DOI: 10.15593/2224-9982/2019.59.01

УДК 62-6:62-231

К.Е. Миляев, С.В. Семенов, А.А. Балакирев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ОБЗОР СПОСОБОВ БОРЬБЫ С ОБЛЕДЕНЕНИЕМ В АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Одна из актуальных проблем современного проектирования авиационных двигателей – обеспечение эффективности и работоспособности противообледенительной системы. Качество работы ПОС напрямую влияет на тягу двигателя, устойчивость и безотказность его работы. Известны случаи возникновения внезапного снижения тяги на крейсерском режиме полета в непосредственной близости от грозового фронта на высоте 8500–9000 м. Самопроизвольное снижение тяги вначале проявлялось в виде постепенного снижения частоты вращения вентилятора, повышения температуры газа перед турбиной и отсутствия реакции двигателя на команды пилота при изменении режима работы. Причем современная тенденция развития двигателей для гражданской авиации сводится к увеличению степени двухконтурности для повышения экономичности, что ведет к увеличению расхода воздуха в двигателе в целом и через наружный контур в частности. С повышением массового расхода воздуха растет и количество жидкости, замерзающей на входных кромках двигателя, или сухого льда, осаждающегося на обтекаемых поверхностях. В связи с этим совершенствуются существующие ПОС и разрабатываются концептуально новые подходы к обеспечению защиты двигателя от обледенения.

Проведен обзор различных методов борьбы с обледенением, которые включают как традиционные методы, которые себя широко зарекомендовали, так и новые перспективные разработки. Среди перспективных методов большое внимание уделялось рассмотрению систем ПОС, базирующихся на использовании электрической энергии и электромагнитных полей для удаления льда с защищаемых поверхностей. Затронуты также методы, которые не используют энергию для защиты: такой класс методов называется пассивной защитой от обледенения.

В результате рассмотрения способов борьбы с обледенением подведен итог и проведен сравнительный анализ систем ПОС, дающий оценку работоспособности и возможности использования таких методов в будущем.

Ключевые слова: противообледенительная система, тепловые ПОС, электрические ПОС, гибридные ПОС, металл с памятью формы.

K.E. Milyaev, S.V. Semenov, A.A. Balakirev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

WAYS OF FIGHT AGAINST FROSTING IN THE AVIATION ENGINE METHODS OF COUNTERING WITH ICING IN THE AIRCRAFT ENGINE

One of current problems of modern design of aviation engines – ensuring efficiency and operability of anti-icing system. The quality of work of AIS directly affects draft of the engine, stability of work and non-failure operation of work. Cases, emergence of sudden decrease in draft on the cruiser mode of flight in close proximity to a thunderstorm at the heights of 8500-9000 m are known. Spontaneous decrease in draft was shown in the form of gradual decrease in frequency of rotation of the fan, temperature increase of gas in front of the turbine and lack of reaction of the engine to the teams of the pilot at change of an operating mode in the beginning. And the current trend of development of engines for civil aviation comes down to increase in degree of a double-flow for increase in profitability that leads to increase in a consumption of air in the engine in general and through an external contour in particular. With increase in mass flow of air also the amount of the liquid freezing on entrance edges of the engine, or the dry ice which is besieged on streamline surfaces grows. In this regard the existing AIS are improved and conceptually new approaches to ensuring protection of the engine against frosting are developed.

In the real work various methods of fight against frosting which include as traditional methods which widely proved, and new perspective developments are considered. Among perspective methods much attention was paid to consideration of the AIS systems which are based on use of electric energy and electromagnetic fields for removal of ice from the protected surfaces. Methods which do not use energy for protection are also mentioned – such class of methods is called passive protection against frosting.

As a result of consideration of ways of fight against frosting the result is summed up and the comparative analysis of the AIS systems giving an assessment to working capacity and a possibility of use of such methods in the future is carried out.

Keywords: anti-icing systems, anti-icing systems with heating air, electric anti-icing systems, hybrid running-wet anti-icing system, shape memory alloys.

Введение

При эксплуатации летательного аппарата (ЛА) известна проблема образования льда на различных элементах, таких как входные кромки профиля крыла ЛА и фюзеляжа, обтекатель и воздухозаборник двигателя, кромки вентилятора. Обледенение входных элементов двигателя является причиной ухудшения как аэродинамических параметров, так и прочностных. Также заметно уменьшается тяга двигателя и наблюдается потеря приемистости. Обледенение входных кромок вентилятора и переднего кока искажает картину течения воздуха и приводит к отклонению его параметров от расчетных, что также может привести к возникновению отрывных явлений. Для сверхзвукового воздухозаборника обледенение может стать причиной возникновения неустойчивых режимов работы, проявляющихся в виде низкочастотных («помпаж») или высокочастотных («зуд») автоколебаний расхода и давления воздуха. Неравномерное обледенение кока приводит к возникновению дисбаланса на роторе, а откалывающиеся частички льда попадают в тракт двигателя. В связи с этим обтекатель проектируется так, чтобы лед попадал в канал наружного контура, тогда работа двигателя не нарушается. Однако известны случаи, когда отколовшийся лед от входных кромок вентилятора и кока попадал на ЗПК и срабатываемое покрытие. Лед, бомбардируя такие элементы, приводит к их разрушению и досрочному снятию двигателя с эксплуатации. Таким образом, актуальной проблемой, требующей учета при проектировании двигателя, является выбор типа и проработка конструкции эффективной противообледенительной системы.

Образование льда на входных частях двигателя может происходить по трем механизмам: капельное обледенение, сублимационное обледенение, сухое обледенение.

Капельное обледенение представляет собой обледенение при полете в среде, в которой содержатся переохлажденные капли воды. Существует несколько основных причин возникновения льда при таком типе обледенения [1]:

- наличие на обтекаемых поверхностях микронеровностей, кристаллов льда или пыли, которые являются центрами кристаллизации;
- возможность образования ультразвуковых волн при ударах капель о поверхность (как показано в работе [2], ультразвук значительно ускоряет процесс кристаллизации переохлажденной воды).

Такой тип обледенения наиболее часто встречается при полете воздушного судна через облака, в которых водяные капли находятся во взвешенном состоянии, при полете под дождем или в снегопад с мокрым снегом. Капельное обледенение является наиболее тяжелым для ЛА. Переохлажденная вода (вода в жидкой фазе при отрицательной температуре) при определенных условиях может долго сохраняться при низких температурах. Известны случаи такого типа обледенения при температуре воздуха, достигающей -65°C . На практике наиболее вероятные значения температуры капельного обледенения лежат в диапазоне от 0 до -20°C .

Сублимационное обледенение – обледенение, обусловленное переходом водяных паров в твердое состояние, минуя при этом жидкую фазу. Обычно такое явление происходит, когда воздушные массы, насыщенные влагой, контактируют с сильно охлажденными поверхностями, но при отсутствии облаков. Такое явление наблюдается при быстром снижении ЛА из холодных слоев атмосферы в более теплые с сохранением относительно низкой температуры наружных поверхностей. В этом случае образуются кристаллы льда, небольшие по размеру, непрочные держась на обшивке. Данный тип обледенения не является критичным.

Сухое обледенение представляет собой попадание и осаждение уже сформировавшегося льда, например при полете через кристаллические облака. Оседающий лед может стать центром кристаллизации для водяных паров.

Для борьбы с обледенением используются различные противообледенительные системы (ПОС), которые классифицируются по физическим принципам работы следующим образом [3]:

- масло-воздушно-тепловые;

- электрические;
- вибрационные;
- пневматические;
- жидкостные.

Тепловые ПОС

Традиционно для защиты от обледенения применяются тепловые ПОС, основными из которых являются воздушно-тепловые. На данный момент они являются наиболее распространенными системами. Принцип действия заключается в отборе от компрессора нагретого воздуха и подводе к месту обогрева [4].

Рис. 1. Меридиональное сечение двигателя ПС-90:
1, 2 – трубки подвода воздуха; 3 – труба ПОС [4]

Действие такой системы можно рассмотреть на примере двигателя ПС-90 (рис. 1) [5]. Для обогрева обтекателя отбирается воздух от седьмой ступени КВД. Воздух поступает по трубопроводам к обтекателю, через дефлектор течет вдоль стенок кока и выбрасывается в проточную часть. Сложность реализации такой конструкции заключается в проектировании системы подвода воздуха от КВД. Воздух от седьмой ступени КВД по трубопроводу 1 проходит к внутренней полости корпуса опоры. Далее воздух течет по трубке 2, которая расположена в полости опоры КНД. Из трубки 2 воздух передается к трубопроводу 3 через отверстия в вале вентилятора. Затем по трубопроводу 3 воздух подводится в полость обтекателя и выбрасывается через отверстия обтекателя в проточную часть. Недостатком такой схемы и всех подобных схем, основанных на отборе воздуха от компрессора, является ухудшение параметров двигателя.

Опыт эксплуатации современных ТРДД большой тяги, устанавливаемых на широкофюзеляжных самолетах, показал, что существенную угрозу безопасности полетов при обледенении представляет накопление, отрыв и попадание на вход вентилятора льда, а использование воздушно-тепловых ПОС не всегда является эффективным, поскольку возникают трудности с отбором воздуха в достаточном количестве для обеспечения потребного теплового нагрева [3].

К тому же осуществить подвод воздуха к вентиляторным лопаткам конструктивно невозможно. Для двигателей большой двухконтурности особенно остро стоит проблема нехватки горячего воздуха на обогрев, приводящей к существенному снижению экономичности двигателя.

Электрические ПОС

Отдельным направлением в современном развитии ПОС являются конструкции, основанные на использовании электрической энергии. К ним можно отнести:

- электрообогрев (электротермические);
- электроимпульсные системы;
- электромеханические импульсные противообледенительные системы.

Данные способы борьбы с обледенением находят широкое применение, так как базируются на использовании электрической энергии, а современный тренд проектирования двигателей заключается в создании «более электрического» самолета, в частности двигателя [6].

Электротермические ПОС

Система электрического обогрева представляет собой нагревательные маты, устанавливаемые на защищаемую поверхность. В общем случае состоит из электронагревательных элементов, коммутатора, датчиков температуры для защиты элементов системы от перегрева, сети и источника питания.

В качестве матов может быть использован нагревательный элемент на основе графита [7]. Такой элемент способен очень быстро нагреваться, поэтому лед над участком графитового элемента не успевает растаять, а откалывается от поверхности профиля. Откалывание происходит по причине возникновения тонкой прослойки пара между профилем и графитовым материалом. Этот пар, расширяясь, создает усилие, достаточное для удаления основной массы льда. Полный цикл работы системы не занимает много времени и позволяет удалять очень тонкие наросты льда, не повредив самолет. Подобная система была испытана в NASA для малых самолетов. Ее вес составляет менее 20 кг, включая собственный генератор [8].

В то же время электротермический обогрев может базироваться на резистивных элементах [9]. Пример действия системы представлен на рис. 2. В ходе испытаний обледенение профиля осуществлялось в течение 22 мин (см. рис. 2, а) и 44 мин (см. рис. 2, б). После включения системы удаление льда произошло примерно за 2 мин. По сравнению с воздушным обогревом система имеет гораздо меньшую инерционность. Однако в сравнении с электромеханическими системами запаздывание во много раз больше. Существенным недостатком использования такой системы являются большие затраты энергии.

$T = -6,11\text{ }^{\circ}\text{C}$. Цикл работы ПОС 2 мин

Рис. 2. Работа электротермической системы [9]

Для правильности определения характеристик и подбора необходимой мощности составляющих необходима разработка адекватных математических моделей. Существующие расчетные методы позволяют качественно и частично количественно смоделировать процесс образования ледяных наростов.

Например, разработано программно-методическое обеспечение, позволяющее моделировать процессы образования «барьерного» льда на незащищенной части аэродинамической поверхности с использованием осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса для сжимаемого газа, замкнутых с помощью модели турбулентности Spalart-Allmaras [10]. Для описания движения переохлажденных капель воды используется инерционная модель с использованием дифференциальных уравнений сохранения массы, количества движения и энергии для каждого элемента поверхности.

Известна работа, в которой рассматривались основные модели и методы исследования процессов обледенения аэродинамических поверхностей и условия, вызывающие обледенение, а также были разработаны программно-методические материалы, позволяющие моделировать процессы образования льда на передней кромке профиля крыла [11].

Электромеханические ПОС

Все системы базируются на передаче механических усилий на поверхность профиля или непосредственно льда с помощью актуаторов (приводов).

Электромагнитная ПОС

Электромагнитная система (*англ.* the Electro-Impulse Method) впервые запатентована в Англии в 1937 г. [12]. Принцип действия заключается в разрядке высоковольтных конденсаторов, установленных внутри защищаемой поверхности (рис. 3). В результате появляется электромагнитная сила отталкивания между конденсатором и обшивкой. Обшивка деформируется, тем самым отбрасывая лед во всех направлениях. Известными недостатками этого метода являются электромагнитные помехи, структурная усталость материала и реакция пассажиров на шум. ПОС-система на основе этого метода сертифицирована только на одном самолете (NASA Twin Otter), установлена в хвостовом оперении. Примеры использования метода непосредственно в двигателях ЛА отсутствуют.

Рис. 3. Схема устройства электромагнитной ПОС [12]

Электроимпульсная ПОС

Электроимпульсная ПОС – ЭИПОС (*англ.* Electro-Expulsive Separation System) является относительно новой противообледенительной системой самолетов [7]. Она состоит из двух основных рабочих компонентов, контроллера ЭИПОС и импульсной установки. Система дополнена датчиками льда, электрическими кабелями, индикаторами и органами управления. Принцип действия базируется на законе Ампера, который устанавливает закон взаимодействия проводников с током. Согласно закону Ампера, проводники, в которых ток течет в одном направлении, отталкиваются, а в противоположном – притягиваются. Сила Ампера при этом

Рис. 4. Принцип работы ЭИПОС [7]

оценивает степень влияния магнитного поля на помещенный в него проводник. С учетом использования данного принципа внутренний проводник крепится непосредственно к поверхности, обледенение которой нужно предупредить. Внешний проводник помещен поверх первого слоя. Оба слоя находятся в объеме эластомера и скреплены между собой (рис. 4, верхний рисунок). Для приведения системы в работу достаточно пропустить импульс тока. В следующий момент времени под действием силы Ампера проводники отталкиваются друг от друга, заставляя верхний проводник смещаться и деформировать эластомер (рис. 4, средний рисунок). Это движение с высоким ускорением разрушает сцепление льда с поверхностью. Система может работать непрерывно во время полета, действуя один или два раза в минуту, чтобы поддерживать чистоту поверхности. Преимуществом такого способа является то, что не происходит превращение льда в жидкое состояние, так как растаявший лед может снова замерзнуть далее по тракту. Другим достоинством является дробление образовавшегося льда на малые осколки, следовательно, предупреждается образование и попадание в двигатель больших кусков льда, способных нанести ущерб.

На практике система была установлена на самолет Ил-86 в качестве штатной системы защиты. В эксплуатации данного самолета оказалось достаточным производить три последовательных импульса длительностью около 10^{-4} с с периодом повторения 1–2 с [13].

Рис. 5. Пример работы электроимпульсной ПОС [14]

Эффективность работы электроимпульсной системы проверялась в лаборатории NASA [14]. На рис. 5, *а* показан образовавшийся лед в начале испытаний, в следующий момент времени запуска электроимпульсной ПОС появляется облако мелких частиц льда, отделяемого от профиля (рис. 5, *б*). В итоге основная масса льда удаляется с поверхности профиля (рис. 5, *в*), однако можно заметить, что удаление происходит не полностью. Остаются области с тонким слоем льда (рис. 5, *г*). Остаточный тонкий слой льда, который невозможно удалить подобным методом считается недостатком электроимпульсной системы.

Электромеханическая импульсная ПОС

Электромеханическая импульсная противообледенительная система – ЭМИПОС (англ. Electro-Mechanical Expulsion Deicing System) – основана на новейших технологиях в области защиты воздушных судов от льда и была разработана COX Inc [7]. Электрический импульс тока, подаваемый на исполнительные механизмы в определенных последовательностях, генерирует противоположные электромагнитные поля, которые заставляют исполнительные механизмы быстро менять форму. Изменение формы привода передается к защищаемой поверхности, изгибает ее и заставляет вибрировать на высокой частоте коротковолнового диапазона. В настоящее время ЭМИПОС состоит из блока управления, накопителя энергии, который содержит конденсаторы и электромеханический привод. Привод ЭМИПОС, показанный на рис. 6, изменяет свою толщину приблизительно на 0,3 мм, состоит из медных полос, свернутых в трубчатую форму с эллиптическим поперечным сечением.

Рис. 6. Электромеханическая импульсная противообледенительная система: *а* – исполнительный механизм; *б* – поперечное сечение и положение в сборке [7]

Блок управления посылает накопителю энергии команду в зависимости от величины обледенения. Когда импульс электрического тока подан от накопителя энергии к приводу, тогда под действием магнитного поля поперечное сечение привода быстро изменяет форму от эллиптической к похожей на круглую. Деформируясь, привод заставляет изменять форму обшивки защищаемой поверхности, тем самым удаляя лед.

Два ряда приводов обычно устанавливаются под обшивку в жестких каналах и запускаются попеременно между верхней и нижней поверхностями. Как правило, каждый привод срабатывает 3 раза за цикл удаления льда. Блок управления также контролирует выходную мощность подогревателя в совмещенных электротермических системах, если такие имеются.

Потребляемая мощность такой системы составляет менее 500 Вт для всего самолета. Поверхность защищаемого профиля отклоняется на величину от 0,06 до 0,09 мм за время менее 0,005 с. Минимальная толщина льда, которую система может удалить, составляет 0,15 мм

(рис. 7, 8) [9]. Следовательно, система не подходит для объектов, эксплуатация которых не рассчитана на работу с остаточной толщиной льда до 0,15 мм, или требуется ее использование совместно с другой системой.

Рис. 7. Демонстрация работы системы при толщине ледяной корки 0,06 мм [9]:
а – до включения системы; б – после включения системы

Рис. 8. Демонстрация работы системы при толщине ледяной корки 0,09 мм [9]:
а – до включения системы; б – после включения системы

В настоящее время для улучшения работы системы ЭМИПОС предлагается использовать электрообогрев лобовой части защищаемой поверхности. Такую систему называют гибридной ПОС (*англ.* Hybrid Running-Wet Anti-icing System).

Гибридная ПОС

Рис. 9. Схема гибридной ЭМИПОС [17]

Гибридная система защиты создавалась как менее энергозатратная альтернатива обычным ПОС, для которых мощности, затрачиваемые для получения требуемого уровня чистоты поверхности, недоступны или экономически нецелесообразны [15, 16]. К ЭМИПОС добавляется нагревательная подсистема, которая частично или полностью покрывает чувствительную к изменению шероховатости зону, расположенную на входной кромке обтекаемого тела (рис. 9). Нагревательный элемент гибридной системы поддер-

живает повышенную температуру на поверхности входной кромки, чтобы вода на защищаемой поверхности оставалась в жидком агрегатном состоянии и стекала дальше по профилю. После выхода из зоны подогрева вода начинает кристаллизироваться. Образовавшийся лед удаляется периодическим срабатыванием электромеханической импульсной системы (см. рис. 9). Так достигается минимизация затрат энергии.

Следует отметить, что минимальная толщина льда для удаления составляет порядка 0,15 мм. Следовательно, всегда будет существовать остаточный слой льда на защищаемой поверхности, расположенной в местах над приводами ЭМИПОС. Однако благодаря ЭМИПОС исключается возможность появления больших наростов льда в форме гребня волны, нарушающих картину обтекания профиля.

В результате потребляемая мощность, расходуемая на нагрев, гибридной системы намного ниже электротермической ПОС.

Хотя потребляемая мощность гибридной системы намного ниже, чем требуется для чисто нагревательной системы, она может считаться существенной для некоторых воздушных судов, особенно если этот тип применяется для защиты ото льда на больших участках аэродинамических поверхностей. В связи с этим был разработан новый тип гибридной системы, который также используется совместно с ЭМИПОС для обеспечения лучших характеристик защиты от обледенения при еще более низком потреблении энергии.

Термомеханическая электроимпульсная ПОС

Термомеханическая электроимпульсная ПОС (англ. Termo-Mechanical Expulsive Deicing System – TMEDS) представляет собой комбинацию электротермической и электроимпульсной систем [17]. В этом случае электротермический нагреватель не работает непрерывно, как в случае гибридной системы. Сначала срабатывает система ЭМИПОС для удаления основной массы льда. Нагревательный элемент приводится в действие только на короткий период времени для того, чтобы расплавить тонкий слой льда на аэродинамическом профиле (рис. 10). Такая система исключает непрерывный подогрев защищаемой поверхности. Согласно Al-Khalil [16], лед может быть быстро удален, чтобы предотвратить непрерывный его рост. Используя те же принципы, что и предыдущая гибридная система, термомеханическая электроимпульсная ПОС требует меньше энергии, поскольку нагревательные элементы не работают постоянно.

Рис. 10. Схема устройства термомеханической электроимпульсной ПОС [17]

В работе [9] был изготовлен макет термомеханической электроимпульсной ПОС с использованием аэродинамических профилей NASA и испытан в аэродинамической трубе. Была проведена оценка эффективности нескольких вариантов конструкции при различных температурах окружающей среды и условиях обледенения. На рис. 11 показаны результаты испытаний образца в течение 45 мин в режиме обледенения при температуре -3°C . Цикл работы ПОС 1–2 мин.

Рис. 11. Демонстрация работы термомеханической электроимпульсной ПОС [9]:
а – до включения системы; б – после включения системы

В экспериментальном исследовании в течение цикла обледенения при температуре 20°F была получена плавно текстурированная ледяная фракция льда (см. рис. 11, а). После включения системы в течение 1–2 мин происходит полное удаление льда без остаточного тонкого слоя. Удельная мощность нагревателя составляет около 54 кВт/м^2 . Такая мощность обогревателя обеспечивает быстрое удаление остаточного тонкого слоя льда.

Применение материалов с памятью формы

Материалам с памятью формы (*англ.* Shape Memory Alloy) присуще явление возврата после деформирования к первоначальной форме при нагреве. Эффект памяти формы состоит в том, что образец, имеющий определенную геометрию в аустенитном состоянии при повышенной температуре, деформируют при более низкой температуре мартенситного превращения. После перегрева, сопровождающегося протеканием обратного превращения, исходная характерная форма восстанавливается. Память формы проявляется в сплавах, характеризующихся термоупругим мартенситным превращением, когерентностью решеток исходной аустенитной и мартенситной фаз, сравнительно небольшой величиной гистерезиса структурного превращения, а также малыми изменениями объема при превращениях [16]. Явление изменения формы может быть использовано для удаления льда. Например, предложена конструкция [7], в которой применяется тонкий лист материала с памятью формы (рис. 12, а). Лист монтируется на поверхность передней кромки профиля, чтобы при воздействии температуры он мог деформироваться, тем самым сбрасывая ледяной нарост. В работе такой лист вжимается внутрь профиля (см. рис. 12, а), при этом утягивая часть льда за собой, тем самым ломая и раскалывая его. Для подвода энергии и инициации изменения формы сплава используется электрический нагрев. Система способна быстро нагревать сплав, чтобы заставить его деформироваться. При отключении системы подогрева обдуваемый холодным воздухом тонкий лист быстро охлаждается и принимает исходную форму.

Для удаления льда не только с носовой кромки, но и на некотором удалении используется более сложная система (рис. 12, б), которая включает в себя привод, лист из сплавов с памятью

формы и специального оребрения. При работе системы аэродинамический профиль из материала с памятью формы изгибается и принимает форму формообразующих ребер. Сложность в том, что длина рабочего участка в исходном и изогнутом состоянии значительно отличается и затрудняется получение заданной формы. Для решения этой проблемы используется еще один элемент с памятью формы – привод. При включении ПОС привод растягивается, тем самым упрощая работу формообразующих элементов.

Рис. 12. Пример работы сплава с памятью формы в конструкции ПОС [6]

Самым распространенным материалом для сплавов с памятью формы является сплав на основе никеля и титана (нитинол). Такой сплав обладает хорошими характеристиками формо-запоминания (деформация до 8 % может полностью восстанавливаться, напряжение при этом может достигать 800 МПа), высоким сопротивлением коррозии и износостойкости. Температуры преобразования находятся в интервале значений -100 и $+100$ °C. Подробные расчеты показали, что для нагрева листа за 10 с до необходимой температуры необходим поток энергии, равный $38,7 \text{ кВт/м}^2$, что типично для электротермических ПОС, например термической ЭМИПОС, рассмотренной ранее [7].

Пассивная защита

Ранее рассматривались методы по удалению уже образовавшегося льда. Целью пассивной защиты является предотвращение или предупреждение чрезмерного нарастания льда с помощью специальных конструктивно-технологических мероприятий. В этом случае обеспечение противообледенительной защиты осуществляется без затрат энергии и не зависит от условий полета или действий экипажа.

К пассивным способам относят применение гидрофобных покрытий, снижающих адгезионные силы сцепления льда с поверхностью, а также разработка конструктивных мероприятий, связанных с приданием особым форм подверженным обледенению элементам, которые препятствуют образованию льда. Другим методом может стать применение различных аэроупругих, аэродинамических и аэромеханических явлений типа вращающегося срыва [18].

В настоящее время известны испытания по применению пассивной защиты, основанной на скачкообразном изменении оборотов ротора низкого давления. Образующийся лед на роторных поверхностях (обтекатель и рабочие лопасти) удаляется при помощи скачкообразно увеличивающихся центробежных сил. Принцип работы заключается в зависимости центробежных сил от частоты оборотов ротора. Так, если резко увеличить частоту оборотов на 5 %, то величина центробежных сил увеличится примерно на 10 %, так как центробежная сила пропорциональна квадрату частоты вращения ротора. Если внезапное увеличение оборотов не сбросит ледяные наросты, то можно использовать механику резкого торможения ротора до первоначаль-

ных оборотов. Так появится второй силовой фактор – инерционные силы. В итоге эффективность метода повышается, так как он способен отбрасывать лед как при резком увеличении оборотов, так и при их понижении.

Заключение

Задачей работы является проведение обзора современных и перспективных методов предотвращения образования льда на элементах двигателя. Были рассмотрены активные методы по удалению льда с поверхности и пассивные, которые предотвращают чрезмерное его образование.

В настоящее время хорошо себя зарекомендовала группа электромеханических методов. Системы хорошо себя показывают на аэродинамических поверхностях профиля, однако попытка применения таких систем для кока двигателя порождает сразу несколько проблем.

Первая проблема – высокая жесткость конструкции кока. Деталь является вращающейся и на нее действует центробежная сила, к тому же сила аэродинамического напора от набегающего воздушного потока, поэтому кок не может быть тонкостенным. Может оказаться так, что мощности актуаторов электромеханических систем просто окажется недостаточно для борьбы со льдом или потребная мощность возрастет так, что необходима будет установка мощного энергоносителя, приводящего к чрезмерному увеличению массы двигателя.

Второй проблемой является подвод энергии к вращающемуся коку. Это серьезная проблема, которая ограничивает применение электрических методов. Генератор энергии находится в статорной части двигателя, а энергию необходимо подвести к подвижной части. Требуется создание электрических контактов типа ротор-статор или постановка генератора энергии таким образом, чтобы обмотки оказались на роторе, а катушки на статоре – интегрируемая энергоустановка. Интегрировать энергоустановку кажется оптимальным решением, но влечет увеличение массы ротора, усложнение конструкции. Появляется серьезная проблема, связанная с балансировкой.

Благодаря тому, что такие методы решают проблему с подводом энергии, они могут быть эффективно использованы.

Применение пассивных методов защиты к традиционному воздушному обогреву может существенно повысить эффективность ПОС, но каждый из способов имеет свои ограничения.

Применение гидрофобных покрытий осложнено тем, что кок расположен в носовой части и напрямую контактирует с попадающими в него инородными предметами. Встает вопрос о ресурсе такого покрытия. Также необходимо такое покрытие, сцепление которого с обтекателем не нарушится при больших центробежных силах.

Может быть использована конструкция с особой формой кока, которая имеет небольшой эксцентриситет, усиливающая вибрации, тем самым сбивая лед. Однако встает вопрос о надежности опоры, которая должна воспринимать дополнительный искусственный дисбаланс.

Применение аэродинамических явлений к предупреждению обледенения самого кока маловероятно, так как изначально эти методы позиционируются на использовании явлений, возникающих в решетках профилей.

Интересным и перспективным методом пассивной защиты является использование скачкообразного изменения оборотов ротора двигателя для борьбы с обледенением. При должной эффективности система позволит отказаться от других методов, поскольку для борьбы с обледенением изначально не предусматривается никаких конструктивных и технических решений, что позволит значительно упростить конструкцию и снизить массу двигателя.

Библиографический список

1. Функциональные системы аэрокосмической техники: учеб. пособие / А.В. Бетин, Н.В. Бондарева, В.Н. Кобрин, С.А. Лобов, Н.В. Нечипорук; Нац. аэрокосм. ун-т «Харьков. авиац. ин-т». – Харьков, 2005. – 112 с.
2. Влияние ультразвука на кристаллизацию. Физические основы ультразвуковой технологии. Зарождение центров кристаллизации при наличии ультразвукового поля [Электронный ресурс]. – URL: http://steelcast.ru/ultrasonic_effect_on_solidification (дата обращения: 03.04.2019).
3. Современные способы обеспечения противообледенительной защиты ТРДД большой тяги с высокой степенью двухконтурности: аналит. обзор № 580 / ЦИАМ им. П.И. Баранова. – М., 2012.
4. Анализ разрабатываемых конструкций противообледенительных систем ТРДД большой степени двухконтурности и воздухозаборников их мотогондол в обеспечение проектирования ПОС силовой установки перспективных БСМС: техн. отчет ин. № 300-4899 / ЦИАМ им. П.И. Баранова. – М., 2012.
5. Нихамкин М.А., Зальцман М.М. Конструкция основных узлов двигателя ПС-90А: учеб. пособие / Перм. гос. техн. ун-т. – 2-е изд., испр. и доп. – Пермь, 2002. – 108 с.
6. Электрический самолет: концепция и технологии / А.В. Левин, С.М. Мусин, С.А. Харитонов [и др.]; УГАТУ. – Уфа, 2014. – 388 с.
7. Goraj Z. An overview of the deicing and antiicing technologies with prospects for the future // 24th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS 2004) / Warsaw University of Technology. – Warsaw, 2004. – P. 11.
8. Newton D. Severe weather flying / Aviation Supplies & Academics, Inc. – Washington, 2002. – 187 p.
9. Al-Khalil K.M. Thermo-mechanical expulsion deicing system – TMEDS / Cox and Company, Inc., American Institute of Aeronautics and Astronautics. – New York, NY, 2014. – 13 p.
10. Приходько А.А., Алексеенко С.В. Численное моделирование процессов обледенения аэродинамических поверхностей с образованием «барьерного» льда // Ioffe Journals. – 2014. – № 3. – С. 580–589.
11. Приходько А.А., Алексеенко С.В. Математическое моделирование процессов образования наростов льда на поверхности профиля крыла // Механика жидкости и газа. – 2014. – № 6. – С. 17–36.
12. Attachable electro-impulse de-icer: pat. 5,129,598. – July 1992. – URL: <https://patents.justia.com/patent/5129598> (accessed 03 April 2019).
13. Ефимов В.В. Конструкция и техническое обслуживание летательных аппаратов. Самолет Ил-86: учеб. пособие. Ч. 1. Планер / МГТУ ГА. – М., 2006. – 100 с.
14. Bluck J. NASA lightweight 'ice zapper' to be used on new aircraft // Astrogram J. – 26.06.1998. – No. 9. – 10 p. – URL: https://history.arc.nasa.gov/Astrogram/Astrogram_1998_06_26.pdf (accessed 03 April 2019).
15. Al-Khalil K.M., Ferguson T., Phillips D. A hybrid anti-icing ice protection system // AIAA 35th Aerospace Sci. Meeting, Reno, NV, Jan. 1997. – AIAA Paper 97-0302. – 9 p.
16. Al-Khalil K.M., Ferguson T.F. Hybrid ice protection system for use on roughness-sensitive airfoils: pat. 6196500. U.S. – June 11, 1999. – URL: <https://patents.google.com/patent/US6196500B1/en> (accessed 03 April 2019).
17. Krammer P., Scholz D. Estimation of electrical power required for deicing systems // Hamburg University of Appl. Sci. – Hamburg, 2009. – 42 p.
18. Ланшин А.И. Исследование возможности использования газодинамических и вибрационных явлений и их использование для очистки элементов ото льда // Двигатели-XXI / ЦИАМ им. П.И. Баранова. – М., 2008.

References

1. Betin A.V., Bondareva N.V., Kobrin V.N., Lobov S.A., Nechiporuk N.V. Funktsional'nyye sistemy aerokosmicheskoy tekhniki [Functional systems of aerospace engineering. Tutorial]. Kharkov: National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", 2005, 112 p
2. Vilyaniye ultrazvuka na kristallizatsiyu. Fizicheskiye osnovy ultrazvukovoy tekhnologii. Zarozhdeniye tsentrov kristallizatsii pri nalichii ultrazvukovogo polya [Wigging of ultrasound on crystallization. Physical fundamentals of ultrasonic technology. The nucleation of crystallization centers in the presence of an ultrasonic field]. [Electronic resource]. URL: http://steelcast.ru/ultrasonic_effect_on_solidification (Application date 04/03/2019).

3. Sovremennyye sposoby obespecheniya protivobledenitel'noy zashchity TRDD bolshoy tyagi s vysokoy stepenyu dvukhkoturnosti [Modern methods of providing anti-icing protection of high-thrust turbofan engines with a high degree of bypass]. Moscow: Central Institute of Aviation Motors, 2012, Analytical Review no. 580, 145 p.
4. Analiz razrabatyvayemykh konstruktsiy protivobledenitel'nykh sistem TRDD bol'shoy stepeni dvukhkoturnosti i vozdukhozabornikov ikh motogandol v obespeche-niye proyektirovaniya POS silovoy ustanovki perspektivnykh BSMS [Analysis of the developed designs of anti-icing systems of turbofan engines with a large degree of bypass and air intakes of their motogandol to ensure the design of the anti-icing systems of the power plant of prospective BSMS]. Moscow: Central Institute of Aviation Motors, 2012, Technical Report in. No. 300-4899.
5. Nikhamkin M.A., Zaltsman M.M. Konstruktsiya osnovnykh uzlov dvigatelya PS-90A. Ucheb. Posobiye [The design of the main engine components PS-90A. Textbook Allowance]. Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2002, 108 p.
6. Levin A.V., Musin S. M., KHaritonov S. A. Elektricheskiy samolet: kontseptsiya i tenkhologii [Electric aircraft: concept and tenchology]. Ufa: USATU, 2014, 388 p.
7. Goraj Z. An overview of the deicing and antiicing technologies with prospects for the future / Warsaw University of Technology. 24th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS 2004), 2004, 11 p.
8. Newton D. Severe Weather Flying. Aviation Supplies & Academics, Inc., Washington, 2002, 187 p.
9. Al-Khalil Kamel. Thermo-Mechanical Expulsion Deicing System – TMEDS. Cox and Company, Inc., New York, NY, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014, 13 p.
10. Prikhodko A.A., Alekseyenko S.V. Chislennoye modelirovaniye protsessov obledeneniya aerodinamicheskikh poverkhnostey s obrazovaniyem "baryernogo" l'da [Numerical modeling of icing of aerodynamic surfaces with the formation of "barrier" ice]. *Ioffe Journals*. Dnepropetrovsk: Dnepropetrovsk National University, 2014, no. 3, pp. 580-589.
11. Prikhodko A.A., Alekseyenko S.V. Matematicheskoye modelirovaniye protsessov obrazovaniya narostov l'da na poverkhnosti profilya kryla [Mathematical modeling of the formation of ice growths on the surface of the wing profile]. *Mechanika zidkosti i gaza*. Dnepropetrovsk: Dnepropetrovsk National University, 2014, no. 6, pp. 17-36.
12. Patent 5,129,598, July 1992. Attachable electro-impulse de-icer. – URL: <https://patents.justia.com/patent/5129598> (Application date 04/03/2019).
13. Efimov V.V. Konstruktsiya i tekhnicheskoye obsluzhivaniye letatelnykh apparatov. Samolet Il-86. Chast 1: Planer. Uchebnoye posobiye [Design and maintenance of aircraft. Aircraft IL-86. Part 1: Glider. Tutorial]. Moscow: Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2006, 100 p.
14. Bluck J. NASA lightweight 'ice zapper' to be used on new aircraft. *Astrogram journal*, 26.06.1998. No. 9. 10 p. URL: https://history.arc.nasa.gov/Astrogram/Astrogram_1998_06_26.pdf (Application date 04/03/2019).
15. Al-Khalil K.M., Ferguson T., Phillips D. A Hybrid Anti-icing Ice Protection System. AIAA 35th Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, Jan. 1997. AIAA Paper 97-0302, 9 p.
16. Al-Khalil K.M., Ferguson T.F. Hybrid ice protection system for use on roughness-sensitive airfoils. – U.S. Patent 6196500. – June 11, 1999. – URL: <https://patents.google.com/patent/US6196500B1/en> (Application date 04/03/2019).
17. Estimation of Electrical Power Required for Deicing Systems / P. Krammer, D. Scholz // Hamburg University of Applied Sciences, 2009, 42 p.
18. Lanshin A.I. Issledovaniye vozmozhnosti ispolzovaniya gazodinamicheskikh i vibratsionnykh yavleniy, i ikh ispolzovaniye dlya ochistki elementov oto l'da [Investigation of the possibility of using gas-dynamic and vibration phenomena, and their use for cleaning elements from ice]. Dvigateli-XXI, Moscow: Central Institute of Aviation Motors, Moscow, 2008.

Об авторах

Миляев Кирилл Евгеньевич (Пермь, Россия) – студент кафедры «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: daloros@inbox.ru).

Семенов Сергей Валерьевич (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: sergey.semyonov@mail.ru).

Балакирев Александр Андреевич (Пермь, Россия) – инженер кафедры «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: 1st.leonao@gmail.com).

About the authors

Kirill E. Milyaev (Perm, Russian Federation) – Student of Aircraft Engines Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: daloros@inbox.ru).

Sergey V. Semenov (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer of Aircraft Engines Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: sergey.semyonov@mail.ru).

Alexander A. Balakirev (Perm, Russian Federation) – Engineer of Aircraft Engines Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: 1st.leonao@gmail.com).

Получено 30.06.2019