

Конкурсная работа

Автор: Полякова Л.А.

Название работы:

«Электроимпульсная система для удаления льдообразований с обшивки агрегатов крупноразмерного беспилотного летательного аппарата, изготовленного из композиционных материалов»

Цель работы

Расширение условий применения беспилотного летательного аппарата за счет обеспечения возможности полета в условиях льдообразования.

Описание работы

Специфика применения разведывательных и разведывательно-ударных БЛА определяет в качестве ключевых требований большую продолжительность полета – свыше 24 часов и большой радиус применения, превышающий сотни километров.

Эти обстоятельства предполагают, что в районе применения или по пути к нему погодные условия могут варьироваться в широком диапазоне и быть непредсказуемыми. Попадание в условия обледенения не должно приводить к завершению миссии БЛА. Поэтому летательный аппарат должен иметь возможность покинуть зону обледенения до того, как масса льда на поверхности БЛА превысит критическое значение, приводящее к потере несущей способности.

Для удаления льдообразований летательные аппараты (ЛА) оборудуются противообледенительными системами (ПОС). В большинстве случаев обледенение происходит при полете в атмосфере, содержащей переохлажденные капли воды (т. е. воды в жидкой фазе при отрицательной температуре). При столкновении с лобовыми поверхностями агрегатов ЛА переохлажденные капли воды быстро кристаллизуются, образуя ледяные наросты различной формы и размеров. Образование во время полета ледяных наростов на крыле оказывает существенное влияние на аэродинамику.

Льдообразования на крыле способствуют возникновению срыва потока на углах атаки меньше расчетных, увеличивают высоту и протяженность области срыва потока, ухудшают продольную статическую устойчивость, уменьшают производную C_y^α (C_y – коэффициент подъемной силы, α – угол атаки), уменьшают

максимальную подъемную силу, увеличивают на кабрирование (в некоторых случаях – пикирование) момент тангажа. Особенно сильно влияние образовавшегося льда на ламинаризованные профили, приводящее к увеличению сопротивления и падению несущих свойств крыла до 1,5 раз.

Возможны следующие способы борьбы с обледенением ЛА:

- тепловой, реализующий нагрев защищаемой поверхности либо до температуры таяния льда, либо до температуры, при которой обеспечивается полное или частичное испарение воды (воздушно-тепловые, электротепловые ПОС);
- механический, при котором образовавшийся лед разрушается в результате механического воздействия на него, после чего лед сбрасывается внешними силами (пневматические, электроимпульсные ПОС);
- физико-химический (жидкостно-химический), при котором используются специальные жидкости, понижающие температуру замерзания переохлажденных капель воды, уменьшающие силу сцепления льда с обшивкой или растворяющие лед.

Постановка задачи

Защита от обледенения БЛА большой продолжительности полета имеет ряд особенностей. На БЛА рассматриваемого типа при использовании в качестве силовой установки поршневого двигателя применение воздушно-тепловой ПОС нецелесообразно, поскольку невозможен отбор горячего воздуха в нужном объеме и требуемой температуры. При использовании газотурбинного двигателя, отбор воздуха с требуемыми параметрами возможен, но влечет за собой все известные недостатки воздушно-тепловых систем: во время работы системы уменьшается мощность (тяга) и повышается температурный режим двигателя, увеличивается удельный расход топлива.

Применение электротепловых ПОС на летательных аппаратах с большим размахом крыла (свыше 16 м) связано с отбором мощности от бортовых источников электропитания, которая может значительно превысить мощность, потребляемую всеми другими нагрузками данного летательного аппарата. Расчетные значения потребляемой мощности циклической электротепловой ПОС для БЛА самолетного типа большой продолжительности полета с размахом крыла 16 м, в зависимости от установленного значения допустимой толщины льда и, соответственно,

выбранного времени охлаждения секции при времени нагрева $\tau_{\text{наг}} \approx 15$ с приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Потребляемая мощность электротепловой ПОС в зависимости от допустимой толщины льда.

h_{max} , мм	2,5	3,8
$P_{\text{эл.сум}}$, Вт	16300	11550

где h_{max} – максимально допустимая толщина льда,

$P_{\text{эл.сум}}$ – суммарная электрическая мощность.

Основной недостаток **пневматических ПОС** – влияние на профильное сопротивление несущих поверхностей, особенно при работе противообледенительной системы. В нерабочем состоянии системы сопротивление может увеличиваться до 8-10%, что дает увеличение общего сопротивления самолета приблизительно до 2-3%. В работающем состоянии профильное сопротивление возрастает на 100-110%. Применение пневматических ПОС на ламинаризованных профилях крыла, характерных для БЛА рассматриваемого типа, недопустимо.

Современные жидкостные ПОС предполагают выполнение внешней обшивки крыла летательного аппарата на участке возможного отложения льда из металла с большим числом микроотверстий. За внешней обшивкой располагается пористый эластичный материал, который создает необходимое гидравлическое сопротивление потоку жидкости (гликоль/этиленгликоль), таким образом, обеспечивает равномерный малый расход ее сквозь внешнюю обшивку. Защищаемая от обледенения поверхность на БЛА должна превышать зону улавливания капель и на длине 16 м ориентировочно составит 4,2 м². Следовательно, при расходе жидкости 1,6 л/(м²·ч) суммарный расход составит около 7 л/ч, что сравнимо с часовым расходом топлива БЛА на крейсерском режиме полета.

Электроимпульсные ПОС удаляют лед с обшивки крыла летательного аппарата возбуждением в материале обшивки упругих волн напряжений с интенсивностью, достаточной для создания в ледяном слое, прилегающем к обшивке, напряжений, превосходящих динамическую прочность льда и при этом не вызывающую усталостных явлений в материале конструкции. В результате применения математического моделирования процессов заряда, электротехнические параметры можно подобрать таким образом, чтобы мощность,

потребляемая системой для крыла с размахом 16 м, не превышала 1 кВт.

На основе всестороннего анализа основных характеристик противообледенительных систем сделан вывод, для рассматриваемого класса БЛА наиболее эффективной, а иногда и единственно возможной, представляется **электроимпульсная противообледенительная система**.

Решение задачи

С целью обеспечения защиты ламинаризованных композитных профилей БЛА «Орион», разработанного АО «Кронштадт» в рамках выполнения государственного контракта, спроектирована электроимпульсная противообледенительная система (ЭИ ПОС) высокой энергоэффективности (потребляемая мощность – 0,75 кВт), впервые в российской авиапромышленности применяемая в углепластиковой конструкции. ЭИ ПОС удаляет льдообразования с передних кромок крыла и оперения методом создания импульсных механических деформаций в обшивке защищаемого агрегата. Упругая деформация создается импульсом силы, длительностью 250–500 мкс, возникающим между изменяющимся магнитным полем индукторов. Параметры элементов электрической цепи «зарядное устройство – конденсатор – генератор импульсов напряжения – индуктор» синтезированы по требуемому закону изменения во времени тока индуктора, от которого зависят амплитуда, направление, скорость изменения и длительность силового воздействия на обшивку.

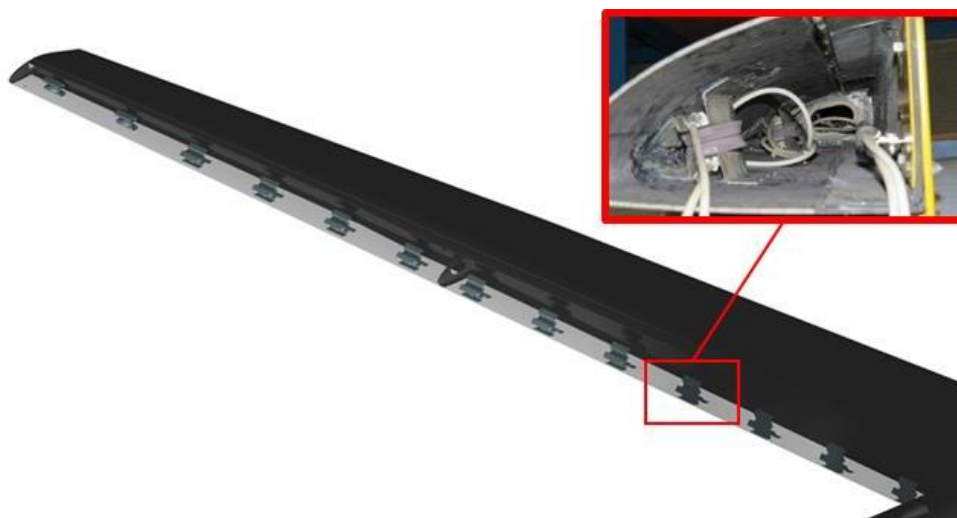


Рисунок 1 Размещение исполнительных элементов ЭИ ПОС под обшивкой консоли крыла

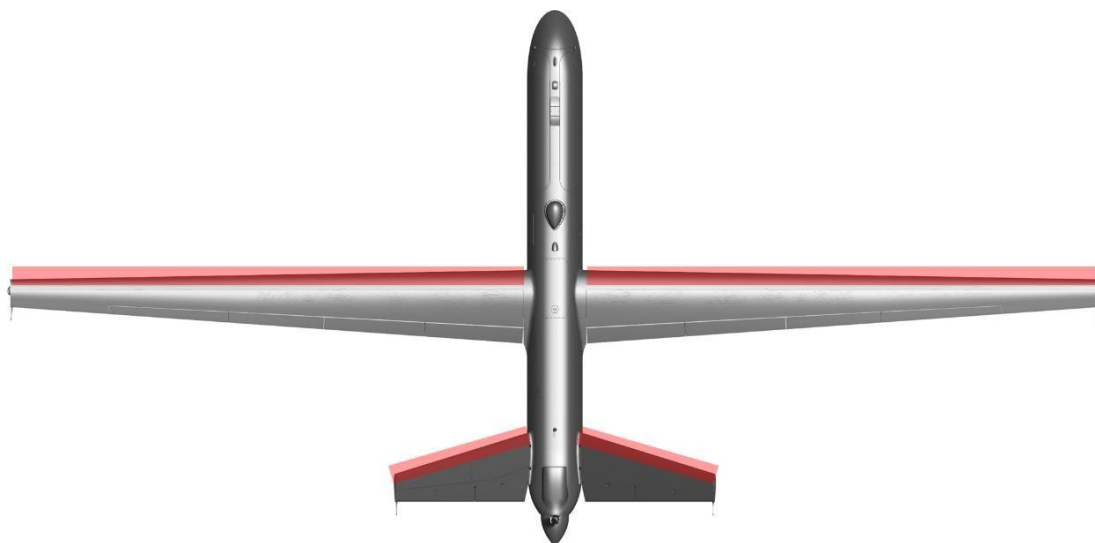


Рисунок 2: Элементы планера БЛА «Орион», защищаемые ЭИ ПОС

В состав ЭИ ПОС входят: блоки подсистемы удаления льда, конденсаторы, индукторы, расположенные в крыле и оперении БпЛА, автомат управления выполняющий функцию сигнализации об обледенении, выдачи команды на включение системы удаления льда, а также измерения температуры наружного воздуха. Автомат управления информационно сопряжен с блоком управления общесамолетным оборудованием по каналу ARINC-429.

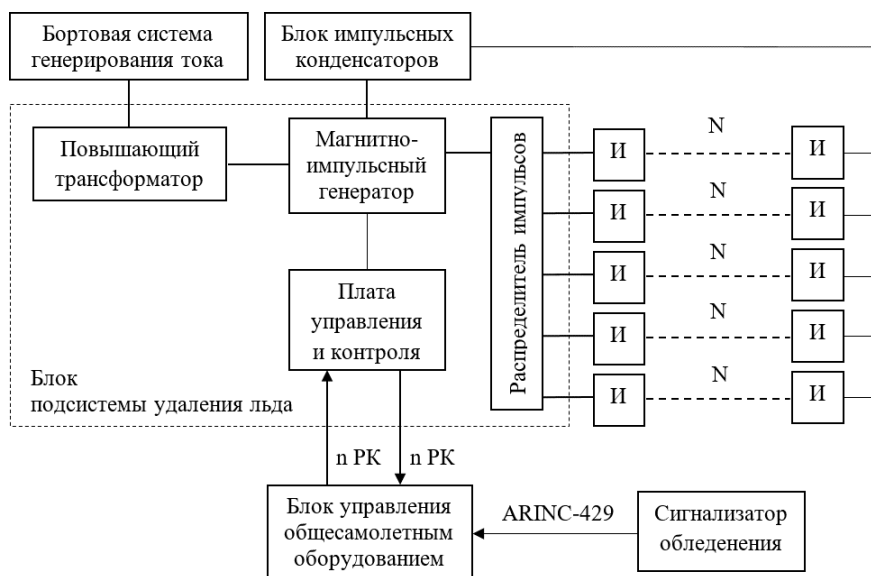


Рисунок 3 Функциональная схема электроимпульсной противообледенительной системы

И – индуктор;

N – число последовательно подключенных индукторов в группе;

n РК – количество разовых команд.

Расчетные исследования

Для расчета параметров ПОС использован математический аппарат на основе динамических уравнений упругости.

Носок крыла с нервюрами и лонжероном моделировался методом конечных элементов с использованием элементов типа «Continuum Shell» (твердотельные элементы оболочечного типа). Действие индуктора заменялась распределенной нагрузкой, которая действует 500 мкс. Такая нагрузка соответствует удару с энергией 1 Дж на один индуктор.

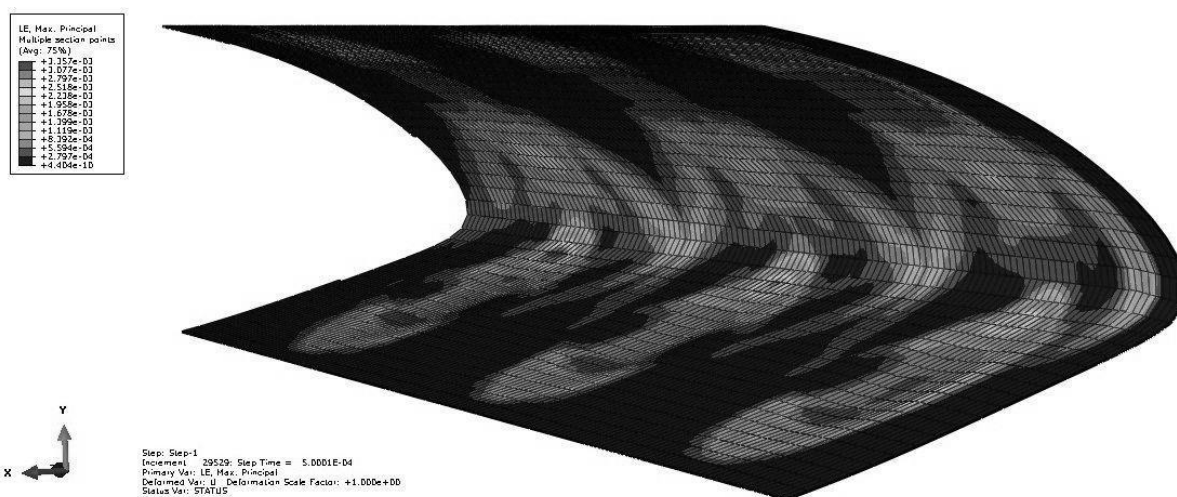


Рисунок 4 Максимальные деформации, возникающие при воздействии ЭИ ПОС

Исследования ЭИ ПОС проводились на стенде искусственного обледенения в климатической камере с имитацией набегающего потока во ФГУП «ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского». Испытаниям подвергались отсеки крыла (участки носка крыла с лонжероном и носовыми частями нервюр), оборудованные исполнительными элементами и жгутами ЭИ ПОС. В процессе работы проводились исследования влияния скорости, температуры и влажности воздушного потока на эффективность функционирования ЭИ ПОС. В результате исследований получены характеристики эффективности работы противообледенительной системы БЛА на различных режимах полета.

Экспериментальные исследования

До проведения эксперимента также были измерены перемещения обшивки крыла в момент срабатывания системы с помощью лазерных триангуляционных

датчиков в точках установки исполнительных элементов ЭИ ПОС – индукторов – и между ними. Амплитуда перемещений в указанных точках лежит в диапазоне 1,5 – 3,53 мм, что коррелирует с расчетными значениями, полученными на основании конечно-элементного моделирования срабатывания системы. Это позволило в дальнейшем сократить сроки проектирования и испытаний системы.

Методы проведения испытаний.

Подтверждение эффективности системы

Для БЛА «Орион», как для нового типа объекта, защищаемого от обледенения, на основании действующих в РФ нормативных документов были разработаны и приняты заказчиком нормированные условия обледенения (таблица 2).

Таблица 2 – Нормированные условия обледенения для БЛА

Режим	1	2	3	4
Температура наружного воздуха $t_{нв}, ^\circ\text{C}$	0 ... – 5	–6 ... –10	–11 ...–15	–16... –20
Водность $W, \text{г/м}^3$	0,45	0,36	0,22	0,13
Среднеарифметический диаметр капель $\langle d \rangle \text{ мкм}$	15	15	10	10

На основании проведенного расчета форм и размеров льдообразований для сечений крыла и оперения БЛА «Орион» выбран наиболее критичный с точки зрения ухудшения аэродинамических характеристик профиля режим полета при постоянной истинной скорости $V_{и}=150 \text{ км/ч}$, высоте $H=1000 \text{ м}$, $t_{нв}=-4 \text{ }^\circ\text{C}$, в котором льдообразования наиболее смещены на верхнюю часть несущей поверхности и имеют наибольшие размеры сверху и снизу. Для натурного моделирования были взяты расчетные максимальные зоны отложения льда (таблица 3).

Таблица 3 – Расчетные максимальные зоны отложения льда

Наименование сечения	Параметры сечения		Зона отложения льда, мм	
	Хорда, мм	Расстояние от оси фюзеляжа, мм	сверх у	сниз у

Z 1	1075	655	28	26
Z 2	865	3070	18	56
Z 3	645	5485	26	32
Z 4	431	7900	34	10

В соответствии с установленным ограничением на БЛА по полету в условиях обледенения время каждого режима τ_0 в нормированных условиях обледенения должно составлять 15 минут.

Эксперимент проводился следующим образом: в рабочую часть аэродинамической трубы размещался исследуемый участок отсека крыла. Производилось включение оборудования установки (без подачи воды) для обеспечения скорости воздушного потока 150 км/ч (42 м/с) и температуры в заданном диапазоне. При этом значение необходимой температуры устанавливалось на таком уровне, чтобы обеспечить ее значение равное среднему значению температуры для соответствующего температурного диапазона после включения в работу водораспыливающей установки. Производилось включение в работу водораспыливающей установки, параметры работы которой (давление воды перед форсунками и давление в водяной магистрали) устанавливались таким образом, чтобы обеспечить заданные параметры условий обледенения на соответствующем режиме. Данные параметры определялись перед началом испытаний в процессе настройки и проверки испытательного оборудования.

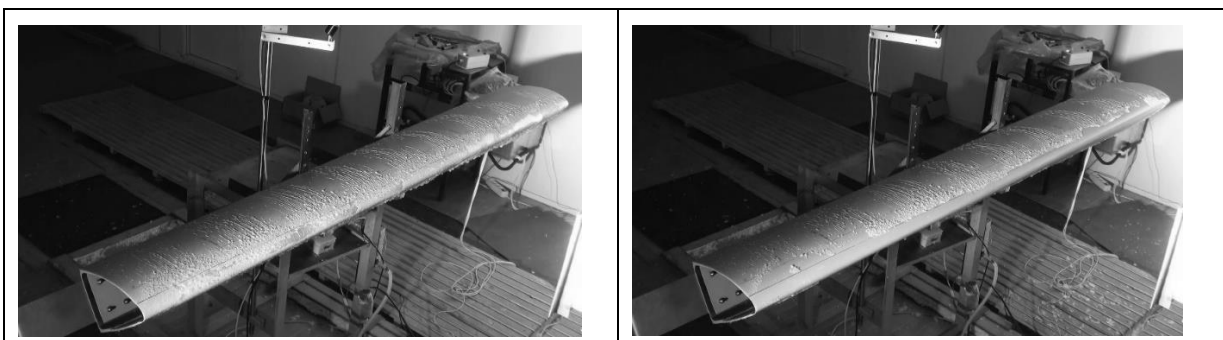


Рисунок 5 Секция крыла до и после срабатывания ЭИ ПОС

Ресурсные испытания

Для подтверждения отсутствия влияния на ресурсную прочность конструкции планера из ПКМ были проведены испытания на стойкость к циклическому ударному воздействию ЭИ ПОС на обшивку защищаемого агрегата.

Количество циклов нагружений при функционировании ЭИ ПОС устанавливалось в пределах назначенного ресурса БЛА. Было подтверждено сохранение работоспособности и отсутствие снижения эффективности ЭИ ПОС в течение назначенного ресурса БЛА. Эффективность оценивалась по относительному показателю, верифицированному на предыдущих этапах испытаний, – перемещениях обшивки под воздействием системы.

Результаты работы

1. Разработан и апробирован математический аппарат проектирования ЭИ ПОС.
2. Экспериментальными исследованиями подтверждены результаты моделирования. Обеспечено достаточное для сброса льда, образующегося в нормированных условиях обледенения, электромеханическое воздействие на защищаемые агрегаты планера.
3. Разработана конструкция ЭИ ПОС для ЛА с тонкостенными конструкциями деталей планера из ПКМ, выпущена расчетно-конструкторская документация.
4. Проведены ресурсные испытания, доказавшие отсутствие влияния работы электроимпульсной ПОС с выбранными параметрами на ресурсную прочность конструкции планера из ПКМ на протяжении всего ресурса БЛА.
5. Проведены приемочно-заводские испытания. ПОС внедрена в конструкцию планера БЛА «Орион». Идет подготовка серийного производства.
6. Получен патент на изобретение «Электроимпульсная система для удаления льдообразований с обшивки агрегатов летательного аппарата» № 2704699.

Новизна и практическое значение работы

Впервые в отечественной авиационной промышленности разработана электроимпульсная ПОС, применимая для защиты от обледенения тонкостенных конструкций планера ЛА, изготовленных из полимерных композиционных материалов.

Новизна применяемого технического решения состоит в том, в отличие от традиционного подхода к реализации ЭИ ПОС, в котором индукторы взаимодействуют непосредственно с обшивкой поверхности ЛА, в предложенном решении индукторы установлены парами и взаимодействуют друг с другом (токи, магнитные поля, магнитные потоки возникают в и между двумя индукторами), отталкиваясь друг от друга индукторы передают механическую деформацию через кронштейн на обшивку. Решение приводит к повышению КПД системы. Данное решение защищено патентом на изобретение № 2704699 от 30 января 2019.

Разработка внедрена в производство. Опытные и предсерийные образцы БЛА «Орион» оснащены ЭИ ПОС разработанной конструкции. Летная эксплуатация подтвердила эффективность ЭИ ПОС в заданных условиях эксплуатации.

Разработанное техническое решение применимо для других пилотируемых и беспилотных ЛА, агрегаты планера которых изготовлены из ПКМ.