интегральной компоновки, имеющем в сечении форму аэродинамического профиля, с плавным переходом в консоли малого удлинения, поворачивающиеся вокруг поперечной оси и снабжённые электродвигателями с установленными в них воздушными винтами.

Таким образом, данный аппарат является конвертопланом, что позволяет получить ряд преимуществ. С консолями, поднятыми вертикально, аппарат может совершать взлёт и посадку, в том числе и на воду, без риска повреждения винтов и корпуса, а также зависать и разворачиваться на месте. А с консолями, опущенными горизонтально (далее – в горизонтальном положении), он движется «по-самолётному», что позволяет развивать высокую скорость и преодолевать большие расстояния как в воздухе, так и под водой при сравнительно меньшем энергопотреблении.

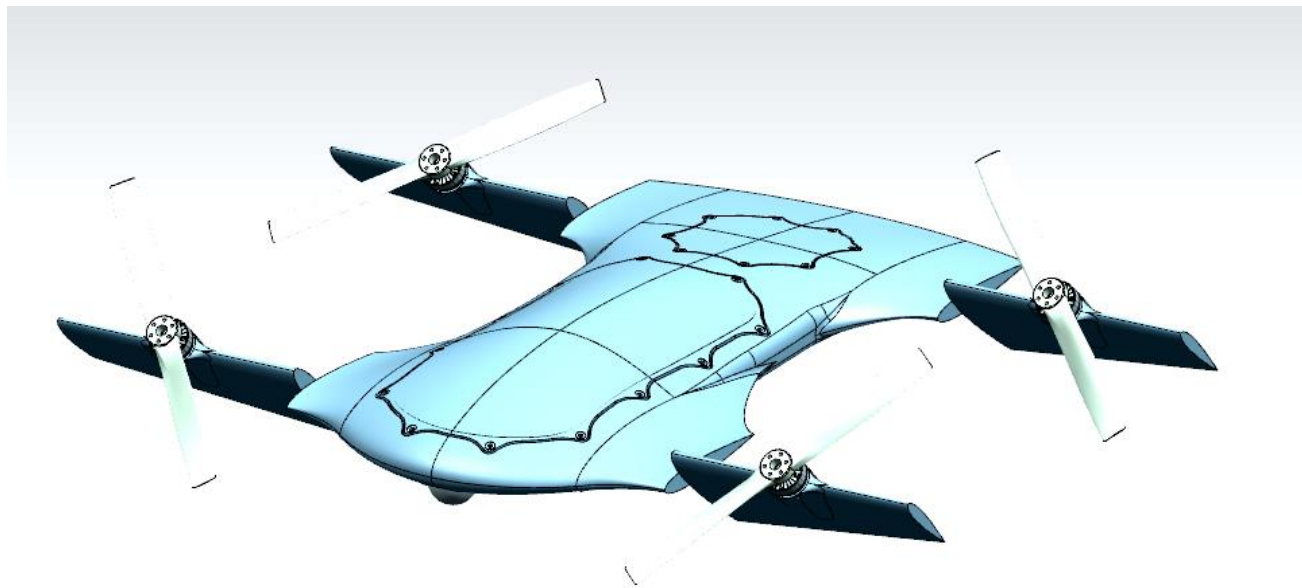


Рис. 4. Внешний вид разрабатываемого двухсредного беспилотного летательного аппарата

Кроме того, в горизонтальном положении, за счёт отклонения консолей на небольшие углы, можно полноценно управлять аппаратом, что позволяет избавиться от иной механизации.

Поворот консолей осуществляется сервоприводами через полый вал, установленный на подшипниках, внутри которого проложены провода, соединяющие электродвигатель и регулятор оборотов. Питание оборудования осуществляется от бортовых аккумуляторных батарей через распределитель питания, служащий также для контроля напряжения батареи и потребляемого тока, а функции стабилизации в воздухе и автопилота выполняет контроллер полёта. На аппарате предусмотрены небольшие балластные баки, наполняемые при необходимости в погружении.

В качестве привода винтомоторной группы используются бесколлекторные двигатели с электронной коммутацией обмоток, что позволяет отказаться от герметизации валолинии привода, а герметизировать только неподвижные кабельные вводы-выводы. На аппарате предусмотрена возможность дистанционного управления по радиоканалу, передачи данных телеметрии по выделенному цифровому каналу и передачи аналогового видеосигнала.

Габаритные размеры аппарата показаны на рис. 5.

Максимальную взлётную массу было решено ограничить 5 (пятью) кг, чтобы аппарат попал под классификацию мини-БПЛА ближнего действия.

В качестве расчёта аэродинамических характеристик двухсредного БПЛА проведём расчёт поляры зависимости коэффициента сопротивления самолёта от коэффициента подъёмной силы $C_{xa}(C_{ya})$ и поляры зависимости аэродинамического качества от коэффициента подъёмной силы $K(C_{ya})$ аппарата во время движения в горизонтальном положении.

Схема БПЛА подразумевает, что аппарат состоит из трёх крыльев – корпуса, выполненного в форме крыла (фюзеляж), переднего крыла (крыло), заднего крыла (горизонтальное оперение).

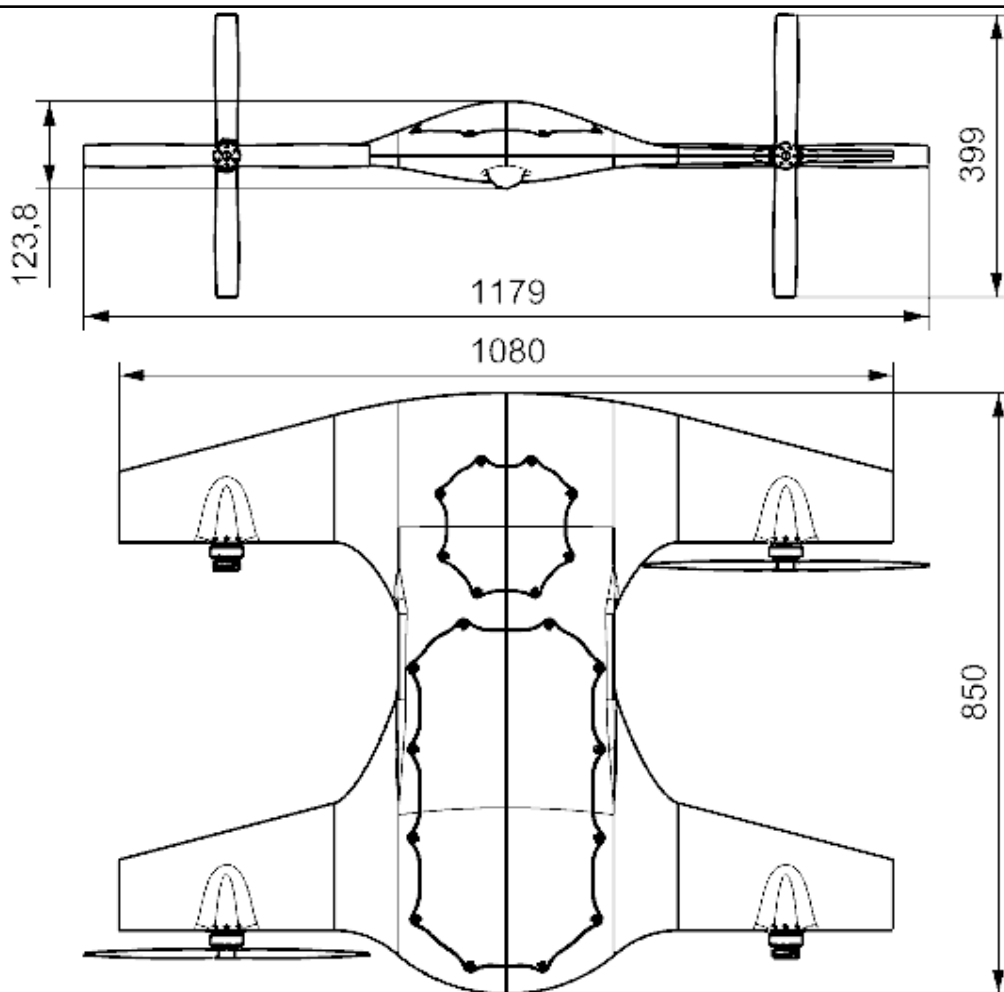


Рис. 5. Габаритные размеры двухсредного БПЛА

В табл. 1 приведены данные о БПЛА, которые были использованы для аэродинамических расчётов.

Таблица 1

Исходные данные для расчёта

Элемент самолёта, параметр	Размерность	Обозначение, формула	Значение
1. Крыло и горизонтальное оперение			
1.1. Размах крыла	м	l	1,08
1.2. Размах консолей крыла	м	$l_k = l - D_\phi$	0,78
1.3. Хорда центральная	м	b_0	0,28
1.4. Хорда концевая	м	b_k	0,1
1.5. Сужение в плане		$\eta_b = b_0 / b_k$	2,8
1.6. Площадь	м ²	S	0,21
1.7. Хорда средняя	град	$b = S / l$	0,19



Продолжение табл. 1

Элемент самолёта, параметр	Размерность	Обозначение, формула	Значение
1.8. Стреловидность по линии максимальных толщин	град	χ_c	-6
1.9. Стреловидность по линии 1/4 хорд	град	$\chi_{1/4}$	-5
1.10. Стреловидность по линии 1/2 хорд	град	$\chi_{1/2}$	-9,5
1.11. Стреловидность по передней кромке	град	$\chi_{п.к.}$	0
1.12. Геометрическое удлинение крыла		$\lambda = l^2 / S$	5,68
1.13. Геометрическое удлинение консолей крыла		$\lambda_k = l_k^2 / (S - S_\phi)$	4,73
1.14. Относительная толщина профиля центрального		\bar{c}_0	0,1
1.15. Относительная толщина профиля концевое		\bar{c}_k	0,14
1.16. Средняя относительная толщина профиля		$\bar{c} = (\bar{c}_0 \cdot \eta_b + \bar{c}_k) / (\eta_b + 1)$	0,11
1.17. Относительная координата максимальной толщины		$\bar{x}_c = x_c / b$	0,2
1.18. Относительная координата точки перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный		\bar{x}_τ	0
1.19. Относительная кривизна профиля	%	\bar{f}	0
1.20. Относительная координата кривизны профиля		\bar{x}_f	0
1.21. Угол закрутки концевое сечения	град	φ_k	0
1.22. Угол атаки нулевой подъёмной силы	град	α_0	0
1.23. Относительная площадь крыла, занятая фюзеляжем		$\bar{S}_\phi = S_\phi / S$	0,37
1.24. Относительная площадь крыла, занятая гондолами двигателей		$\bar{S}_{г.д} = S_{г.д} / S$	0,01
1.25. Относительная площадь, не участвующая в обтекании потоком		$\Sigma \bar{S}_i = \bar{S}_{г.д} + \bar{S}_{г.д}$	0,38
1.26. Множитель		$k_{эф}$	1
1.27. Удлинение эффективное		$\lambda_{эф} = \lambda / (1 + \Sigma \bar{S}_i)$	4,1
1.28. Производная коэффициента подъёмной силы по углу атаки	1/град	C_{ya}^α	0,03
2. Фюзеляж			
2.1. Размах	м	l	0,3
2.2. Хорда центральная	м	b_0	0,85
2.3. Хорда концевая	м	b_k	0,79

Продолжение табл. 1

Элемент самолёта, параметр	Размерность	Обозначение, формула	Значение
2.4. Сужение в плане		η_b	1,08
2.5. Площадь	m^2	S	0,25
2.6. Хорда средняя	м	b	0,83
2.7. Стреловидность по линии тах-х толщин	град	χ_c	0
2.8. Стреловидность по линии 1/4 хорд	град	$\chi_{1/4}$	0
2.9. Стреловидность по линии 1/2 хорд	град	$\chi_{1/2}$	0
2.10. Стреловидность по передней кромке	град	$\chi_{п.к.}$	0
2.11. Геометрическое удлинение крыла		λ	0,36
2.12. Относительная толщина профиля центрального		\bar{c}_0	0,14
2.13. Относительная толщина профиля концевого		$\bar{c}_к$	0,11
2.14. Средняя относительная толщина профиля		\bar{c}	0,13
2.15. Относительная координата максимальной толщины		x_c	0,2
2.16. Относительная координата точки перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный		$\bar{x}_т$	0,2
2.17. Относительная кривизна профиля	%	\bar{f}	2,5
2.18. Относительная координата кривизны профиля		\bar{x}_f	0,25
2.19. Угол закрутки концевого сечения	град	$\varphi_к$	0
2.20. Угол атаки нулевой подъёмной силы	град	α_0	-2,69
2.21. Множитель		$k_{эф}$	1
2.22. Удлинение эффективное		$\lambda_{эф}$	0,361
2.23. Производная коэффициента подъёмной силы по углу атаки	1/град	C_{ya}^α	0,017
3. Гондолы двигателя			
3.1. Длина	м	$l_{г.д.}$	0,069
3.2. Диаметр миделя	м	$D_{г.д.}$	0,051
3.3. Площадь миделя	m^2	$S_{г.д.}$	0,04
3.4. Относительная площадь миделя		$\bar{S}_{г.д.} = S_{г.д.} / S$	0,2
3.5. Удлинение		$\lambda_{г.д.}$	1,35

Элемент самолёта, параметр	Размерность	Обозначение, формула	Значение
4. Воздушный винт			
4.1. Диаметр	м	D_B	0,356
4.2. Расстояние от плоскости винта до $\frac{1}{4}$ хорды крыла по оси двигателя	м	x_B	0,071
4.3. Площадь, ометаемая винтом	м ²	$S_{ом} = \pi \cdot D_B^2 / 4$	0,099
4.4. Относительная площадь крыла, обдуваемая винтами		$\bar{S}_{обд}$	0,622
5. Общие данные			
5.1. Взлётная масса самолёта	кг	m_0	5
5.2. Расчётная скорость полёта	км/ч	V	72
5.3. Расчётная высота полёта	км	H	0
5.4. Тип и количество двигателей		n	4
5.5. Стартовая тяга одного двигателя при $V=0$, $H=0$; винт 14 дюймов, 18 ампер	дан	P_{oi}	0,16

По данным, приведённым в табл. 1, был произведён аэродинамический расчёт аппарата, результатом которого стали поляры зависимости $K(C_{ya})$ и $C_{xa}(C_{ya})$ (см. рис. 6 и 7).

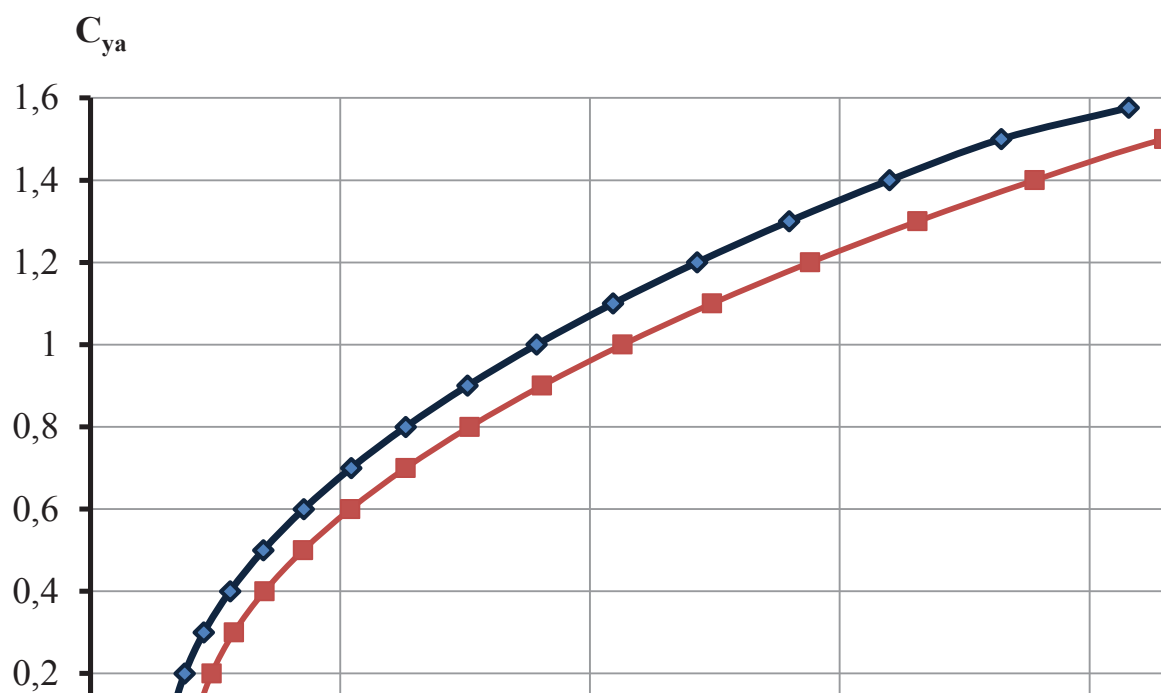


Рис. 6. Поляра зависимости $C_{xa}(C_{ya})$

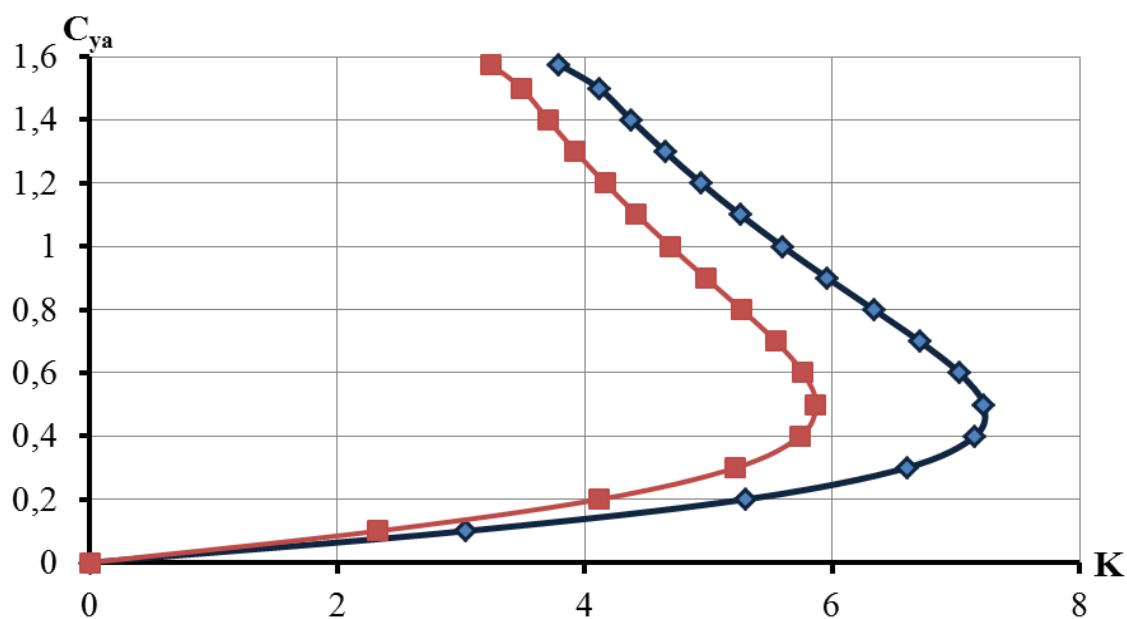


Рис. 7. Поляра зависимости $K(C_{ya})$

Корпус, консоли, крышки и крепёжные детали прототипа изготавливались методом FDM 3D-печати, что позволило сэкономить время на прототипирование и получить точные внешние обводы. В качестве пластика был выбран PLA-пластик, он не токсичен, так как производится из кукурузы или сахарного тростника, имеет минимальную усадку и гладкую поверхность напечатанных деталей; кроме того, легко окрашивается и подвергается механической обработке, обладает стойкостью к большинству растворителей.

Из-за габаритных размеров аппарата, а также сложности внешнего обвода печать корпуса одной деталью не представляется возможной. Поэтому было решено разделить корпус на 12 деталей, соединяемых между собой при сборке посредством штифтов и клея, как это показано на рис. 8. В свою очередь, каждая из крышек была разделена только на две детали, а консоли и вообще печатались целиком.

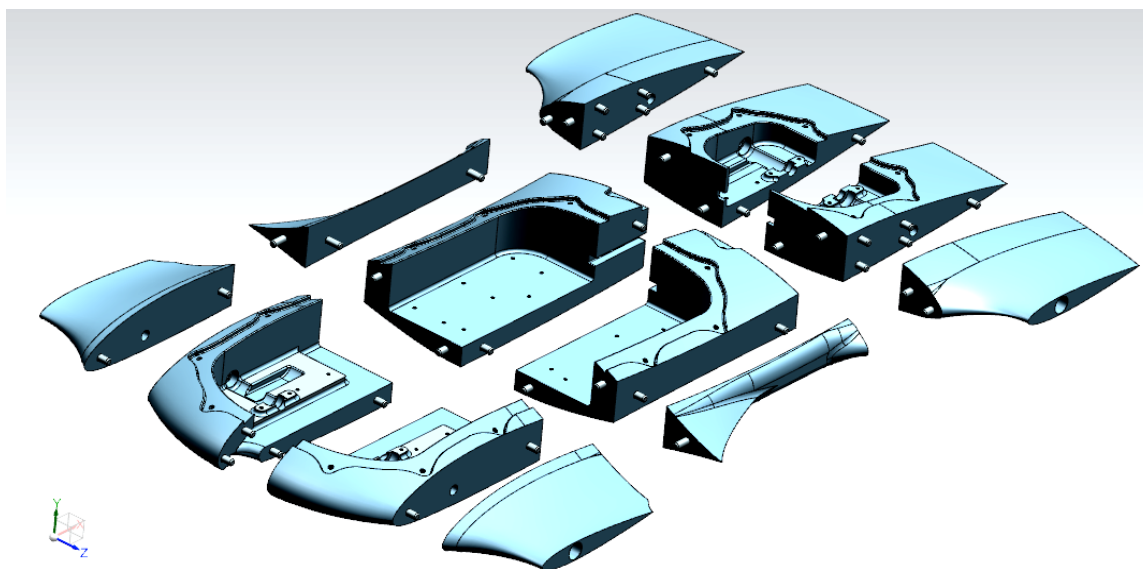


Рис. 8. 3D-модель деталей корпуса аппарата

На рис. 9 показан процесс печати консоли аппарата.

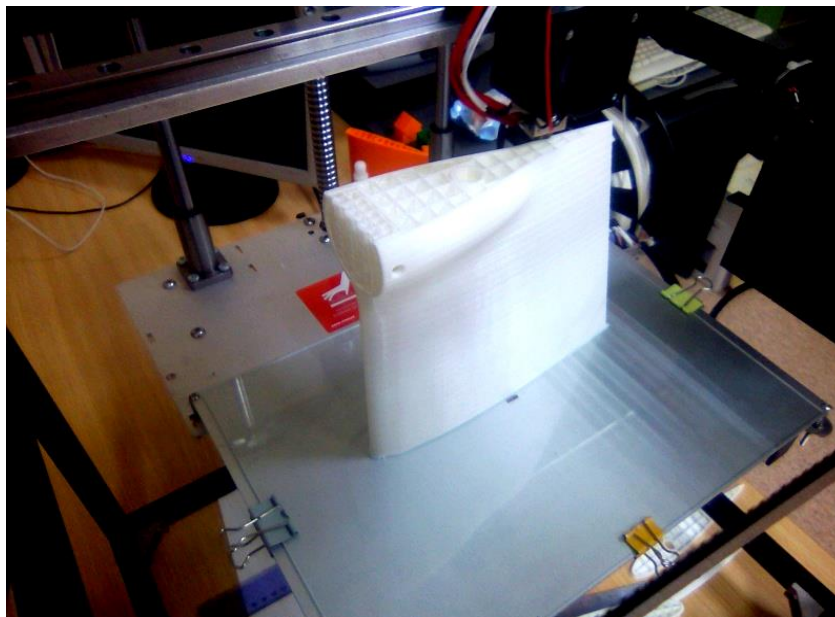


Рис. 9. Процесс печати консоли аппарата

Собранный беспилотный летательный аппарат изображён на рис. 10.



Рис. 10. Собранный двухсредный беспилотный летательный аппарат

На основе вышеизложенного сформулируем вывод о потенциальной реализуемости проекта в виде опытного изделия. Исследования аналогов позволяют судить о перспективности исследований в области создания двухсредных аппаратов. На данный момент существует множество аппаратов, сходных с разрабатываемым по области применения, но ни один из них на данный момент не выпускается серийно и ограничивается единичными экземплярами в рамках НИР. Всё это говорит о перспективности данного направления и одновременно о малой конкуренции в связи с недостаточным спросом на них.

Результаты проведённой работы на данном этапе:

1. Осуществлён подбор комплектующих к конвертоплану.
2. В подводных условиях проведены тестирование и настройка системы связи, в том числе видео.
3. Отработаны параметры погружения и подводного хода аппарата.
4. Проведены тестовые испытания и устранены ошибки.

Результаты данного этапа необходимы для дальнейшего развития проекта. Планируется участие в программе «Старт» в 2019 году.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зинченко, О. Н. Беспилотные летательные аппараты: применение в целях аэрофотосъёмки для картографирования [Электронный ресурс] / О. Н. Зинченко // Ракурс: программные решения в области геоинформатики, цифровой фотограмметрии и дистанционного зондирования. – 2011. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=681> (дата обращения: 18.04.2018).
2. Жолымбаев, А. О. Особенности гражданского применения беспилотных летательных аппаратов на примере возможностей их использования при ликвидации чрезвычайных ситуаций [Электронный ресурс] / А. О. Жолымбаев. – Режим доступа: <http://ucom.ru/doc/na.2016.01.03.023.pdf> (дата обращения: 17.04.2018).
3. Гизитдинова, М. Р. Самоходные автономные необитаемые подводные аппараты – прорыв в подводных технологиях / М. Р. Гизитдинова // Морская радиоэлектроника. Комплексы и системы. – 2005. – № 4(14).