

Оценка ухудшения характеристик ГТД при кристаллическом обледенении и возможностей его компенсации методами управления

Гуревич О.С., Сметанин С.А., Трифонов М.Е.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

e-mail: sasmetanin@ciam.ru

Рассмотрено влияние кристаллического обледенения на характеристики узлов двигателя. Выполнена адаптация этих характеристик для применения в термогазодинамической математической модели ТРДД магистрального самолета. Сформированы и введены в математическую модель САУ ТРДД алгоритмы для разных способов управления рабочим процессом в двигателе: по частоте вращения роторов, степени повышения давления в двигателе, величине тяги, рассчитываемой в бортовой математической модели двигателя. По результатам математического моделирования получены оценки изменения характеристик двигателя при использовании этих алгоритмов. Показана возможность компенсации снижения тяги при ухудшении характеристик узлов и уменьшения степени обледенения путем выбора способа управления двигателем. На основе результатов моделирования объяснено влияние способов управления на протекание процесса обледенения.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, тяга, управление, обледенение, кристаллы льда.

GTE performance deterioration due to ice crystal icing and compensation of this effect by control methods

Gurevich O.S., Smetanin S.A., Trifonov M.E.

CIAM, Moscow

This paper presents the analysis of the ice crystal icing effect on engine components performance characteristics. These characteristics are adapted for use in the thermogasdynamic mathematical model of a commercial turbofan. Algorithms for various engine control methods are developed and introduced into the turbofan mathematical model. Following controllers are considered: rotors rotational speed, engine pressure ratio and thrust calculated in the on-board engine model. Mathematical modeling has been performed to evaluate engine performance using these algorithms. The possibility of compensating for a thrust rollback, due to engine components performance degradation with icing, and reducing ice accretion by the choice of the engine control method is shown. Based on the simulation results, the influence of control methods on the engine behavior with icing is explained.

Keywords: gas turbine engine, thrust, control, icing, ice crystals.

Введение

Известно, что обледенение двигателя приводит к изменению характеристик его узлов, параметров рабочего процесса и, как правило, к снижению тяги. В основном это связано с изменением геометрии проточной части и размеров проходных сечений по тракту двигателя.

В настоящей работе проведен анализ влияния обледенения, вызванного наличием в атмосфере кристаллов льда, на основные характеристики авиационного

двигателя при разных способах управления его рабочим процессом и возможности оптимизации управления, направленные на ослабление этого фактора. Исследование выполнено на примере современного ТРДД магистрального самолета со степенью двухконтурности порядка 9. В качестве параметров регулирования рассмотрены частоты вращения роторов, степень повышения давления в двигателе и величина тяги, определяемая расчетом в бортовой математической модели двигателя, содержащейся в его системе

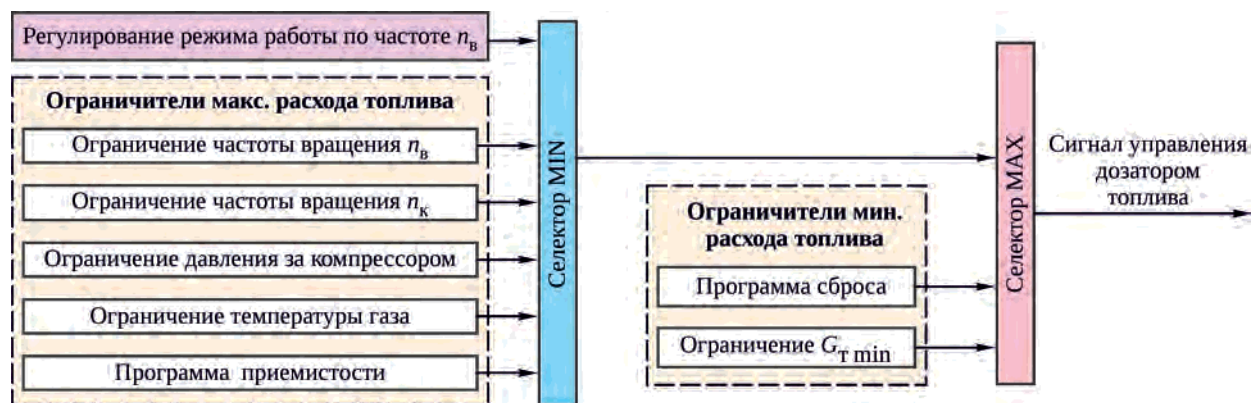


Рис. 1. Структурная схема регулятора расхода топлива в ТРДД

автоматического управления (САУ). Пример построения канала управления расходом топлива в САУ ТРДД на режимах выше малого газа, в которой в качестве основного закона управления на установившихся режимах применено регулирование частоты вращения вентилятора n_v , показан на рис. 1.

Влияние обледенения на характеристики узлов двигателя

В большинстве работ, посвященных кристаллическому обледенению, изучается сам процесс льдообразования. В ряде работ [1 – 4] содержатся данные о влиянии обледенения на характеристики узлов и двигателя в целом, однако нигде не рассматривается их связь со способом управления двигателем. Исследованию этого вопроса посвящена настоящая работа. Отметим, что влияние параметра регулирования на характеристики двигателя при обычном («классическом») обледенении рассматривалось в работе [5].

Воздействие обледенения проявляется в образовании наледи на входных элементах двигателя, последующем ее отрыве и повреждении вылетевшей массой льда деталей, находящихся дальше по тракту двигателя. Нарастание льда на элементах узлов, сопровождающееся ухудшением их характеристик, приводит к росту температуры газа T_r^* , при котором становится возможным вступление в работу ограничителя этого параметра в САУ и снижение тяги.

Далее рассматривается влияние нарастания льда на характеристики двигателя без учета эффектов, связанных с повреждением деталей двигателя при отрыве и попадании в проточную часть кусков льда.

По механизму воздействия на двигатель выделяют несколько типов обледенения в зависимости от формы ледяного нароста и его локализации. Ряд из них не представляет опасности в эксплуатации ввиду наличия на двигателях специальных противообледенительных систем, предусмотренных в соответствии с требованиями авиационных правил. Нарастание кристалли-

ческого льда, исследование которого началось сравнительно недавно, относится к типу опасного обледенения, и потому представляет наибольший интерес.

В отличие от «классического» обледенения, условия для формирования кристаллов льда возникают на высотах до 12 000 м при температуре на 10...20 градусов выше МСА. Лед в этих условиях образуется на относительно низких, но все же более высоких режимах работы двигателя, чем при «классическом» обледенении (вплоть до крейсерского).

Помимо ухудшения характеристик узлов и снижения основных параметров рабочего процесса, такое обледенение может приводить также к потере управляемости и выключению двигателя в полете вследствие помпажа и погасания камеры сгорания [6]. В то же время на этих режимах температура газа существенно ниже максимально допустимой, и, следовательно, имеется запас по температуре, который может быть использован для компенсации ухудшения характеристик двигателя.

Кристаллы льда, в отличие от характерных для обледенения «классического» типа переохлажденных капель воды, отскакивают от холодных поверхностей двигателя (лопаток вентилятора и подпорных ступеней) и формируют наледь на его неподвижных элементах, расположенных более глубоко по тракту и имеющих более высокую температуру [7] (рис. 2).



Рис. 2. Зоны локализации наледи, характерные для различных типов обледенения:

■ – «классическое»; ■ – кристаллическое

Такой характер льдообразования делает неэффективными противообледенительные системы, принцип работы которых основан на нагреве входных элементов двигателя (кока, лопаток вентилятора, направляющих аппаратов первой ступени бустера) [6]. Более того, по некоторым данным, работа противообледенительной системы и вовсе способствует формированию наледи в условиях воздействия кристаллического льда [3, 4].

Глубина формирования зоны кристаллического обледенения по тракту двигателя зависит от температуры атмосферного воздуха и режима работы двигателя. Так, на высотах 10 000...12 000 м при работе двигателя на режимах, близких к крейсерскому, обледенение возникает на входных направляющих аппаратах подпорных ступеней, а при уменьшении режима работы двигателя до полетного малого газа и, соответственно, снижения температуры по тракту наледь образовывается на последних ступенях бустера [1]. Такой механизм воздействия определяет способы борьбы с кристаллическим обледенением: раскрутка роторов двигателя посредством повышения режима его работы или снижение летательного аппарата на высоту с более высокой температурой воздуха приводит к смещению зоны обледенения ближе ко входу, вплоть до полной ее ликвидации [4, 6]. При этом даже незначительное повышение частоты вращения ротора низкого давления, приводящее к росту температуры воздуха во входном тракте двигателя, способствует существенному повышению температуры поверхности направляющих аппаратов, определяющей склонность к образованию на них льда [4].

На рис. 3 представлены результаты стендовых испытаний двигателя Lycoming ALF502R-5, в которых

исследовалось влияние частоты вращения вентилятора n_v на параметры двигателя в условиях кристаллического обледенения. Было показано, что увеличение частоты вращения n_v на 5% и более позволяет сохранить исходную величину тяги, что свидетельствует об устранении условий, необходимых для формирования наледи на элементах проточной части двигателя.

Следовательно, использование управления двигателем, при котором поддерживается или же автоматически увеличивается частота вращения ротора низкого давления для сохранения исходной величины тяги при ухудшении характеристик узлов вследствие обледенения, позволит одновременно компенсировать влияние обледенения и устранить условия для его возникновения.

Отметим, что известные случаи значительного неконтролируемого снижения тяги в эксплуатации [3, 6] происходили на ТРДД с умеренной степенью двухконтурности, управление которыми осуществлялось по частоте вращения ротора высокого давления n_k . При таком управлении снижение тяги в условиях крейсерского полета во многом определяется не только ухудшением характеристик двигателя вследствие обледенения, но и снижением частоты вращения вентилятора.

Наиболее детальный анализ изменения характеристик узлов двигателя при нарастании кристаллов льда представлен в работах [1, 2, 9], в которых исследован ТРДД в том же классе тяги, что и в настоящей работе, со схожими размерами и параметрами рабочего процесса.

Для оценки влияния обледенения был разработан математический аппарат, состоящий из термогазодинамической модели двигателя, поэлементной модели компрессора низкого давления (КНД) и математической

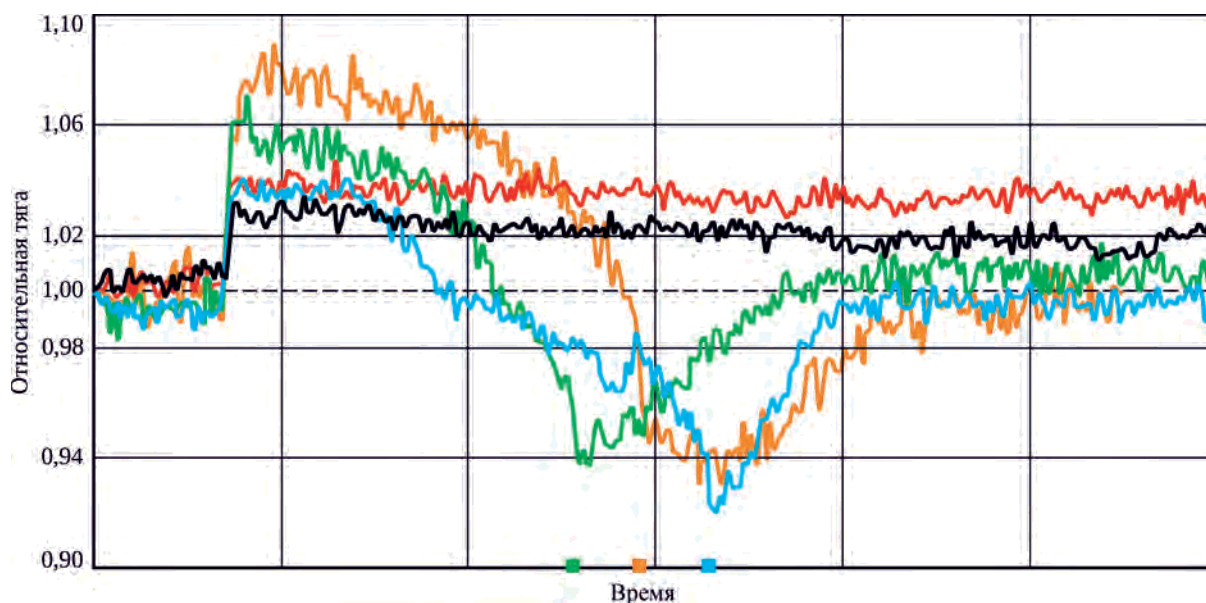


Рис. 3. Влияние частоты вращения вентилятора n_v на тягу двигателя в условиях кристаллического обледенения [4]:
— $0,9n_v$; — $0,95n_v$; — n_v ; — $1,05n_v$; — $1,1n_v$

модели процесса образования льда. Посредством моделирования работы двигателя, подверженного воздействию кристаллов льда, были определены характеристики КНД в зависимости от уровня его обледенения. Под характеристикой КНД здесь и далее понимается суммарная характеристика подпорных ступеней и части вентилятора, осуществляющей предварительное сжатие воздуха для внутреннего контура. Уровень обледенения определяется долей площади, занимаемой наледью по внутреннему контуру двигателя.

При увеличении обледенения КНД значительно снижаются запасы газодинамической устойчивости, допустимая величина степени повышения давления и расход воздуха, сильнее при высоких частотах вращения [1]. При достижении площади, занимаемой наледью, 30% площади проходного сечения внутреннего тракта происходит резкое падение величин всех основных параметров КНД (КПД – до 4%, степени повышения давления и расхода воздуха – до 20%) [2, 10], при котором возможно вступление в работу в САУ ограничителей параметров двигателя.

Основные результаты

Для исследования влияния кристаллического обледенения на характеристики двигателя при различных способах управления в математическую модель двигателя с САУ [8] введены характеристики КНД, соответствующие различным уровням обледенения, при которых режим работы двигателя поддерживается основным регулятором.

Для этого выполнена коррекция характеристик КНД рассматриваемого двигателя, воспроизводящая вносимые обледенением изменения, путем адаптации характеристик работ [2, 10]. Полученные в результате соответствующих преобразований характеристики представлены на рис. 4.

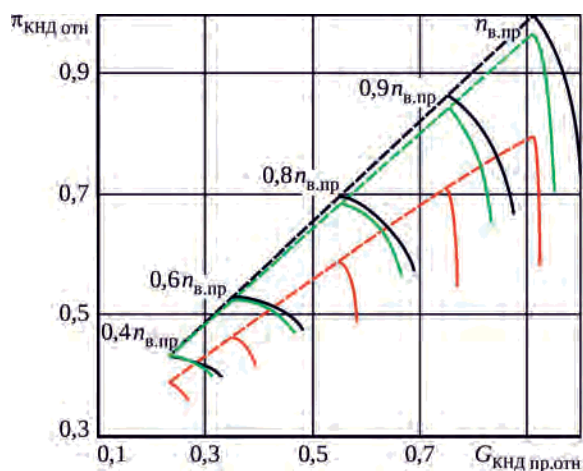


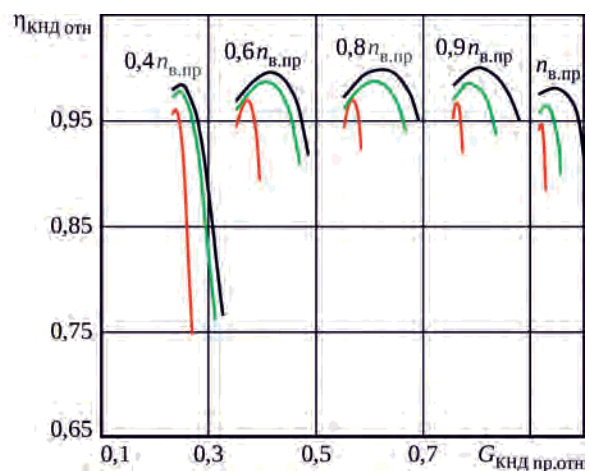
Рис. 4. Адаптация характеристик КНД рассматриваемого двигателя при различных уровнях обледенения:
— 0%; — 20%; — 30%

Для оценки влияния разных способов управления проведен синтез контуров регулирования частоты вращения каскадов низкого n_v и высокого n_k давлений, степени повышения давления в двигателе $\pi_{дв}^* = P_t^* / P_{вх}^*$. Регулятор величины тяги $R_{расч}$, рассчитываемой в бортовой математической модели двигателя, выполнен в соответствии с материалами другой работы авторов [8, 11].

Используемая динамическая поузловая математическая модель двигателя [12] позволяет осуществлять расчет параметров двигателя с погрешностью 1...3% на установившихся режимах и 3...5% на переходных режимах при вычислениях в режиме реального времени.

Выбор условий полета и режима работы двигателя для проведения расчетов по исследованию явления неконтролируемого падения тяги вследствие обледенения основан на данных о частоте возникновения таких случаев в эксплуатации [6] и представленном выше изменении характеристик КНД, при котором параметры компрессора меняются тем сильнее, чем выше частота его вращения (см. рис. 4).

Результаты моделирования работы двигателя на крейсерском режиме в условиях $H = 11\,000$ м, $M = 0,8$ при воздействии кристаллов льда с уровнем обледенения, составляющим 30% площади проходного сечения внутреннего контура, представлены на рис. 5 для различных способов управления двигателем. Для каждого отложенного вдоль оси абсцисс параметра двигателя (расход топлива G_t , частоты вращения роторов n_v и n_k , температура воздуха на выходе из подпорных ступеней $T_{пс}^*$, температура газа в камере сгорания T_g^* , степень повышения давления в двигателе $\pi_{дв}^*$, тяга R) приведено полученное в расчетах отклонение от номинального значения (при отсутствии обледенения) в зависимости от используемого параметра регулирования.



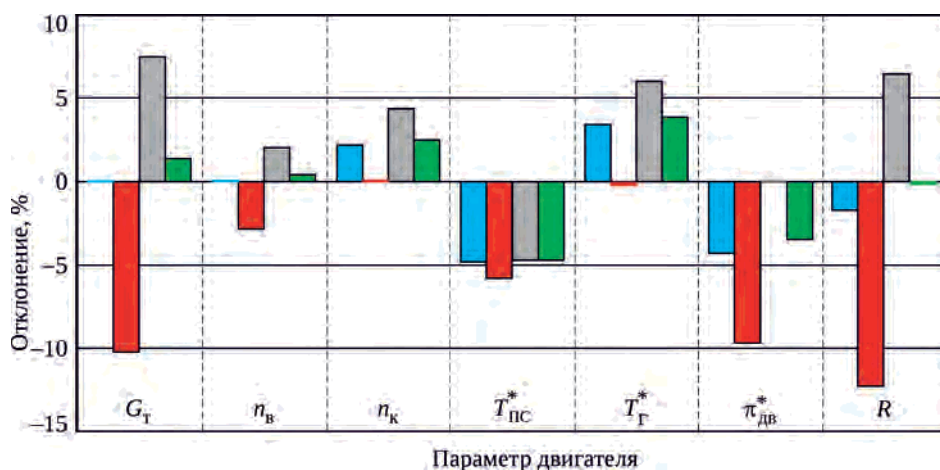


Рис. 5. Изменение параметров двигателя при обледенении КНД в зависимости от выбора параметра регулирования:

■ $-n_B$; ■ $-n_K$; ■ $-\pi_{ДВ}^*$; ■ $-R_{расч}$

Наибольшее падение тяги (более 12%) происходит при поддержании постоянной частоты вращения ротора высокого давления n_K , сопровождающемся значительным падением частоты вращения вентилятора n_B . Это связано с тем, что при снижении расхода воздуха через внутренний контур снижается потребная работа на КВД, в результате чего для поддержания заданной частоты вращения n_K требуется меньше топлива. Соответствующее этому уменьшению расхода топлива приводит к падению располагаемой мощности N как на ТВД, так и на ТНД, в то время как потребная мощность на КНД при неизменных характеристиках внешнего контура остается практически постоянной. Нарушение баланса мощностей каскада низкого давле-

ния приводит к падению частоты вращения вентилятора и соответствующему падению тяги, определяемой для рассматриваемого типа двигателя, в первую очередь, расходом воздуха через внешний контур. При этом снижение расхода топлива совместно со снижением расхода воздуха через внутренний контур обуславливает сохранение величины температуры газа $T_Г^*$ на исходном уровне.

Для объяснения изменения параметров двигателя на рис. 6 представлен гипотетический переходный процесс, вызванный ступенчатым переходом в математической модели (в момент времени $t = 1$ с) от характеристик КНД до обледенения к характеристикам при обледенении 30% (со снижением в рабочей точке

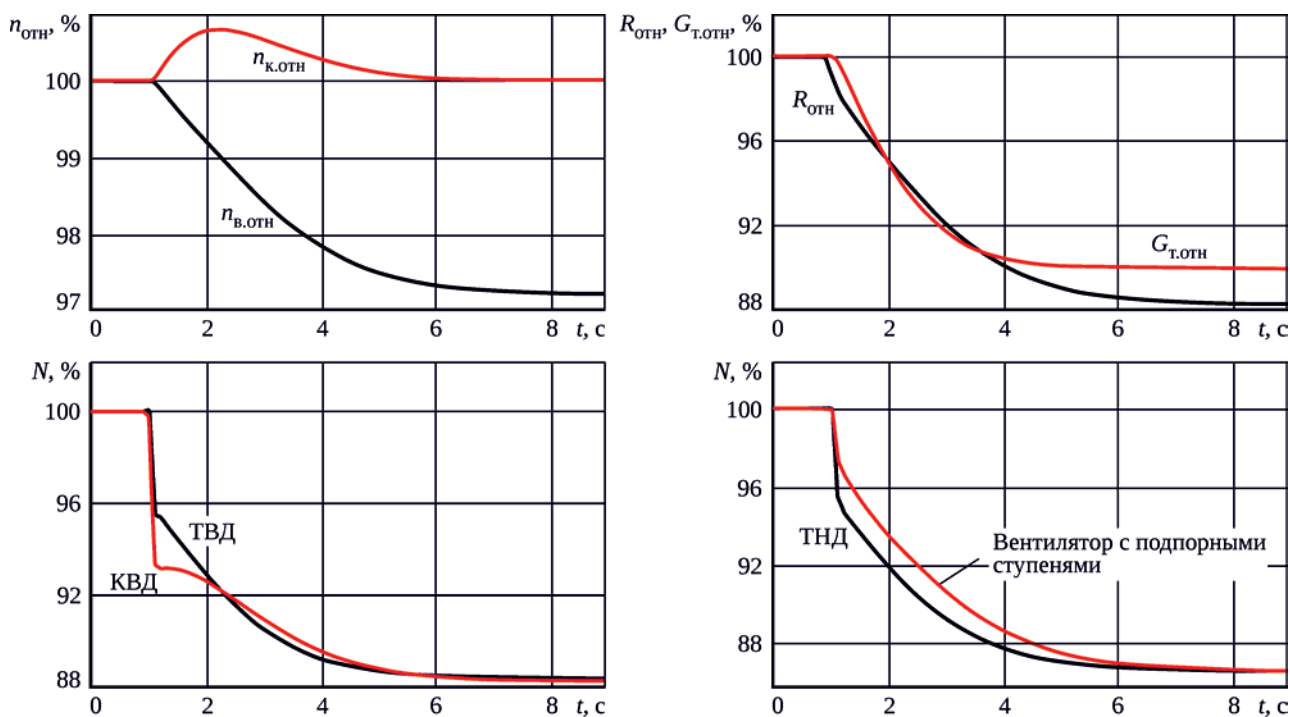


Рис. 6. Изменение параметров двигателя из-за обледенения при управлении по частоте вращения n_K

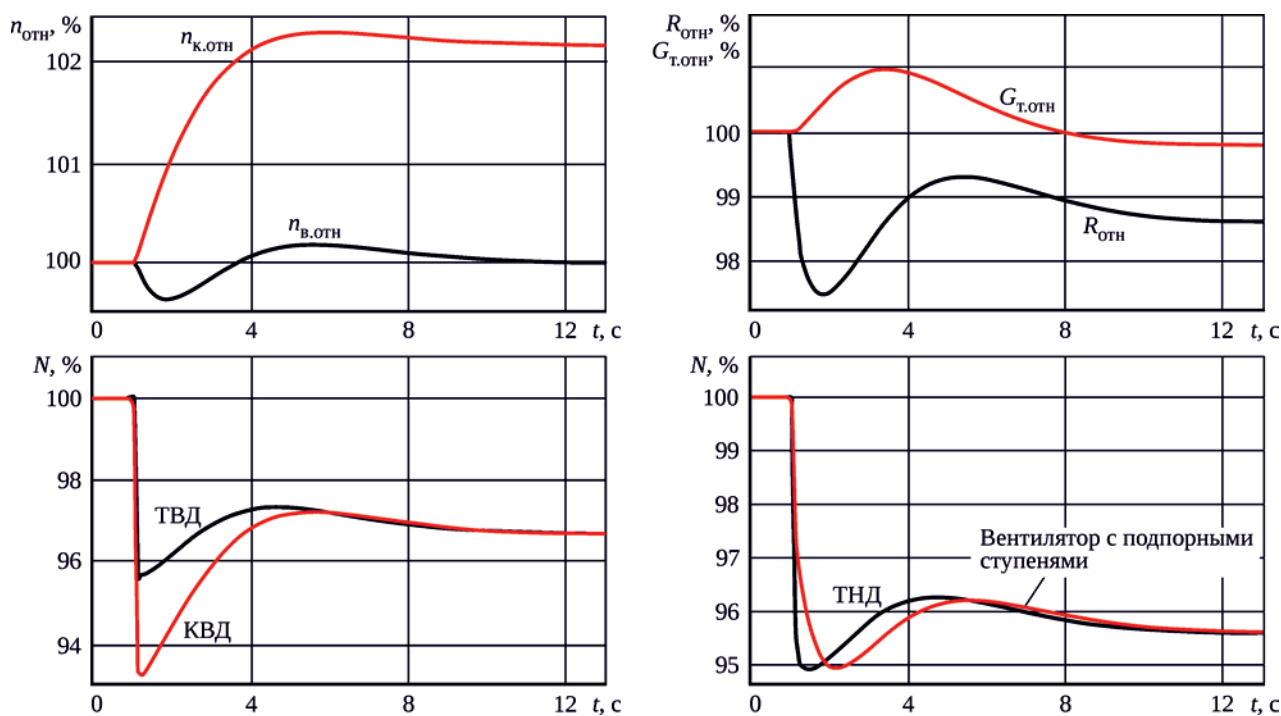


Рис. 7. Изменение параметров двигателя из-за обледенения при управлении по частоте вращения n_b

на линии установившихся режимов КПД на 3% и приведенного расхода воздуха на 12%). Мгновенное (скачком) изменение характеристик КНД позволяет в ускоренном режиме представить тренд параметров двигателя при обледенении. Отметим, что динамика изменения параметров в этих процессах не соответствует реальному переходному процессу, так как нарастание наледи происходит существенно медленнее, и для двигателя, как объекта с существенно меньшей инерционностью, процесс изменения характеристик будет квазистационарным. Подобное резкое изменение характеристик КНД за время, сопоставимое с динамическими свойствами двигателя, может происходить только при увеличении уровня обледенения в интервале 30...35% [10]. На графиках рис. 6 показано изменение параметров двигателя относительно их номинальных значений, соответствующих работе двигателя без воздействия обледенения.

На рис. 7 представлен аналогичный процесс изменения параметров двигателя при работе регулятора частоты вращения вентилятора. Возникающее при обледенении снижение частоты вращения вентилятора n_b вследствие уменьшения располагаемой мощности ТНД (из-за уменьшения расхода воздуха, протекающего через внутренний контур) приводит к формированию САУ команды на повышение расхода топлива, что позволяет сохранить близкое к исходному значение тяги при поддержании величины n_b . При этом наблюдается рост частоты вращения каскада высокого давления на 2%.

Из представленных на рис. 5 – рис. 7 результатов видно, что при управлении двигателем по рассчитываемой величине тяги или по частоте вращения вентилятора тяга двигателя при обледенении остается практически неизменной, а при управлении по параметру $\pi_{дв}^*$ даже несколько увеличивается. При этом на 3...6% (50...100 K) возрастает температура газа в камере сгорания.

Таким образом, наблюдаемое падение тяги ТРДД при обледенении определяется не столько воздействием обледенения на характеристики узлов двигателя, сколько реакцией системы управления на это воздействие. Поэтому результаты испытаний двигателей, регулируемых по параметру n_k (к ним относится и ТРДД Lycoming ALF502R-5, установленный на стенде Исследовательского центра Гленна и являющийся базовым для проведения исследований по влиянию кристаллов льда), не характерны для современных двигателей с большой степенью двухконтурности, управляемых, как правило, по параметру n_b .

Отметим также, что при регулировании частоты вращения ротора высокого давления происходящее изменение параметров двигателя, в первую очередь, уменьшение частоты вращения каскада низкого давления, определяющей температуру во входной части тракта двигателя, будет способствовать нарастанию льда.

Применение программ управления по параметрам n_b , $R_{расч}$, $\pi_{дв}^*$ позволяет не допустить значительного снижения температуры потока во входном тракте двигателя, сохранить исходную величину частоты враще-

ния вентилятора (а при управлении по $\pi_{\text{дв}}^*$ даже несколько повысить ее) и, тем самым, не только скомпенсировать падение тяги, но и, согласно [4], способствовать устранению условий для возникновения кристаллического обледенения.

Заключение

Проведенное исследование позволило определить возможности и способы компенсации воздействия кристаллического обледенения на характеристики двигателя путем оптимизации управления. Автоматическое увеличение частоты вращения ротора низкого давления для поддержания исходной величины тяги при ухудшении характеристик узлов вследствие обледенения приводит к повышению температуры воздуха во входном тракте двигателя и, таким образом, одновременно компенсирует негативное влияние обледенения на тягу и устраняет условия для его возникновения.

Математическое моделирование показало, что уменьшение тяги ТРДД вследствие обледенения при

управлении частотой вращения ротора высокого давления определяется, в основном, происходящим в этом случае снижением частоты вращения вентилятора. При регулировании параметров n_v , $\pi_{\text{дв}}^*$ или $R_{\text{расч}}$ поддерживается близкое к исходному значение тяги при увеличении температуры газа в камере сгорания.

Лучшим способом управления для устранения условий формирования льда является регулирование параметра $\pi_{\text{дв}}^*$, при котором наблюдается наименьшее снижение температуры воздуха в проточной части двигателя, но возникает погрешность в поддержании тяги (повышение тяги относительно исходной величины). Управление по параметрам n_v и $R_{\text{расч}}$ позволяет наиболее точно поддерживать тягу и снизить (относительно управления по частоте вращения n_k) падение температуры за подпорными ступенями вентилятора, определяющей склонность к формированию наледи.

Адаптация управления двигателем к условиям полета позволит изменять в его САУ способ управления, например, при появлении обледенения с целью ослабления его воздействия.

Литература / References

1. May R.D., Guo T.-H., Veres J.P., Jorgenson P.C.E. Engine Icing Modeling and Simulation (Part 2): Performance Simulation of Engine Rollback Phenomena // NASA Technical Memorandum. 2011. NASA/TM-2011-217200.
2. Veres J.P., Jorgenson P.C.E., Wright W.B. Modeling the Effects of Ice Accretion on the Low Pressure Compressor and the Overall Turbofan Engine System Performance // NASA Technical Memorandum. 2013. NASA/TM-2013-217034.
3. Oliver M.J. Validation Ice Crystal Icing Engine Test in the Propulsion Systems Laboratory at NASA Glenn Research Center // Proc. of 6th AIAA Atmospheric and Space Envir. Conf. 2014. AIAA 2014-2898. DOI:10.2514/6.2014-2898
4. Flegel A.B., Oliver M.J. Preliminary Results from a Heavily Instrumented Engine Ice Crystal Icing Test in a Ground Based Altitude Test Facility // NASA Technical Memorandum. 2016. NASA/TM-2016-219132.
5. Гельмедов Ф.Ш., Горячев А.В., Горячева Н.Е., Ланшин А.И., Павлюков Е.В., Петров С.Б., Харламов А.В., Чиванов С.В. Методические вопросы проведения испытаний авиационных двигателей в условиях обледенения и оценка изменения характеристик ТРДД // Авиационно-космическая техника и технология. 2008. № 7(54). Харьков: ХАИ. С. 133–138.
Gel'medov F.Sh., Goriachev A.V., Goriacheva N.E., Lanshin A.I., Pavliukov E.V., Petrov S.B., Kharlamov A.V., Chivanov S.V. Metodicheskie voprosy provedeniia ispytaniia aviatsionnykh dvigatelei v usloviakh obledeneniia i otsenka izmeneniia kharakteristik TRDD [Methodical Problems of Test Procedures of Icing Aviation Engines and Estimation of Performance Variation of Turbofan Engines]. Aviatcionno-kosmicheskaia tekhnika i tekhnologija. 2008. No. 7(54). Kharkov: KHAИ. P. 133–138.
6. Mason J.G., Strapp J.W., Chow P. The Ice Particle Threat to Engines in Flight // Proc. of 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2006. AIAA 2006-206. DOI:10.2514/6.2006-206
7. Mason J.G., Chow P., Fuleki D.M. Understanding Ice Crystal Accretion and Shedding Phenomenon in Jet Engines Using a Rig Test // J. Eng. Gas Turbines Power. 2010. No. 133(4). DOI:10.1115/1.4002020
8. Gurevich O.S., Golberg F.D., Smetanin S.A., Romanenko N.E. Application of “Virtual” Controllers for Integrated Propulsion and Aircraft Control // Proc. of 31st Congress ICAS. 2018. ICAS2018_0640.
9. Jorgenson P.C.E., Veres J.P., Wright W.B., May R.D. Engine Icing Modeling and Simulation (Part I): Ice Crystal Accretion on Compression System Components and Modeling its Effects on Engine Performance // SAE Technical Paper. 2011. DOI:10.4271/2011-38-0025
10. Veres J., Jorgenson P., Jones S. Modeling the Deterioration of Engine and Low Pressure Compressor Performance During a Roll Back Event Due to Ice Accretion // NASA Tech. Memorandum. 2014. NASA/TM-2014-218495.

-
11. Гуревич О.С., Гольберг Ф.Д., Сметанин С.А., Трифонов М.Е. Оптимизация управления газотурбинным двигателем в процессе выработки его ресурса // Вестник Самарского университета. 2018. Т. 17. № 4. С. 47 – 56.
Gurevich O.S., Gol'berg F.D., Smetanin S.A., Trifonov M.E. Optimizatsiia upravleniia gazoturbinnym dvigatelem v protsesse vyrabotki ego resursa [Gas Turbine Engine Control Optimization During Engine Wear in Operation]. Vestnik Samarskogo universiteta. 2018. Vol. 17. No. 4. P. 47 – 56.
 12. Golberg F.D., Gurevich O.S., Petukhov A.A. Improving Control Reliability and Quality of Aircraft Engines by Means the Software “Virtual Engine” // Proc. of 29th Congress ICAS. 2014. ICAS2014_0198.

Материалы получены редакцией 12.08.2019