

УДК 628.746-519 + 629.7.064.56

САМОЛЕТЫ НА СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЯХ – НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В АНТАРКТИКЕ: ОСОБЕННОСТИ, ПРЕИМУЩЕСТВА, ПЕРСПЕКТИВЫ

А.П. Трофименко

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное», ул. Криворожская, 3, г. Днепрпетровск, e-mail: info@yuzhnoye.com

Реферат. В данной статье описаны преимущества (по сравнению с пилотируемым человеком летательными аппаратами) применения беспилотных летательных аппаратов для научных исследований. Предложено использование самолета на солнечных батареях для многосуточных беспосадочных полетов на большой высоте в Антарктиде.

Описаны технические предпосылки, способствовавшие созданию и развитию самолетов на солнечных батареях. Отмечены их особенности и достоинства. На основе разработанной автором математической модели полета самолета выявлены зависимости нагрузки на крыло и скорости от требуемой высоты полета. Показана реализуемость проекта высотного самолета на солнечных батареях с помощью технических средств, которые имеются на сегодняшний день. Даны характеристики самолетов на солнечных батареях, появления которых можно ожидать в ближайшем будущем.

Ключевые слова: самолет, солнечные батареи, солнечная энергия, Антарктида

1. Вступление

Прогресс в области электроники, создание приборов, базирующихся на электромеханических принципах работы вместо применяемых ранее полностью механических устройств, привели к существенному, в десятки и сотни раз, уменьшению массы и энергопотребления различной аппаратуры, используемой в научных исследованиях. Сегодня для изучения атмосферы, облачного покрова, земной поверхности часто нет необходимости поднимать в воздух самолет с человеком на борту. С этой задачей могут справиться беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Ввиду меньших размеров и массы они получают значительно дешевле и проще в эксплуатации.

В последнее десятилетие получил развитие такой класс БПЛА, как летательные аппараты с электрическими двигателями. А последним достижением технической мысли можно считать летательные аппараты на солнечных батареях, которые, благодаря уникальности их свойств, одно из которых – способность находиться в воздухе неограниченно долго, можно отнести к новому самостоятельному классу БПЛА.

Применение подобного самолета, например, в полярных областях Арктики и Антарктики в летний сезон существенно бы обогатило инструментарий исследователей и удешевило сами исследования с воздуха. Самолет мог бы находиться в полете в течение всего полярного дня, не требуя ни капли горючего. Он кружил бы над изучаемым объектом, непрерывно держа его в поле зрения своих приборов. Отпала бы необходимость в совершении большого числа взлетов и посадок для пополнения запасов топлива, необходимых самолетам с двигателями внутреннего сгорания.

Интересна идея использования такого аппарата для полетов в район Южного полюса, на расстояние нескольких тысяч километров от украинской научной станции Академик

Вернадский. Кроме проведения исследований приборами, находящимися на его борту, самолет мог бы брать на борт небольшие сбрасываемые радиобуи с научной аппаратурой.

2. Развитие БПЛА на солнечных батареях

Когда 4 ноября 1974 года с полигона Байсикл-Лейк военной базы Форт-Ирвин в Калифорнии совершил свой первый полет самолёт на солнечных батареях Sunrise 1 [1], стало ясно, что в авиации появилось новое направление – аэродинамические летательные аппараты, использующие для полёта солнечную энергию. Это означало не только отсутствие потребности в традиционных химических видах топлива. Используемый возобновляемый источник энергии самолёт с возможностью её регулярного пополнения претендовал на то, чтобы оставаться в воздухе настолько долго, настолько хватит ресурса его агрегатов или изменятся условия освещения.

Существенный скачок в технических характеристиках самолётов на солнечных батареях произошел благодаря прогрессу в таких областях техники, как:

- фотопреобразователи солнечной энергии. В 1980-е годы хорошим показателем считалась удельная мощность около 100 Вт с одного квадратного метра площади батареи в космосе. Сегодня кремниевые фотопреобразователи на твёрдой подложке фирмы SANYO имеют к.п.д. 20,7% и позволяют получать с квадратного метра своей поверхности до 170 Вт на поверхности Земли (в космосе до 280 Вт) [2]. Появились плёночные фотопреобразователи, которые хотя и имеют существенно более низкий к.п.д. по сравнению с вышеупомянутыми, но также отличаются и существенно более низкой массой одного квадратного метра, позволяющей использовать их в качестве мягкой обшивки;

- новые материалы. Применение прочного и лёгкого углепластика позволило значительно уменьшить массу конструкции. Этому же способствовало использование в качестве мягкой обшивки плёночных материалов;

- аккумуляторы электроэнергии. Самолету, предназначенному для работы только в полярный день, аккумуляторы энергии не нужны. Получаемая от солнечных батарей электроэнергия непосредственно потребляется электродвигателями. Однако для полёта ночью аккумуляторы необходимы – не только для питания системы управления и связи, полезной нагрузки, но и двигателей, чтобы удерживать самолёт на необходимой высоте. В последнее десятилетие происходит переход от никель-кадмиевых аккумуляторов, имеющих плотность энергии 40–50 Вт/кг, к литий-полимерным, литий-ионным и литий-серным аккумуляторам, у которых этот показатель в 4–7 раз выше [1];

- бесколлекторные электродвигатели. Отсутствие щёточного узла позволило в разы поднять ресурс двигателя, увеличить к.п.д. до 92–94%, снизить массу до 0,5–1 кг/кВт мощности (см., например, двигатели фирмы MEGA Motors). Импульсные регуляторы хода для таких двигателей имеют удельную массу до 2-х граммов на 1 Ампер пропускаемого тока.

Параллельно росли характеристики научной аппаратуры, для размещения которой мог быть использован самолёт на солнечных батареях. Постоянно уменьшались её масса и энергопотребление при улучшении качества получаемых результатов. Так, например, система стабилизации изображения, применяемая на объективах фотоаппаратов, позволяет уменьшить смазывание фотографируемых объектов примерно в 4 раза.

Таким образом, технические характеристики самолётов улучшались, а требования к ним, в частности по грузоподъёмности, со стороны полезной нагрузки уменьшались. Возможность практического применения самолетов на солнечной энергии становилась всё более очевидной.

3. Особенности БПЛА на солнечных батареях

Одна из основных систем самолётов на солнечных батареях – система энергоснабжения имеет такие же принцип работы и взаимодействие составляющих её элементов, как и применяемая на космических аппаратах.

Мощность, вырабатываемая системой энергоснабжения, ограничена площадью солнечных батарей, расположенных на поверхности самолёта, т.е. зависит от его геометрических размеров.

Мощность системы энергоснабжения возрастает с высотой полёта, в отличие от традиционных двигателей внутреннего сгорания, у которых мощность с высотой полёта существенно падает. Это делает возможным самолетам на солнечных батареях достигать больших высот полета, чем самолетам с двигателями внутреннего сгорания.

4. Задачи исследования

Лётные данные самолёта, представляющие интерес для учёных, а именно: высота полёта, скорость, масса полезной нагрузки – зависят как от характеристик применяемых материалов, агрегатов и оборудования, так и от умения разработчиков и изготовителей соединить всё это в эффективной конструкции.

Инженер должен ответить на вопрос: сможет ли он сделать самолёт, который достигнет желаемой для учёного высоты полёта? Какие скорость полёта и масса полезной нагрузки будут при этом?

Задачами настоящего исследования и являлось получение ответов на эти вопросы.

5. Методика и объекты исследований

Для проведения исследований была разработана математическая модель движения самолёта в атмосфере. В расчетах были использованы достигнутые на реальных образцах характеристики как самолёта в целом, так и отдельных его узлов и агрегатов. Аэродинамическое качество, коэффициент использования поверхности самолёта для размещения солнечной батареи, коэффициенты полезного действия агрегатов, удельные массы солнечной батареи и аккумуляторов были взяты максимальные. Переменной величиной, существенно влияющей на высоту полёта, скорость, прочность самолёта, величиной, ограниченной снизу характеристиками используемых материалов, технологией изготовления и искусством самого конструктора, является нагрузка на крыло – отношение массы самолёта к площади его крыла. Объектом исследований было выявление зависимости нагрузки на крыло, которой должен обладать самолет, от требуемой высоты полета.

С нагрузкой на крыло и высотой полёта связана скорость полёта, которая также являлась объектом исследований. Было уделено внимание массе полезной нагрузки – той части полной полётной массы самолёта, которую может занять научное оборудование без ухудшения его лётных качеств.

6. Результаты исследований

Были рассчитаны четыре зависимости нагрузки на крыло от высоты полёта для четырёх различных значений удельной мощности солнечной батареи – электрической мощности, получаемой с одного квадратного метра ее поверхности: 50, 75, 100 и 125 Вт/м². Результаты расчётов показаны на рис. 1

График на рис. 1 показывает техническую возможность создания самолёта. Для полёта у земли при удельной мощности солнечной батареи 50 Вт/м² нагрузка на крыло не должна превышать 10 кг/м², на высоте 10 км – 7 кг/м², на высоте 20 км – 4 кг/м², на высоте 30 км – 2,2 кг/м². Если же удельная мощность возрастёт до 100 Вт/м², то максимально допустимая нагрузка на крыло возрастёт соответственно до 17, 11.5, 6.6, 3.6 кг/м².

В настоящее время нагрузка на крыло 4 кг/м² – это тот реально достижимый предел, при уменьшении которого прочность самолета становится уже недостаточной, а сам полёт – небезопасным. Как показано выше, самолет с такой величиной этого параметра и удельной

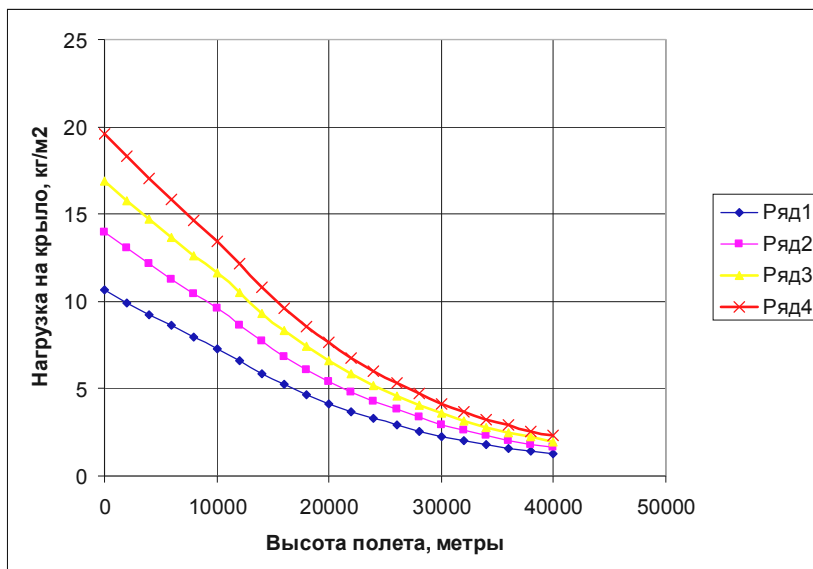


Рис. 1. Зависимость нагрузки на крыло от высоты полета.

- Ряд 1 – $Q_{\text{солн}} = 50 \text{ Вт/м}^2$
- Ряд 2 – $Q_{\text{солн}} = 75 \text{ Вт/м}^2$
- Ряд 3 – $Q_{\text{солн}} = 100 \text{ Вт/м}^2$
- Ряд 4 – $Q_{\text{солн}} = 125 \text{ Вт/м}^2$

мощностью солнечной батареи 50 Вт/м^2 поднимется на высоту 20 километров. Расположенные перпендикулярно к солнечным лучам бытовые солнечные батареи фирмы SANYO обеспечивают удельную мощность в космосе до 270 Вт/м^2 . Цифра 50 Вт/м^2 учитывает как потери солнечной энергии в атмосфере и неоптимальность спектра излучения, так и потери, связанные с неперпендикулярностью солнечных лучей к поверхности солнечных батарей, обусловленной формой самолета, перемещением Солнца и движением с выбранным курсом. Если уменьшить требование к маневровой свободе самолета в горизонтальной плоскости, т.е. более жестко привязать его движение к движению Солнца, то эту цифру можно повысить до $100 - 125 \text{ Вт/м}^2$. Согласно рис. 1, высота полета при этом возрастет до 27–30 километров.

Второй важной характеристикой самолета является скорость полета, которую он может достичь. На рис.2 показана зависимость скорости полета от тех же параметров, что и нагрузка на крыло на рис.1, высоты полета при разных значениях удельной мощности солнечной батареи.

График на рис. 2 указывает на возможность самолета на солнечных батареях осуществлять полет по маршруту в ветер. Даже при невысокой вырабатываемой удельной мощности солнечных батарей 50 Вт/м^2 скорость полета у земли составляет около 12 м/с , что сопоставимо со скоростью полета сверхлегких летательных аппаратов. На высоте 10 км скорость возрастает до 17 м/с , на высоте 20 км – до 26 м/с , а на высоте 30 км – до 42 м/с , что позволяет бороться со встречным ветром. При удельной мощности солнечной батареи 100 Вт/м^2 эти цифры возрастают до 15 м/с , 20 м/с , 33 м/с , 54 м/с соответственно. Такая невысокая скорость полета может явиться преимуществом самолета: при полете против ветра самолет может зависнуть над какой-либо точкой на земной поверхности, осуществляя наблюдение. Невысокая скорость обеспечивает малые радиус и время виража. При скорости 40 м/с и угле крена 5° радиус виража составляет около 1800 метров, время виража – 283 с.

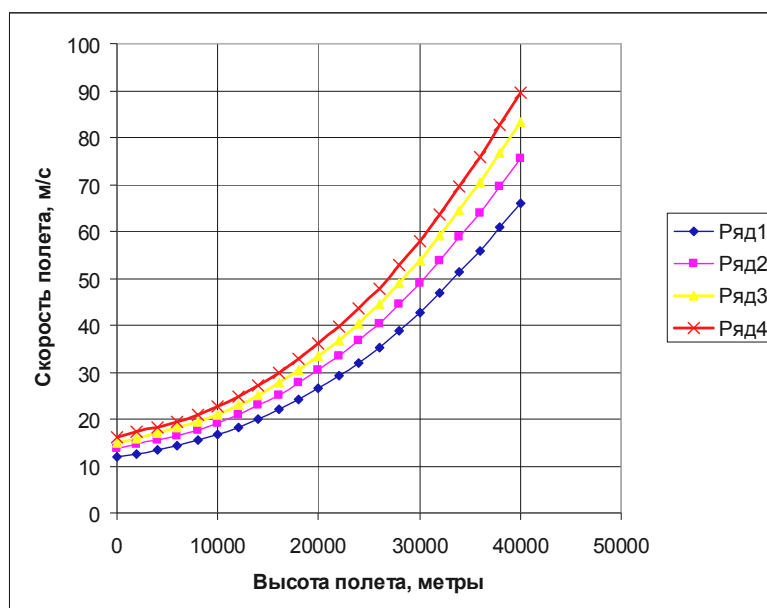


Рис. 2. Зависимость скорости полета от высоты.

- Ряд 1 – $Q_{\text{солн}} = 50 \text{ Вт/м}^2$
- Ряд 2 – $Q_{\text{солн}} = 75 \text{ Вт/м}^2$
- Ряд 3 – $Q_{\text{солн}} = 100 \text{ Вт/м}^2$
- Ряд 4 – $Q_{\text{солн}} = 125 \text{ Вт/м}^2$

Доля полезной нагрузки в общей массе самолёта (весовая отдача) у современных самолётов на солнечных батареях колеблется в пределах 6–10%. Так, у швейцарского самолёта Solar Impulse при полётной массе 1600 кг масса полезной нагрузки (один пилот с системой жизнеобеспечения) составляет 110–120 кг [3, 4]. У самолёта Zephyr при полётной массе 50 кг масса полезной нагрузки составляет 4 кг [5]. Но следует учитывать громадное различие между вышеуказанными самолётами и самолётом для антарктических исследований. И Solar Impulse, и Zephyr создавались для круглосуточного беспосадочного полёта в средних и низких широтах, характеризующихся значительным по продолжительности ночным участком, когда поступление электроэнергии от солнечных батарей отсутствует. Поэтому эти самолеты снабжены аккумуляторами, причём их масса может достигать до 40% от массы самолета. Для антарктического самолёта аккумуляторы не нужны, т.к. полёты будут выполняться только в полярный день. (На самом деле масса аккумуляторов может быть ограничена цифрой 10–15%, а их энергия будет использоваться для улучшения манёвренности самолета.) Таким образом, масса полезной нагрузки у антарктического самолета может составлять 30–40% от полётной массы или 30–40 кг при полной полётной массе 100 кг.

7. Преимущества БПЛА на солнечных батареях

Каковы же преимущества использования самолетов на солнечных батареях для исследования Антарктиды? Как уже указывалось выше, это неограниченные продолжительность и дальность полета на больших высотах в условиях полярного дня, возможность постоянного контроля наземного объекта вследствие невысокой скорости полета. Последнее свойство делает аппарат безопасным в эксплуатации. Посадочная скорость у земли до 10 м/с исключает какие-либо разрушения на земле, приборов и оборудования на

самолете, сильные разрушения силовых элементов конструкции. Для посадки и взлёта не требуется специально оборудованная ровная площадка. Взлёт осуществляется с помощью тросовой катапульты. Самолёт может быть выполнен разборным и перевозиться с помощью имеющихся транспортных средств.

Высокое аэродинамическое качество обеспечивает надёжность и удобство эксплуатации самолёта. В случае выхода из строя таких основных систем, как солнечные батареи, винтомоторные группы, аппарат в планирующем режиме сможет пролететь около 1000 км до ближайшего аэродрома посадки или просто удобного места.

Максимальная требуемая продолжительность полета – полярный день не является чрезмерной для современных узлов и агрегатов невысокой стоимости. К тому же сама возможность осуществления посадки в безопасном планирующем режиме, например, для замены вышедшего из строя агрегата, минимизирует время на послеполётный осмотр и предполётное обслуживание, чем значительно удешевляется эксплуатация самолета.

Самолеты, использующие электродвигатели на солнечных батареях, обладают таким преимуществом, как малошумность, а на режиме планирования с выключенными двигателями – практически полной бесшумностью полёта. Это делает их эксплуатацию комфортным для находящихся на земле людей и животных. Поэтому самолёты с электродвигателями можно использовать на малых высотах – от ста метров до нескольких километров. Потребная для полёта на малых высотах мощность оказывается гораздо меньшей, чем для полёта на больших высотах. Сделать такой самолет проще. И стоит он будет существенно дешевле.

Не всегда есть необходимость находиться в воздухе круглые сутки. Для ряда задач, например, для наблюдения за животным миром, таянием снега, контролем хозяйственных объектов, достаточно светлого времени суток. Наличие солнечной батареи можно рассматривать как на возможность дозаправиться энергией в воздухе и увеличить продолжительность полёта сверх возможностей аккумуляторов. Причём в солнечную погоду самолёт летит на солнечных батареях, а в облачную он компенсирует потери высоты в восходящих потоках под облаками, используя своё высокое аэродинамическое качество и малую скорость полёта. Таким образом, в классе самолетов на солнечных батареях можно выделить два подкласса:

- 1) высотные самолёты для многосуточного беспосадочного полёта,
- 2) самолёты для малых высот полёта большой продолжительности.

8. Перспективы развития БПЛА на солнечных батареях

Каким же прогнозируется облик самолёта на солнечных батареях в ближайшее десятилетие, каковы его возможности и перспективы практического применения?

Прежде всего, мощность силовой установки самолёта ограничена солнечной постоянной – около 1400 Вт/м² в космосе и на больших высотах и 800–1000 Вт/м² на земной поверхности в зависимости от широты и прозрачности атмосферы. На этот параметр человек влиять не может. К.п.д. доступных по цене кремниевых фотопреобразователей находится в пределах 12–16%, лучших – 19–21%. Можно ожидать повышения до 22–25%. Существенно более дорогие арсенид-галлиевые фотопреобразователи имеют к.п.д. 28%, перспектива – до 40%. Но их использования из-за высокой стоимости можно ожидать только на единичных сверхвысотных самолётах или на самолётах с полезной нагрузкой высокой мощности.

На рис. 3 показано, какое приращение мощности силовой установки требуется, чтобы увеличить высоту полёта самолёта от некоторого начального значения на 2 км. Расчёт приведен для начальных высот полёта, кратных двум км.

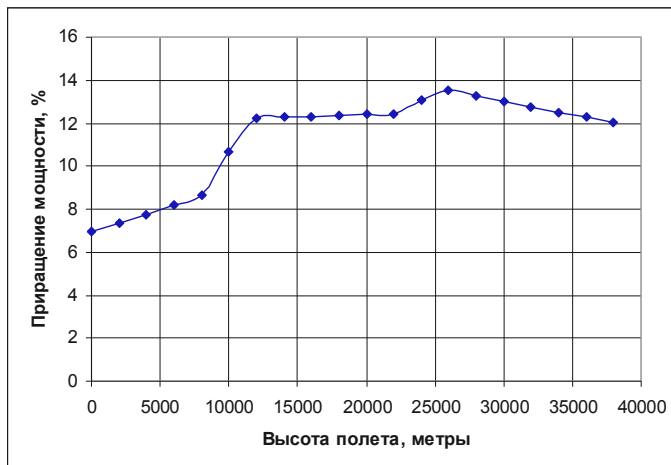


Рис. 3. Зависимость необходимого приращения мощности силовой установки для увеличения высоты полёта на 2 км от текущей высоты полёта.

Как видно из рис. 3, в диапазоне высот 12–38 км для набора дополнительных 2 км высоты полёта (с любой начальной высоты) необходимо мощность силовой установки увеличить на 12,5–13,5%. Увеличение к.п.д. солнечных батарей с 19% до 25%, т.е. в 1,32 раза, позволит повысить высоту полёта примерно на 4,5 км. Увеличение к.п.д. солнечных батарей в 2 раза, с 20% до 40%, позволит повысить высоту полёта на 11,5 км.

По результатам проектных проработок масса самолета складывается из следующих основных составляющих в таких соотношениях:

- масса конструкции – 30–35%,
- масса солнечных батарей – 20–30%,
- масса аккумуляторов – 25–40% (для антарктических вариантов самолета – 10–15%),
- системы управления и связи – 2–4%,
- полезная нагрузка – 6–8%.

Масса конструкции – достаточно консервативный параметр. Её уменьшение при использовании имеющихся материалов в течение ближайших 10 лет ожидается не более чем на 10%. Уменьшение массы солнечных батарей возможно в 1,7–2,0 раза в случае использования вместо кремниевых фотопреобразователей более эффективных, например, арсенид-галлиевых. Повышение удельной энергоёмкости аккумуляторов ожидается с нынешних 150–200 Вт·час/кг до 500–600 Вт·час/кг к 2015-2016 годам [6]. В сумме это позволит при неизменных прочностных характеристиках снизить нагрузку на крыло до 3 кг/м² и увеличить за счёт этого высоту полета на 5 км.

Каков же будет облик перспективных самолётов? Швейцарский аппарат «Solar impulse» массой 1600 кг и полезной нагрузкой более 100 кг сегодня можно считать скорее экзотикой, чем реальным прообразом самолёта на солнечных батареях будущего из-за его громадных размеров (размах крыла 63,4 метра), высокой стоимости (80 млн. евро) и небольшой высоты полета (8,5 км).

Среди высотных самолётов скорее всего будут пользоваться спросом аппараты с полезной нагрузкой 6–15 кг и до 30 кг (антарктический вариант). Многосуточный беспосадочный полёт будет возможен при продолжительности светового дня не менее 10 часов (любое время года на широте не выше 30°) с доведением до 8 часов (любое время года на широте не выше 50°). Масса самолётов будет находиться в пределах 60–100 кг. Размах крыла 30–40 метров. Нагрузка на крыло составит 2,8–5 кг/м². Диапазон высот полета – 13–23 км и 28–32 км у сверхвысотных аппаратов.

Наземное оборудование представляет собой (по требованию заказчика):

- ноутбук с джойстиком, при помощи которого осуществляется управление как самолётом, так видеокамерой и другой полезной нагрузкой. На экран монитора выводится информация, необходимая для осуществления полёта и получаемая от полезной нагрузки;
- два ноутбука с двумя джойстиками (для двух операторов). Один комплект используется для управления самолётом, второй комплект – для управления полезной нагрузкой.

Управление самолетом осуществляется с помощью автопилота с приоритетом ручного управления.

На рис. 4 показан внешний вид высотного самолёта.



Рис. 4. Высотный самолёт на солнечных батареях.

В подклассе самолётов, предназначенных для малых высот полёта, на рынке могут пользоваться спросом аппараты с полезной нагрузкой 0,5–4 кг, рассчитанные на высоту полета 0,1–1 км. В то же время их лётные характеристики могут обеспечить им статический потолок 8–10 км. Диапазон скоростей полёта составит 30–65 км/час, продолжительность – 2-3 часа (только на аккумуляторах), максимальная – 8–10 часов. Масса самолётов будет находиться в пределах 5–20 кг. Размах крыла – 3–9 метров. Нагрузка на крыло – 5–12 кг/м².

Управление самолётом может осуществляться как у предыдущего аппарата или с помощью упрощённой системы управления без автопилота.

На рис.5 показан внешний вид самолёта для малых высот полёта.



Рис. 5. Самолёт для малых высот полёта.

Самолёт имеет высокую устойчивость в полёте даже при сильных порывах ветра. Самолёт не сваливается самопроизвольно в штопор, а в случае принудительного ввода в штопор после выставления органов управления «в нейтраль» быстро выходит из штопора и продолжает полёт. Большое поперечное V крыла спасает его от ударов о землю при приземлении с большим креном. Самолет выполнен по crash-технологии, обеспечивающей целостность его конструкции даже при лобовом столкновении с препятствием. Перед

следующим полётом достаточно просто правильно выставить крыло и стабилизатор на фюзеляже.

Самолет имеет съёмные крыло и стабилизатор, причем крыло разбирается на две части. В транспортировочном положении части крыла и стабилизатор укладываются вдоль фюзеляжа.

9. Выводы

1) Уже на сегодняшнем этапе развития техники возможно создание самолёта на солнечных батареях для высотного многосуточного беспосадочного полёта.

2) Стоимость проведения исследований с помощью такого самолёта существенно ниже по сравнению с использованием пилотируемого человеком.

3) Самолёт, предназначенный для полётов в полярный день, будет обладать в несколько раз большей грузоподъёмностью по сравнению с самолётами, предназначенными для круглосуточных беспосадочных полётов в условиях чередования дня и ночи.

4) Эксплуатация самолёта на солнечных батареях значительно проще эксплуатации пилотируемых человеком самолётов и доступна специалисту средней квалификации.

Литература

1. Иддо Генут. Крылья солнца: чистый полет. Интернет-издание «Популярная механика» <http://www.popmech.ru> декабрь 2007 г.

2. Официальная WEB-страница компании «SANYO» <http://sanyo.com>

3. В Швейцарии прошли испытания самолета на солнечных батареях. Интернет-издание «EnergyLand.info» от 6 декабря 2009 года.

4. Официальная WEB-страница компании «Solar impulse» <http://www.solarimpulse.com>

5. Интернет-страница http://www.qinetiq.com/home/newsroom/news_releases_homepage/2010/3rd_quarter/zephyr_-_14_days.html

6. Официальная WEB-страница компании «Sion Power» <http://www.sionpower.com>