

*Ташлинцев Дмитрий Александрович
студент 3 курса,
факультет информационных технологий и электроники
Пензенский государственный университет,
Россия, г. Пенза
e-mail: probender58@gmail.com*

*Попов Арсений Андреевич
студент 3 курса,
факультет информационных технологий и электроники
Пензенский государственный университет,
Россия, г. Пенза*

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ПРОТИВООБЛЕДЕНИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ВЕРТОЛЕТА

***Аннотация:** обледенение вертолета в процессе полета является очень опасным явлением. В связи с этим практически на каждом типе воздушного судна предусмотрена какая-либо противообледенительная система (ПОС). В данной статье рассматривается ультразвуковой метод борьбы с обледенением, который способен расслаивать тонкие слои (толщиной менее 2 мм) аккрецированного льда под действием центробежных сил.*

***Ключевые слова:** обледенение, противообледенительная система, ультразвук, обледенение, вертолет.*

*Tashlintsev Dmitry Aleksandrovich
3rd year student,
Faculty of Information Technology and Electronics
Penza State University,
Russia, Penza*

*Popov Arseniy Andreevich
3rd year student,
Faculty of Information Technology and Electronics
Penza State University,
Russia, Penza*

HELICOPTER ULTRASONIC DE-ICING SYSTEM

***Summary:** Helicopter icing during flight is a very dangerous phenomenon. In this regard, almost every type of aircraft has some kind of anti-icing system (PIC). This*

article discusses the ultrasonic method of de-icing, which is able to delaminate thin layers (less than 2 mm thick) of accreted ice under the action of centrifugal forces.

Keywords: icing, anti-icing system, ultrasound, icing, helicopter.

Обледенение – это отложение льда (иней или изморози) на обтекаемых частях вертолётов при полете в облаках, мокром снеге и тумане. Оно возникает при наличии в воздухе достаточной влаги (облака, осадки), отрицательной температуры воздуха и поверхности воздушного судна [1, с. 4].

Обледенение для вертолета является одним из опасных влияний окружающей среды. При попадании воздушного судна в среду обледенения, переохлажденные капли воды падают на переднюю кромку лопастей несущего винта. Капли воды замерзают при ударе о ротор. На роторе происходит накопление льда и при этом ухудшаются эксплуатационные характеристики и управляемость вертолета. Адгезия ротора ко льду увеличивает лобовое сопротивление, способствует разделению потока и создает высокий уровень вибрации.

Самую большую опасность представляет обледенение несущего винта вертолета, которое отличается значительным своеобразием. При постоянном числе оборотов двигателя, интенсивность обледенения винтов зависит от материала, из которого сделаны лопасти; от линейной скорости движения лопастей; от качества обработки лопастей; от метеорологических факторов. При температуре воздуха -10°C и ниже, лопасти большинства вертолетов обледеневают практически по всей длине [2, с. 25].

В зоне обратного обтекания может обледеневать и задняя кромка. В этом случае передняя кромка покрывается льдом меньше из-за малых окружных скоростей и неполного оборота прямого обтекания. Нарастание льда приводит к повышению лобового сопротивления, которое в свою очередь способствует увеличению крутящего момента, необходимого для поддержания подъемной силы вертолета.

Еще одной серьезной проблемой, вызванной аккрецией льда на вращающихся лопастях, является осыпание льда с лопастей вертолета. Удар

льдины может привести к серьезным повреждениям воздушного судна. Если лед осыпается неравномерно, дисбаланс массы несущего винта вызывает нежелательные вибрации и изменяет управляемость транспортного средства.

Для устранения льда с поверхности вертолета разрабатываются системы защиты от обледенения. Для определения эффективности этих систем, к ним предъявляются жесткие требования по весу, энергопотреблению и занимаемому объему. Системы защиты от обледенения можно разделить:

по характеру работы:

- противообледенительные – системы удаления уже образовавшегося льда (имеют циклический характер действия);

- антиобледенительные – которые в принципе не допускают появление льда;

по принципу действия:

- механические – пневматические, электроимпульсные, ультразвуковые, гидрофобные покрытия;

- физико-химические – жидкостные, тепловые (воздушно-тепловые, электротепловые) [2, с. 40].

Чтобы избежать критического образования льда на несущем винте, промышленность приняла стандартную систему противообледенения – электротепловая система. Эта противообледенительная система использует тепловую энергию для растопления накопившегося льда. Термический противообледенительный механизм запускается периодически во избежание большого энергопотребления или чрезмерного нагрева передней кромки конструкции. Такая система требует большого количества энергии (приблизительно $3,9 \text{ Вт/см}^2$) и способствует нежелательному увеличению общего веса и стоимости вертолета. Также данному методу присущи баллистические проблемы, возникающие из-за обледенения льда во время эксплуатации, поскольку система позволяет льду нарастать до толщины до 6,35 мм на передней кромке. Последняя проблема электротермического антиобледенения – это “бег воды назад”, поскольку неправильно

сублимированная ледяная поверхность может течь в кормовом направлении и снова замерзнуть в области, где нет защиты ото льда [3, с. 68]. Из-за этих недостатков, многие малые и средние гражданские вертолеты не используют никаких противообледенительных средств, что ограничивает работу этих машин в неблагоприятных условиях.

Поиски маломощной, нетепловой системы антиобледенения породили несколько импульсных систем противообледенения, которые стремятся разломить и сбросить накопившийся лед. Электроимпульсные системы защиты льда, пневматическая система, структурные резонансные системы и жидкое антиобледенение являются некоторыми из методов антиобледенения, которые были изучены. Снижение мощности и нетепловое удаление льда было достигнуто этими предлагаемыми системами, но каждая из них имеет связанные с этим недостатки. Электроимпульсное противообледенение никогда не применялось к лопастям несущего винта вертолета из-за большого объема приведения в действие, соображений усталостных напряжений и связанных с ними проблем реализации в конечном пространстве D-лонжерона. Применение пневматических противообледенительных систем на винтокрылых машинах требует сложных пневматических контактных колец для передачи воздуха от двигателя к роторам. В неразвернутом состоянии эти системы создают нежелательное увеличение требуемой мощности для горизонтального полета и избыточные вибрации в развернутом состоянии. Структурные резонансные системы работают при достижении значительной толщины льда. Кроме того, напряжения, создаваемые вибрацией в лопасти, являются причиной расслоения композита D-лонжерона [3, с. 103]. Для реализации жидкого метода противообледенения требуется перевозка на борту большого количества жидкости. Противообледенительная жидкость должна быть передана на лопасти через сложные скользящие кольца. Кроме того, засорение передней кромки отверстия является проблемой для этого типа систем.

Для предотвращения недостатков приведенных противообледенительных систем было предложено использовать ультразвуковые волны в качестве

маломощной системы защиты ото льда. В ультразвуковой противообледенительной системе генерируются поперечные сдвиговые напряжения на границе раздела лед/лопасть вертолета, превышающие прочность сцепления льда с поверхностью, чтобы отслаивать тонкие слои (толщиной менее 2 мм) аккрецированного льда от лопасти несущего винта. С помощью резонирующих пьезоэлектрических сдвиговых приводов генерируются ультразвуковые сдвиговые колебания и происходит мгновенное микроскопическое растрескивание и таяние аккрецированных слоев льда. Доказательство концепции испытаний показало возможности ультразвукового антиобледенения для удаления ударного обледенения с минимальной мощностью - $0,18 \text{ Вт/см}^2$ [4, с. 52].

Чтобы исключить тепловую энергию как основную причину обледенения, температура привода должна оставаться значительно ниже точки замерзания при непрерывном приводе с подходящей ультразвуковой частотой противообледенения. Для достижения поперечных сдвиговых напряжений, способных расслаивать лед, пьезоэлектрический привод должен работать в ультразвуковом режиме (резонансном режиме). Ультразвуковой режим пьезоэлектрического привода может быть определен в режиме реального времени путем исследования импеданса привода [4, с. 92]. С этой целью были разработаны программные и аппаратные средства, позволяющие постоянно контролировать сопротивление противообледенительного привода и управлять системой на частоте, соответствующей подходящему ультразвуковому режиму противообледенения.

Без согласования импеданса между приводом и источником усилителя не будет происходить мгновенное расслоение льда. Согласование импеданса относится к практике попытки сделать выходное сопротивление источника питания равным входному сопротивлению привода, к которому он в конечном счете подключен. Это делается для максимизации передачи мощности и минимизации отражений от нагрузки. Согласование импеданса - это частичное решение, позволяющее минимизировать требования к входной мощности для

создания достаточных напряжений на границе раздела льда для сбрасывания аккрецированного льда.

Сопротивление привода определяется путем последовательного соединения резистора (с сопротивлением 10 Ом) с приводом. Изменяя частоту с шагом 50 Гц в диапазоне от 1 кГц до 100 кГц, измеряется падение напряжения на резисторе [5, с. 36]. В результате, импеданс вычисляется путем умножения сопротивления резистора на падение напряжения, формируется кривая зависимости импеданса от частоты (рис. 2).

Как только привод примет значение импеданса аналогичное значению импеданса приводной электроники, образованной усилителем и генератором сигналов, программа переключается из первого механического состояния (проверка импеданса) во второе механическое состояние (приведение в действие) [5].

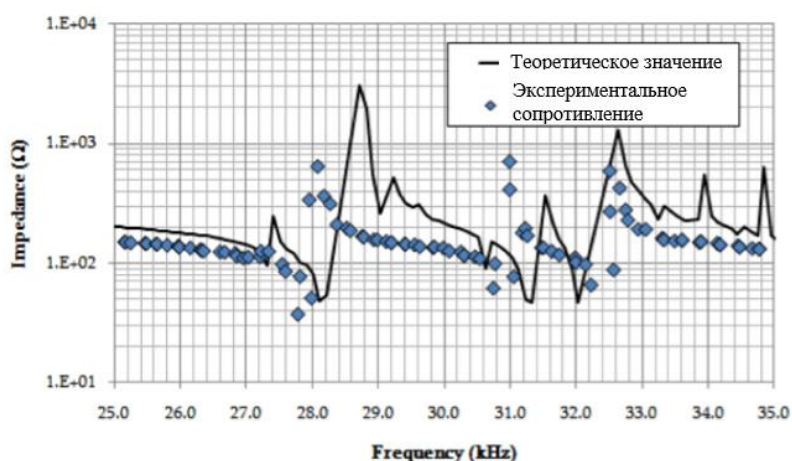


Рисунок 2. Сравнение прогнозируемой и экспериментальной кривой импеданса

Для выбора ультразвукового привода, способного мгновенно расслаивать аккреционный лед, важно не только обеспечить согласование импеданса между приводом и источником усилителя, но и обеспечить граничные напряжения сдвига, превышающие прочность сцепления аккреционного льда. Существует два различных типа межфазных сдвиговых напряжений, создаваемых на основной структуре при приведении в действие пьезоэлектрический материал: поперечные сдвиговые напряжения (ответственны за процессы расслоения льда

между слоями) и продольные сдвиговые напряжения (способствуют растрескиванию льда) [6, с. 73].

В процессе работы в материале и основной структуре привода создается распределенное тепловыделение. Повышение температуры в системе способствует таянию льда и создает дополнительные тепловые напряжения. Чтобы свести к минимуму эти эффекты, требуется привод с повышенной температурой, не превышающей замерзания.

Для формирования поперечных сдвиговых напряжений используются дисковые ультразвуковые приводы PZT-4. Данный привод был выбран потому, что в ультразвуковом радиальном режиме (входная мощность 60 Вт, частота 28,5 кГц) он обеспечивал необходимые по значению поперечные сдвиговые напряжения на границе раздела слоя льда толщиной 2,5 мм [6, с. 108]. На рисунке 3 представлена схема передней кромки винта вертолета с закрепленными дисковыми приводами PZT-4.

Прогнозируемые ультразвуковые частоты, наиболее подходящие для создания поперечных сдвиговых напряжений, способных мгновенно деактивировать аккрецированный лед, будут такими, которые обеспечивают минимальные значения импеданса. Именно на этих частотах (28,5 и 30,5 кГц) поперечное напряжение сдвига ледяной поверхности максимизируется при заданном входном напряжении. На других частотах, удаленных от минимумов импеданса, поперечные сдвиговые напряжения на границе раздела льда находятся значительно ниже необходимого значения [7, с. 114].

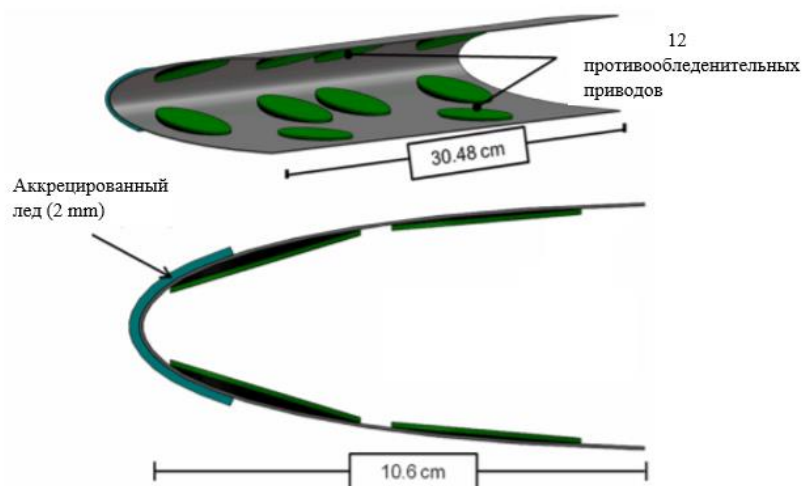


Рисунок 3. Схема передней кромки винта вертолета с закрепленными ультразвуковыми приводами PZT-4

На частотах, соответствующих минимуму импеданса, расслаивание льда не прогнозируется. Чтобы способствовать расслаиванию льда на данных частотах, потребуется увеличение входного напряжения (500 В для частоты 23 кГц и 375 В для частоты 33,5 кГц). Несмотря на то, что входное напряжение, необходимое для формирования поперечных напряжений, способных расслаивать аккрецированный слой льда, увеличится, соответствующая мощность, для антирезонансного режима, уменьшится. Это означает, что согласование импеданса между нагрузкой и приводной электроникой осуществляется принудительно. При маломощном антирезонансном режиме (частота равна 33,5 кГц) импеданс режима превышал импедансы согласующей сети [7, с. 57]. По этой причине резонансные ультразвуковые частоты (28,5 и 30,5 кГц) выбраны в качестве основных частот для работы с прогнозируемыми значениями поперечных сдвиговых напряжений на границе раздела лед/сталь.

Таким образом, при обеспечении всех вышеперечисленных условий можно добиться мгновенного расслоения между льдом и поверхностью винта вертолета при помощи ультразвукового возбуждения в виде поперечных сдвиговых напряжений. Данную систему можно применять как на габаритных вертолетах, так и на малогабаритных. Это объясняется небольшой входной мощностью, необходимой для мгновенного расслоения тонких слоев льда ($0,37 \text{ Вт/см}^2$). Это значение мощности на 90 % меньше по сравнению с системами современных электротермических противообледенительных систем.

Список литературы:

1. Мазин И.П. Физические основы обледенения самолетов. М.: Гидрометеиздат, 1957. 120 с.
2. Тенишев Р.Х., Строганов Б.А., Савин В.С. и др. Противообледенительные системы летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1967. 320 с.

3. Scavuzzo R.J., Chu M.L, Kellackey C.J. Impact Ice Stress in Rotating Airfoils // Journal of Aircraft. July 1991. Vol. 28. No. 7. Pp. 103-105.
4. Gent R.W., Dart N.P., Candsdale J.T. Aircraft Icing // Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences. 2000. Vol. 358. Pp. 102-103.
5. Martin C.A., Putt J.C. Advanced Pneumatic Impulse Ice Protection System (PIIP) for Aircraft // Journal of Aircraft. 1992. Vol. 29. No. 4. Pp. 36-38.
6. Stallabrass J., Price R. On the Adhesion of Ice to Various Materials // National Research Council Canada. Ottawa. July 1962. Pp. 73.
7. Bascom W., Cottington R., and Singleterry, C. Ice Adhesion to Hydrophilic and Hydrophobic Surfaces // Journal of Adhesion Science and Technology. Oct. 1969. Vol. 1. Pp. 57-59.