

УДК 629.7.067.5

Использование электрообогрева для защиты входных элементов двигателя от обледенения

А.А. Жердев¹, А.В. Горячев², С.А. Гребеньков², В.Г. Жулин²,
П.А. Горячев², В.В. Савенков²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

² ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», 111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2.

Using electric heating to protect engine input elements from icing

A.A. Zherdev¹, A.V. Goryachev², S.A. Greben'kov², V.G. Zhulin²,
P.A. Goryachev², V.V. Savenkov²

¹ Bauman Moscow State Technical University, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation.

² Central Institute of Aviation Motors n.a. P.I. Baranov, CIAM, Aviamotornaya str., 2, 111116, Moscow, Russian Federation.



e-mail: zherdev@power.bmstu.ru, goryachevalexy@gmail.com, grebenkovserg@gmail.com,
ad-t@mail.ru, goryachev.pavel@yandex.ru, savenkov-t@mail.ru



Противообледенительная защита — важнейший элемент обеспечения безопасности полетов воздушных судов. Проанализированы различные варианты противообледенительных систем (ПОС), исходя из целесообразности их применения для рассматриваемой конфигурации входных элементов авиационного двигателя. Выполнен расчет областей выпадения капель на поверхность лопатки и определены коэффициенты захвата капель. Разработана математическая модель электрической ПОС применительно к данной конфигурации защищаемых элементов и рассчитана потребная мощность обогрева. Предложено использование комбинированной ПОС, включающей постоянный обогрев носка лопатки и циклический обогрев остальной части лопатки. По результатам исследования, ввиду сложности устройства обогрева хвостовой части лопатки, рекомендовано применение гидрофобного покрытия. Данные решения позволяют значительно сократить мощность, отбираемую от двигателя.

Ключевые слова: авиационный двигатель, безопасность полетов, противообледенительная защита, математическая модель, лопатка, обогрев, гидрофобное покрытие.



The ice protection system is a key element ensuring the aircraft safety. Various anti-icing systems are analyzed as applied to specific configurations of aircraft engines. The droplet formation areas on the blade surface are determined, and the coefficients of droplet capture are calculated. A mathematical model of the electrical ice protection system for a given engine configuration is developed, and the required heating power is calculated. It is proposed to apply a combined anti-icing system including the permanent heating of the blade leading edge and the cyclic heating of the rest of the blade. According to the study, a hydrophobic coating is recommended to be used since the device for heating the blade tail is complicated. These solutions can significantly reduce the power taken from the engine.

Keywords: aircraft engine, flight safety, anti-icing, mathematical model, blade, heating, hydrophobic coating.

Обеспечение безопасности полетов — перво-степенная задача при создании новой авиационной техники. Важным аспектом данной проблемы является обеспечение безопасности полетов в условиях обледенения. При выполнении полетов в сложных метеорологических условиях на входных поверхностях авиационных двигателей возможно образование ледяных наростов, что обуславливает ухудшение характеристик двигателя. Откалывание крупных кусков льда и попадание их в двигатель может привести к существенным повреждениям двигателя, вплоть до его выхода из строя.

Для обеспечения безотказной работы двигателя в условиях обледенения применяется противообледенительная защита (ПОЗ) двигателя — комплекс конструктивных, аэродинамических и других мероприятий, включая установку на двигатель противообледенительной системы (ПОС).

Цель работы — выработка предложений по организации ПОЗ авиационного двигателя, имеющего неподвижные входные элементы с развитой площадью поверхности. 3D изображение входных элементов двигателя представлено на рис. 1.

Все входные элементы, неподвижный кок и лопатки входного направляющего аппарата (ВНА) подвержены нарастанию льда. Поверхности этих элементов улавливают значительное количество капель воды, что обуславливает нарастание льда. Без применения ПОЗ двигателя нарастание льда на поверхностях входных элементов может быть столь значительным, что может привести к недопустимым повреждениям элементов двигателя и/или недопустимому ухудшению его характеристик.

Новизна данного исследования состоит в том, что ранее в двигателях не применялся

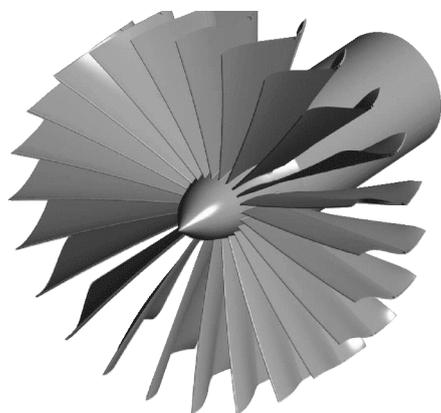


Рис. 1. 3D изображение входных элементов двигателя

ВНА, имеющий такие тонкие лопатки (толщина не более 4 мм) столь сложной формы и развитой поверхности. Трудность также вносит то, что ВНА является неподвижным, следовательно, очищение входных поверхностей ото льда за счет действия центробежных сил невозможно. Таким образом, задача по обеспечению ПОЗ двигателя, имеющего такой необычный ВНА, не решена до настоящего времени.

Для эффективной ПОЗ не требуется обеспечения полного отсутствия льда на поверхности двигателя. Допускается нарастание льда на отдельных частях входных поверхностей, но при этом должна обеспечиваться устойчивая, безотказная работа двигателя. Ухудшение характеристик двигателя не должно превышать допустимые пределы, указанные в ТЗ.

Назначение ПОЗ состоит в том, чтобы уменьшить нежелательное льдообразование на поверхностях двигателя в такой степени, чтобы ухудшение его характеристики происходило в допустимых пределах [1–3].

Для обеспечения ПОЗ может использоваться ПОС. В настоящее время применяются различные типы ПОС [4, 5]:

- воздушно-тепловые;
- электрические с использованием электрообогрева;
- электроимпульсные;
- вибрационные;
- пневматические;
- с использованием памяти формы конструкции и др.

Для работы каждой из перечисленных систем требуется установка на двигатель определенных элементов, что неизбежно ведет к увеличению его веса и ухудшению тяго-экономических характеристик. Кроме того, для функционирования ПОС, как правило, требуют определенную мощность, отбираемую от двигателя, что также снижает его экономичность. Однако для обеспечения эффективной ПОЗ двигателя приходится применять ПОС, несмотря на определенные отрицательные последствия.

В настоящее время в авиационном двигателестроении наметилась тенденция по организации ПОЗ двигателя с использованием различных мероприятий без применения ПОС [6]. При этом для частичного очищения двигателя ото льда используются аэродинамические, аэроупругие и вибрационные явления. К двигателям, в которых используется данное решение, относятся, например, современные двигатели SaM146, CF34-8, CF34-10 и др. Входные элементы конструкции этих двигателей не

имеют обогрева, однако комплекс примененных конструктивных решений позволил обеспечить их эффективную ПОЗ. Данные двигатели прошли экспериментальную проверку на стенде в условиях искусственного обледенения, а также в полете в условиях естественного обледенения. В процессе испытаний было установлено, что характеристики этих двигателей в условиях обледенения находятся в допустимых пределах.

Однако следует отметить, что перечисленные двигатели имеют вращающиеся входные элементы, что способствует сбросу с них образующегося льда. Поскольку входные элементы рассматриваемого двигателя являются неподвижными, на образующиеся ледяные наросты не действуют центробежные силы и сброс льда с них затруднен. Использование аэродинамических, аэроупругих и вибрационных явлений для частичного очищения двигателя ото льда в данном случае представляется неэффективным.

В рамках решения нашей задачи необходимо выбрать тип ПОС, который мог бы быть вписан в существующую конструкцию и обладал бы достаточной эффективностью защиты двигателя от обледенения.

Применение пневматических, вибрационных, электроимпульсных ПОС и ПОС с использованием памяти формы конструкции требует размещения на защищаемой поверхности (или

под ней) элементов значительных размеров, обеспечивающих работу ПОС. Поскольку основная часть защищаемой от обледенения поверхности входных элементов представляет собой тонкие неподвижные лопатки, то размещение элементов ПОС на или под поверхностью лопаток невозможно, следовательно, невозможно и использование указанных вариантов ПОС.

Наиболее распространенным и эффективным методом защиты двигателя от обледенения является применение воздушно-тепловых ПОС. Однако данный способ требует отбора от компрессора некоторого количества горячего воздуха, что отрицательно сказывается на характеристиках двигателя. Также не всегда возможно обеспечить отбор воздуха в достаточном количестве для обеспечения потребного теплового нагрева. Применительно к исследуемой конфигурации входных элементов двигателя возникают существенные трудности в организации каналов обогрева внутри тела тонкой лопатки при обеспечении достаточных прочностных характеристик.

Решение проблемы заключается в поиске путей повышения эффективности воздушно-тепловых ПОС и в разработке новых перспективных технических решений ПОС. Одним из путей решения данной проблемы является применение электротепловых ПОС, нашедших

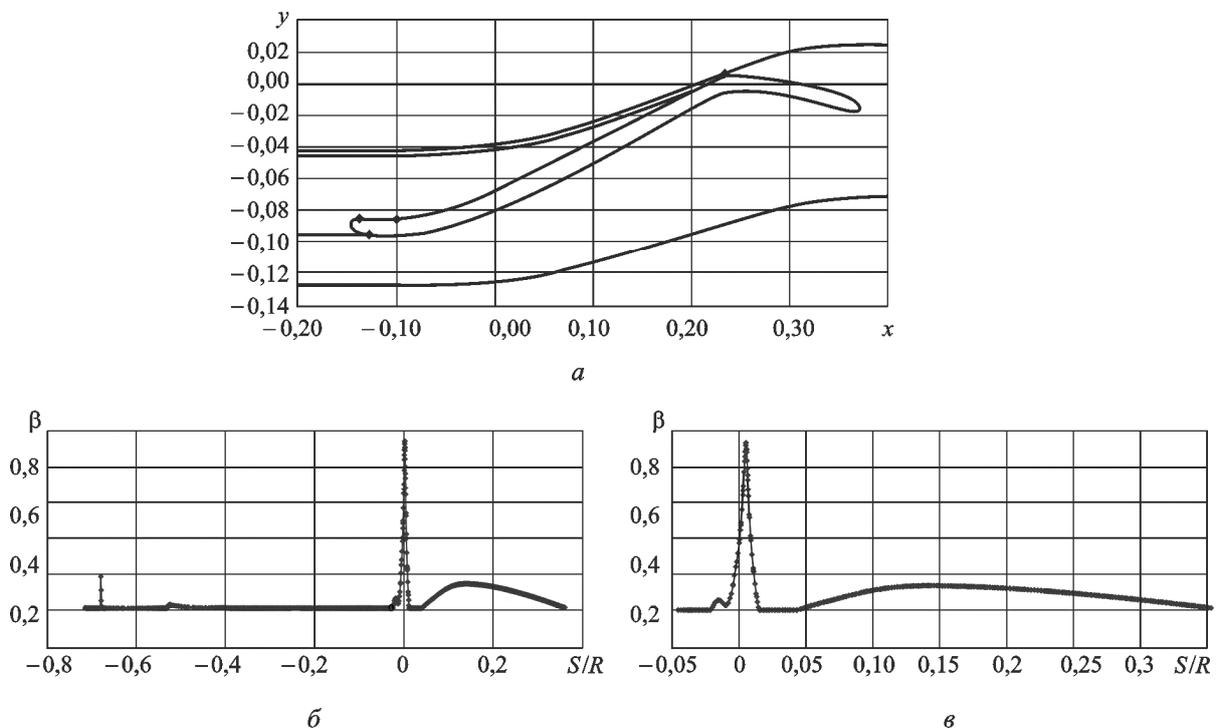


Рис. 2. Выпадение капель на лопатку в сечении 0,64 радиуса от оси двигателя: а — области выпадения; б, в — распределение коэффициента захвата по поверхности лопатки

широкое применение для обеспечения ПОЗ несущих лопастей винтов летательных аппаратов. Это решение полезно использовать при создании ПОС авиационных двигателей.

Для разработки эффективного и экономичного способа обогрева рассматриваемых входных элементов двигателя следует решить ряд задач:

1) определить области выпадения капель воды на поверхности защищаемых от обледенения элементов;

2) рассчитать мощности обогрева, необходимые для эффективного удаления льда (или недопущения его образования);

3) исходя из полученных результатов, выполнить анализ возможных способов обогрева, учитывая величину мощности, которую допустимо отбирать от двигателя;

4) при необходимости выполнить анализ возможности применения комбинированных способов защиты двигателя от обледенения.

На первом этапе исследования был выполнен расчет областей выпадения капель на поверхность лопатки по методике, описанной в работе [7].

Области выпадения капель на лопатку и коэффициенты захвата капель β на одном из режимов работы двигателя в сечении лопатки, расположенном на расстоянии 0,64 радиуса от оси двигателя, представлены на рис. 2. На рисунке видно, что выпадение капель происходит по значительной части поверхности лопатки, особенно в области «крыта».

Расчеты показывают, что выпадение капель происходит по значительной части поверхности лопатки (рис. 2, а).

На основании представленных выше результатов (см. рис. 2) выполнен расчет площади поверхности, на которую происходит выпадение капель воды. Расчеты показывают, что лопатки ВНА имеют развитую поверхность. Значительная часть этой площади (порядка 34 %) орошается выпадающими каплями.

На рисунке 2 видно, что в передней части лопатки коэффициент захвата капель β имеет высокие значения, в этом месте выпадает значительное количество воды. В случае, если ПОС будет обеспечивать плавление формирующегося льда, образующаяся вода будет затекать за зону обогрева и формировать барьерные ледяные отложения. Следовательно, необходимо устройство обогрева не только областей лопатки, подверженных выпадению капель из потока, но и других поверхностей, на которые возможно затекание воды.

На втором этапе исследования была разработана математическая модель электрической ПОС применительно к данной конфигурации защищаемых элементов и выполнен расчет потребной мощности обогрева.

При составлении термодинамического баланса для поверхностей, подвергающихся обледенению, был применен усовершенствованный метод, развивающий идеи, изложенные в работах [8, 9]. В указанных работах рассматривалось нарастание льда на аэродинамических поверхностях в отсутствии работы тепловой ПОС. В предложенной математической модели дополнительно учтены составляющие, касающиеся распределенного теплового потока по поверхности исследуемого объекта. Предполагается, что подводимой тепловой мощности достаточно для полного расплавления льда и образовавшаяся при этом вода потечет по поверхности защищаемого от обледенения элемента в виде жидкой пленки. Жидкая пленка растекается по поверхности тела в двух противоположных направлениях от лобовой точки в соответствии с направлением течения воздуха над поверхностью объекта (рис. 3).

Вся поверхность тела разбивается на контрольные объемы, в которых температура и другие физические параметры полагаются постоянными. Массовый и тепловой контрольные объемы иллюстрирует рис. 4. При составлении теплового баланса принимаются следующие основные допущения: физические превращения происходят мгновенно, пренебрегается тепловой поток в результате излучения, теплопроводность льда считается пренебрежимо малой, поскольку теплопроводность льда относительно мала.

В контрольный объем выпадают капли из потока воздуха массовым расходом \dot{m}_i и втекает вода из предыдущего контрольного объема \dot{m}_{in} ; в следующий контрольный объем вытекает расход воды \dot{m}_{out} , также имеется расход испаряющейся из контрольного объема воды $\dot{m}_{l/s}$.



Рис. 3. Иллюстрация принципа работы ПОС:
 Q_p — потребная мощность

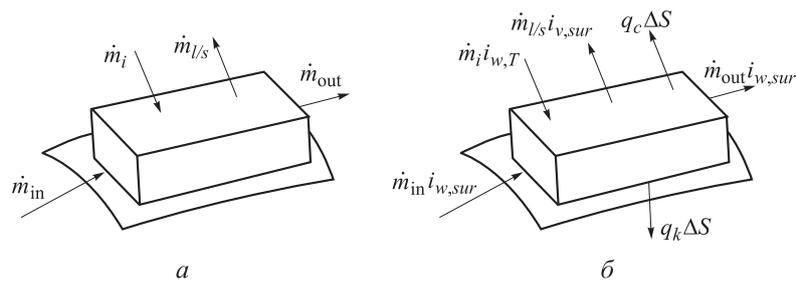


Рис. 4. Контрольный объем:

а — для массового баланса; б — для теплового баланса

Уравнение для баланса масс:

$$\dot{m}_i + \dot{m}_{in} - \dot{m}_{l/s} - \dot{m}_{out} = 0, \quad (1)$$

где \dot{m}_i — массовый расход потока воды, выпадающей на поверхность, $\dot{m}_i = \beta U_\infty LWC \Delta S$, кг/с; β — коэффициент улавливания капель поверхностью тела; U_∞ — скорость в свободном потоке, м/с; LWC (Liquid Water Content) — содержание воды в жидкой фазе в 1 м^3 воздуха, кг/м³; ΔS — площадь элементарной поверхности, м²; \dot{m}_{in} — массовый расход потока воды, стекающей из предыдущего контрольного объема (определяется из баланса, составленного для предыдущего контрольного объема), кг/с; $\dot{m}_{l/s}$ — массовый расход испаряющейся воды, $\dot{m}_{l/s} = \beta^* (\rho_V^{SE} - \rho_V^\infty) \Delta S$, кг/с; β^* — коэффициент диффузии; ρ_V^{SE} и ρ_V^∞ — плотность паров воды над поверхностью испаряющейся жидкости и в свободном потоке, кг/м³; \dot{m}_{out} — массовый расход воды, стекающей в последующий контрольный объем, кг/с.

Уравнение для баланса масс с учетом всех обозначений принимает следующий вид:

$$\beta U_\infty LWC + \frac{\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}}{\Delta S} - \beta^* (\rho_V^{SE} - \rho_V^\infty) = 0. \quad (2)$$

В случае когда вода втекает в контрольный объем из предыдущего контрольного объема, а в следующий контрольный объем не втекает и наоборот, уравнения должны быть соответствующим образом изменены.

Тепловой баланс обеспечивается при условии равенства между источниками притока и оттока тепла. Основными тепловыми источниками являются: конвективный теплообмен, испарение/сублимация, охлаждение или нагрев воды, стекающей с соседней поверхности, охлаждение льда, скрытая теплота фазового перехода воды, кинетическая энергия капель.

Уравнение баланса энергии

$$\begin{aligned} \dot{m}_i i_{w,t} + \dot{m}_{in} i_{w,sur}(i-1) = \\ = \dot{m}_{l/s} i_{v,sur} + \dot{m}_{out} i_{w,sur} + q_c + q_k. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $i_{w,t}$ — энтальпия торможения воды, падающей на тело (здесь и далее предполагается, что энтальпия воды отсчитывается от температуры свободного потока, а капли воды обладают энергией, соответствующей кинетической энергии капель, и энергией, соответствующей теплоте фазового перехода переохлажденной воды при температуре свободного потока), $i_{w,t} = r U_\infty^2 / 2 + L_s^{273}$, Дж/кг; r — коэффициент восстановления; L_s^{273} — теплота замерзания воды, Дж/кг; $i_{w,sur}(i-1)$ — энтальпия воды, втекающей в контрольный объем из предыдущего объема, $i_{w,sur}(i-1) = c_{ps}(273 - T_\infty) + L_s^{273} + c_{pl}(T_s - 273)$, Дж/кг; c_{ps} — теплоемкость льда, Дж/кг·К; T_∞ — температура в потоке, К; c_{pl} — теплоемкость воды, Дж/кг·К; T_s — температура поверхности тела, К; $i_{v,sur}$ — энтальпия воды, покидающей контрольный объем в результате испарения, $i_{v,sur} = c_{ps}(273 - T_\infty) + L_s^{273} + L_{lv}^{273} + c_{pl}(T_s - 273)$, Дж/кг; L_{lv}^{273} — теплота испарения воды, Дж/кг; $i_{w,sur}$ — энтальпия воды, покидающей контрольный объем и втекающей в соседний объем, $i_{w,sur} = c_{ps}(273 - T_\infty) + L_s^{273} + c_{pl}(T_s - 273)$, Дж/кг; q_c — удельный тепловой поток в результате конвекции, $q_c = \alpha(T_s - T_\infty)$, Вт/м²; α — коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К; q_k — тепловой поток в результате теплопроводности на дне контрольного объема, Вт/м².

Уравнение баланса энергии с учетом всех обозначений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \beta U_\infty LWC(0,5rU_\infty^2 + L_s^\infty) + \frac{\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}}{\Delta S} \times \\ \times [c_{ps}(273 - T_\infty) + L_s^{273} + c_{pl}(T_s - 273)] - \\ - \beta^* (\rho_V^{SE} - \rho_V^\infty) [c_{ps}(273 - T_\infty) + L_s^{273} + L_{lv}^{273} + \\ + c_{pl}(T_s - 273)] = \alpha(T_s - T_\infty) - q_k. \end{aligned} \quad (4)$$

Решение соответствующей системы уравнений (2) и (4) в явном виде не представляется возможным, потому что в двух уравнениях присутствуют три неизвестные \dot{m}_{in} , \dot{m}_{out} и q_k . Расчет следует начинать с двух контрольных

объемов, расположенных по разные стороны от лобовой точки. В этом случае расход воды, поступающий из предыдущего контрольного объема в данные два, \dot{m}_{in} равен нулю. Из решения системы уравнений (2) и (4) находятся q_k и \dot{m}_{out} , причем \dot{m}_{out} является входящим потоком для следующего контрольного объема \dot{m}_{in} . Таким образом, последовательно двигаясь от одного контрольного объема к другому, определяется тепловой поток q_k , необходимый для полного расплавления льда в каждом контрольном объеме, и, в конечном счете, общая тепловая мощность проектируемой ПОС.

При выполнении расчетов используются значения коэффициента улавливания капель и коэффициента теплоотдачи на поверхности тела, полученные на первом этапе.

Были проведены расчеты для режима работы ПОС, обеспечивающего полное расплавление льда на поверхности входных элементов. В результате расчетов определялась потребная мощность Q_n местного обогрева, при которой обеспечивается положительная температура поверхности тела ($+5^\circ\text{C}$). Для этого необходимо обеспечить плотность теплового потока на поверхности лопатки до $2,34 \text{ Вт/см}^2$. Распределение плотности теплового потока по поверхности лопатки для обеспечения расплавления льда в сечении лопатки $0,64$ радиуса от оси двигателя представлено на рис. 5. Требуется обеспечить обогрев практически всей поверхности лопатки, поскольку течение воды происходит не только в области выпадения капель, но и по всей поверхности лопатки.

На основании результатов расчетов потребной плотности теплового потока, необходимой

для обогрева различных входных элементов двигателя, определяется суммарная потребная мощность, необходимая для работы ПОС.

Одним из вариантов существенного снижения суммарной мощности обогрева является применение комбинированного обогрева: постоянного и циклического. При этом рекомендуется постоянный обогрев носков лопаток и кока, обеспечив расплавление льда (без полного испарения), а остальные части лопаток нагревать циклически. Предлагается в каждом цикле одновременно нагревать две противоположно расположенные лопатки. В таком случае обогрев всех входных элементов происходит за 12 циклов. При использовании циклического нагрева максимальная суммарная мощность снижается в рассматриваемом примере в 7–7,5 раз.

Механизм работы предлагаемого комбинированного способа обогрева (постоянного и циклической) следующий:

- постоянной обогрев носков лопаток обеспечивает отсутствие льда в указанных областях;
- образовавшаяся жидкая вода течет по поверхности лопатки с образованием барьерного льда в зонах затекания;
- на необогреваемой части лопатки происходит выпадение капель воды и накопление льда;
- циклически на короткое время происходит включение обогрева двух лопаток, подплавление льда и его сброс аэродинамическими силами потока.

Описанный механизм обеспечивает существенную экономию мощности обогрева по сравнению с вариантом постоянного обогрева. Продолжительность циклов может быть определена после выполнения экспериментальных

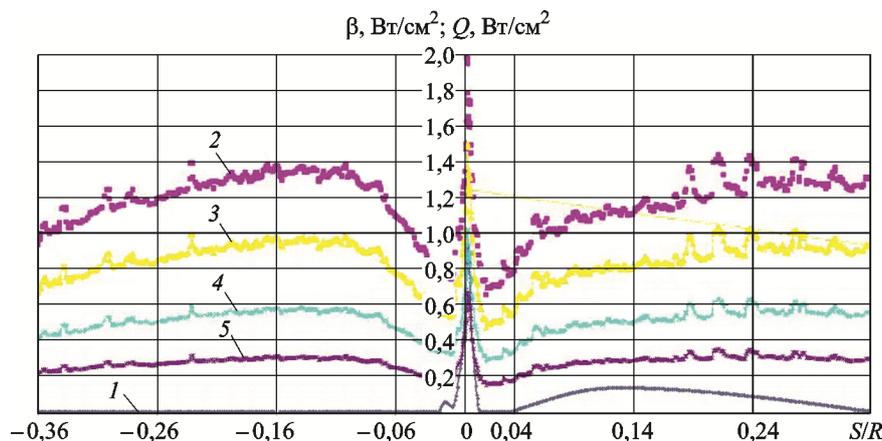


Рис. 5. Распределение потребной плотности теплового потока по поверхности лопатки в сечении $0,64$ радиуса от оси двигателя:
 1 — β ; 2 — Q при $T_s = 5^\circ\text{C}$, $T_G = -30^\circ\text{C}$; 3 — Q при $T_s = 5^\circ\text{C}$, $T_G = -20^\circ\text{C}$; 4 — Q при $T_s = 5^\circ\text{C}$, $T_G = -10^\circ\text{C}$;
 5 — Q при $T_s = 5^\circ\text{C}$, $T_G = -3^\circ\text{C}$

исследований на стенде в условиях искусственного обледенения.

Снижения суммарной мощности обогрева можно достичь за счет отказа от обогрева хвостовой подвижной части лопатки, поскольку это связано (кроме вопроса экономии энергии) с трудностью организации подвода электроэнергии к тонкой хвостовой части лопатки. При этом существует опасность образования барьерного льда на указанной части лопатки с последующим его срывом и повреждением лопаток компрессора. Одним из вариантов решения данной проблемы является применение для хвостовой части лопатки гидрофобного покрытия. Следует отметить, что использование гидрофобного покрытия является обоснованным лишь в случае отсутствия выпадения капель из потока на данную поверхность, поскольку при ударе капли о поверхность происходит ее разбрызгивание и мгновенное замерзание, причем замерзшие капли имеют достаточное сцепление с поверхностью для образования ледяных наростов. В нашем случае на хвостовую часть вода попадает, лишь затекая с основной обогреваемой части лопатки, поэтому применение гидрофобного покрытия для

хвостовой части лопатки является вполне обоснованным решением. Однако конечные выводы об эффективности такого решения можно сделать лишь после проведения эксперимента.

Выводы

1. Для рассматриваемой конфигурации входных элементов двигателя предпочтительно применение электротепловой ПОС.

2. Расчеты областей выпадения капель на поверхность защищаемых от обледенения элементов показали, что каплями орошается значительная часть лопатки.

3. Выполнен расчет потребной тепловой мощности ПОС для недопущения формирования ледяных наростов на поверхности входных элементов.

4. Предложенный комбинированный способ обогрева (постоянный и циклический) позволяет снизить суммарную мощность ПОС в 7–7,5 раз.

5. Обоснована целесообразность применения гидрофобного покрытия для хвостовой части лопатки.

Литература

- [1] Авиационные правила, часть 33 (АП-33). Нормы летной годности двигателей воздушных судов. Межгосударственный авиационный комитет, 2012, 43 с.
- [2] *Federal Aviation Regulation, part 33, Airworthiness Standards: Aircraft Engines*. Federal Aviation Administration publ., 2011. 739 p.
- [3] *Certification Specifications for Engines (CS-E)*. European Aviation Safety Agency, 2011.
- [4] Тенишев Р.Х., ред. *Противообледенительные системы летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1967. 320 с.
- [5] Goraj Z. An overview of the deicing and antiicing technologies with prospects for the future. *24th International Congress of the Aeronautical Sciences*, 2004, pp. 1–11.
- [6] Фролов К.В., ред. *Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-21 Самолеты и вертолеты. Кн. 3: Авиационные двигатели*. Москва, Машиностроение, 2010. 720 с.
- [7] Жердев А.А., Горячев А.В., Жулин В.Г., Горячев П.А. Математическая модель процесса фазовых превращений ледяных кристаллов при их движении внутри каналов испытательного стенда и в проточной части газотурбинного двигателя. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, спец. вып. № 1: Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения*, 2013, с. 65–74.
- [8] Антонов А.Н., Аксенов Н.К., Горячев А.В., Горячева Н.Е. Расчетно-экспериментальное исследование тепломассообмена при обледенении авиационных двигателей. *Тепломассообмен ММФ-2000. Т. 5: Тепломассообмен в двухфазных системах, 4-й минский междунар. форум*. Минск, 2000, с. 278–282.
- [9] Антонов А.Н., Аксенов Н.К., Горячев А.В., Чиванов С.В. *Основы расчета, конструирования и испытаний противообледенительных систем авиационных газотурбинных двигателей*. Москва, ЦИАМ, 2001. 268 с.

References

- [1] *Aviatsionnye pravila, chast' 33. Normy letnoi godnosti dvigatelei vozdushnykh sudov* [Aviation rules, part 33. Norms of airworthiness of aircraft engines]. Mezhsudarstvennyi aviatsionnyi komitet publ., 2012.
- [2] *Federal Aviation Regulation, part 33, Airworthiness Standards: Aircraft Engines*. Federal Aviation Administration publ., 2011. 739 p.
- [3] *Certification Specifications for Engines (CS-E)*. European Aviation Safety Agency, 2011.
- [4] *Protivoobledenitel'nye sistemy letatel'nykh apparatov* [Anti-icing systems of flying devices]. Ed. Tenishev R.Kh. Moscow, Mashinostroenie publ., 1967. 320 p.
- [5] Goraj Z. An overview of the deicing and antiicing technologies with prospects for the future. *24th International Congress of the Aeronautical Sciences*, 2004, pp. 1–11.
- [6] *Mashinostroenie. Entsiklopediia. Tom IV-21 Samolety i vertolety. Kniga 3 Aviatsionnye dvigateli* [Engineering. Encyclopedia. Volume IV-21 Planes and helicopters. Book 3 Aircraft engines]. Ed. Skibin V.A. Moscow, Mashinostroenie publ., 2010. 720 p.
- [7] Zherdev A.A., Goriachev A.V., Zhulin V.G., Goriachev P.A. Matematicheskaia model' protsessa fazovykh prevrashchenii ledianykh kristallov pri ikh dvizhenii vnutri kanalov ispytatel'nogo stenda i v protochnoi chasti gazoturbinnogo dvigatel'ia [Mathematical model of phase transitions of ice crystals during their movement within the channels of the test bench and in the flow of the gas turbine engine]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering]. Special issue no. 1 «Refrigeration and cryogenic engineering, systems of conditioning and life support», 2013, pp. 65–74.
- [8] Antonov A.N., Aksenov N.K., Goriachev A.V., Goriacheva N.E. Raschetno-eksperimental'noe issledovanie teplomassoobmena pri obledenении aviatsionnykh dvigatelei [Calculation and experimental investigation of heat and mass transfer with icing of aircraft engines] *Teplomassoobmen MMF-2000, m. 5, Teplomassoobmen v dvukhfaznykh sistemakh, Chetvertyi minskii mezhdunarodnyi forum* [Heat and mass transfer MMF-2000, vol. 5, Heat and mass transfer in two-phase systems, Fourth Minsk international forum]. Minsk, 2000, pp. 278–282.
- [9] Antonov A.N., Aksenov N.K., Goriachev A.V., Chivanov S.V. *Osnovy rascheta, konstruirovaniia i ispytanii protivooledenitel'nykh sistem aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei* [The basis for calculation, design and testing of anti-icing systems of aircraft gas turbine engines]. Moscow, CIAM publ., 2001. 268 p.

Статья поступила в редакцию 18.09.2014

Информация об авторах

ЖЕРДЕВ Анатолий Анатольевич (Москва) — доктор технических наук, профессор, заведующий сектором и заведующий отделом 3.1 НИИ ЭМ. МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: zherdev@power.bmstu.ru).

ГОРЯЧЕВ Алексей Владимирович (Москва) — кандидат технических наук, начальник отдела 303. ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2, e-mail: goryachevalexey@gmail.com).

ГРЕБЕНЬКОВ Сергей Александрович (Москва) — инженер 2 категории отделения 300. ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2, e-mail: grebenkovserg@gmail.com).

Information about the authors

ZHERDEV Anatoliy Anatol'evich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department 3.1. Research Institute of Power Engineering. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: zherdev@power.bmstu.ru).

GORYACHEV Aleksey Vladimirovich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Head of Department 303. Central Institute of Aviation Motors n.a. P.I. Baranov (CIAM, Aviamotornaya str., 2, 111116, Moscow, Russian Federation, e-mail: goryachevalexey@gmail.com).

GREBEN'KOV Sergey Aleksandrovich (Moscow) — Engineer of Department 300. Central Institute of Aviation Motors n.a. P.I. Baranov (CIAM, Aviamotornaya str., 2, 111116, Moscow, Russian Federation, e-mail: grebenkovserg@gmail.com).

ЖУЛИН Вадим Геннадьевич (Москва) — научный сотрудник отделения 300. ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2, e-mail: ad-t@mail.ru).

ГОРЯЧЕВ Павел Алексеевич (Москва) — инженер 2 категории отделения 300. ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2, e-mail: goryachev.pavel@yandex.ru).

САВЕНКОВ Владимир Валерьевич (Москва) — младший научный сотрудник. ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2, e-mail: savenkov-t@mail.ru).

ZHULIN Vadim Gennad'evich (Moscow) — Researcher of Department 300. Central Institute of Aviation Motors n.a. P.I. Baranov (CIAM, Aviamotornaya str., 2, 111116, Moscow, Russian Federation, e-mail: ad-t@mail.ru).

GORYACHEV Pavel Alekseevich (Moscow) — Engineer of Department 300. Central Institute of Aviation Motors n.a. P.I. Baranov (CIAM, Aviamotornaya str., 2, 111116, Moscow, Russian Federation, e-mail: goryachev.pavel@yandex.ru).

SAVENKOV Vladimir Valer'evich (Moscow) — Junior Researcher of Department 300. Central Institute of Aviation Motors n.a. P.I. Baranov (CIAM, Aviamotornaya str., 2, 111116, Moscow, Russian Federation, e-mail: savenkov-t@mail.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла в свет монография
С.В. Грубого

**«Оптимизация процесса
механической обработки и управление
режимными параметрами»**

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса резания и изнашивания инструментов. Проведено математическое моделирование процесса и дана методика многофакторной аппроксимации полиномиальными уравнениями экспериментальных зависимостей резания металлов. Выполнен анализ методов и рассмотрены типовые задачи оптимизации режимных параметров. Разработаны математические основы оптимизации и управления режимными параметрами механической обработки с использованием уравнений скорости изнашивания инструментов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru