

УДК 621.431.75

К ВОПРОСУ ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ОБЛЕДЕНЕНИЯ

© 2014 С.Ю. Данилкин, В.А. Телешев

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

Применительно к авиационной технике особое внимание уделяется проблемам динамической прочности агрегатов и узлов авиадвигателей, а именно сопротивлению материала под действием различных колебательных процессов (вибраций), возникающих при эксплуатации таких двигателей. Важным аспектом данной проблемы является обеспечение безопасности полётов в атмосферных условиях обледенения. Актуальность исследования определяется, прежде всего, недостаточной изученностью процессов обледенения. В статье представлены обобщённые результаты обработки экспериментальных данных, полученных при испытании газотурбинных двигателей (ГТД) в условиях обледенения на специализированном наземном стенде. Рассмотрены этапы процесса обледенения в отношении вибрационного состояния двигателя. В ходе экспериментов по обледенению были обнаружены в спектре вибраций диагностические признаки автоколебаний лопаток. Одной из вероятных причин таких опасных процессов может быть дросселирование вентилятора из-за нарастания льда на лопатках спрямляющего аппарата или на входных деталях вентилятора. Однако, для более детального описания данных явлений, возникающих в условиях обледенения, требуются дополнительные исследования, эксперименты, расчёты. Описаны особенности исследования вибрационных процессов в двигателе при таких испытаниях, обсуждены направления дальнейших исследований данной проблемы.

Обледенение, вибрации, испытания ГТД, диагностика колебаний, спектральный анализ.

Обеспечение безопасности полётов является основной проблемой разработки и проектирования новой авиационной техники. В рамках данной задачи весьма актуальным остаётся вопрос о безопасности полётов в условиях атмосферного обледенения узлов и агрегатов летального аппарата и, в частности, двигателя самолёта.

Согласно нормативному документу [1], авиационный двигатель при обледенении не должен допускать снижение мощности или тяги ниже величины, указанной в Руководстве по эксплуатации этого двигателя. Однако, даже при соблюдении данного условия, остаётся открытым вопрос о влиянии процесса обледенения двигателя на его прочностные характеристики. В частности, нарост льда изменяет геометрию проточной части и лопаток, что в свою очередь приводит к изменениям режима работы рабочего колеса компрессора.

В данной статье представлены результаты исследования вибрационных процессов, возникающих при обледенении авиационного двигателя. Объектом исследования являлись ГТД типа SaM-146

и двигатель семейства ПС-90А. Испытания проведены на специализированном стенде ЦИАМ, позволяющем имитировать обледенение в соответствии с нормативными документами [2].

В условиях обледенения на незащищённых элементах двигателя неизбежно образуются ледяные наросты. При этом происходит [3]:

- загромождение проточной части спрямляющего и направляющего аппаратов ледяными наростами и, следовательно, соответствующее дросселирование режима работы рабочего колеса;
- искажение профилей лопаток, связанное с образованием ледяной плёнки переменной толщины на поверхности сжатия;
- появление утолщённых наростов льда на передних кромках профилей рабочего колеса (РК), соплового аппарата (СА) и направляющего аппарата (НА);
- возникновение бугристости и сильной шероховатости обледеневающих поверхностей.

Образование наледи на лопатках вентилятора может привести к нестабильному обтеканию, вращающемуся срыву и

флаттеру. Загромождение протоков может уменьшить тягу или мощность двигателя. Блокирование входных фильтров или защитных устройств может снизить эффективность систем удаления посторонних предметов. Ассиметричное нарастание льда из-за поперечных потоков на входе может приводить к циклическим нагрузкам роторов.

Для оценки вибрационного состояния двигателя использованы сигналы от виброакселерометров, установленных на корпусе двигателя. Испытания проводились в различных условиях преимущественно по схеме, приведённой на рис. 1. Процесс обледенения имитируется на установленном режиме работы двигателя для заданной частоты вращения ротора двигателя.

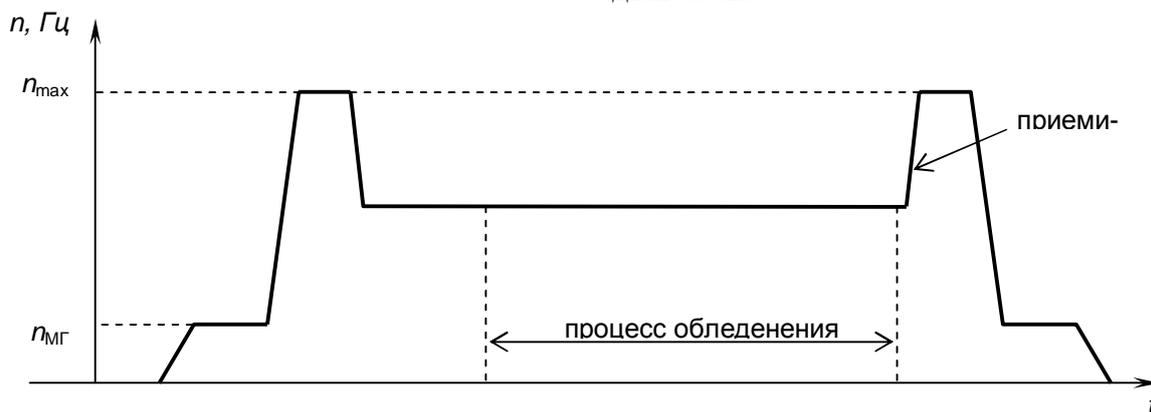


Рис. 1. График изменения оборотов ротора двигателя при испытаниях на обледенение

Важным для оценки вибрационного состояния двигателя в условиях обледенения является уровень 1-й гармоники в спектре вибраций, так как повышение уровня вибраций вызвано в первую очередь дисбалансом ротора вентилятора.

При обработке экспериментальных данных было установлено, что процесс обледенения носит циклический характер. В ходе каждого цикла можно выделить следующие этапы (рис. 2, 3):

- постепенное нарастание льда на поверхностях входного устройства двигателя;
- неравномерное накопление льда на поверхности вентилятора, а также неравномерное скалывание мелких кусков льда

с лопаток вентилятора вызывает появление эксцентриситета вала компрессора, что приводит к увеличению уровня вибраций;

- увеличение уровня вибраций инициирует сброс льда со всех частей проточной части компрессора, сброс льда также происходит вследствие выполнения перегазовок;
- сброс льда уменьшает разбалансировку вала двигателя и, как следствие, уменьшается уровень вибраций, двигатель возвращается почти в первоначальное состояние (некоторое количество льда остается на его поверхностях);
- далее описанный цикл повторяется вновь.

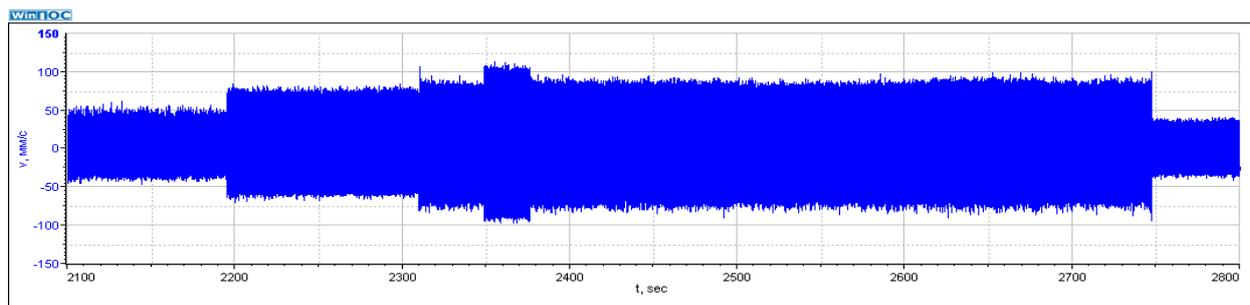


Рис. 2. Оциллограмма виброскорости

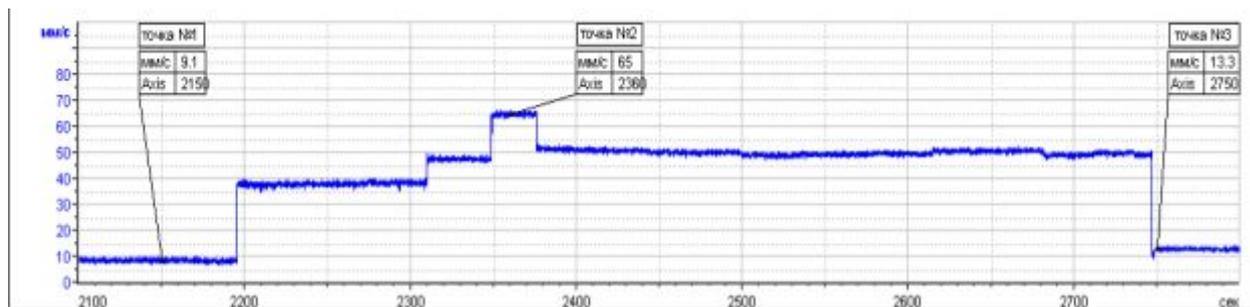
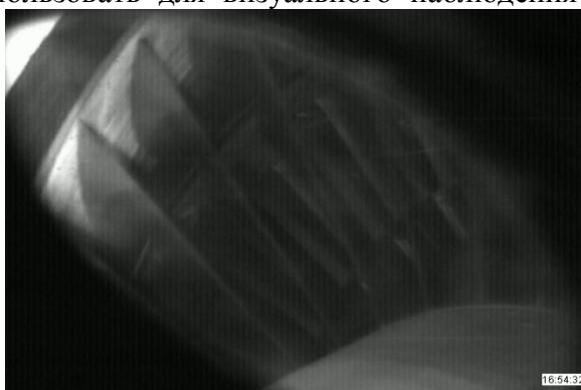


Рис. 3. Амплитуда 1-й гармоники в спектре виброскорости

Для наглядности на рис. 4 представлены кадры видеосъемки входных элементов двигателя во время испытаний на обледенение. Данные кадры можно использовать для визуального наблюдения

за процессом обледенения на входных элементах двигателя и сопоставления с экспериментальными данными о вибрации двигателя.



а

б

Рис. 4. Кадры видеосъемки: в начале цикла обледенения (а), в момент максимального уровня вибраций в цикле обледенения (б)

В спектре вибраций (рис. 5) представляют интерес составляющие с частотой, не кратной частотам вращения роторов двигателя, что может являться диагностическим признаком колебаний лопаток. Поэтому существует необходимость в исследовании данных спектральных составляющих на предмет их физической природы. Для этого вполне подойдет оп-

ределение корреляционных связей частотного спектра вибраций с частотами вращения роторов и частотами следования лопаток, на которых возможно обледенение. И при отсутствии указанных корреляционных связей необходимо своевременно диагностировать аэроупругие или какие-либо другие процессы по сигналам с виброакселерометров.

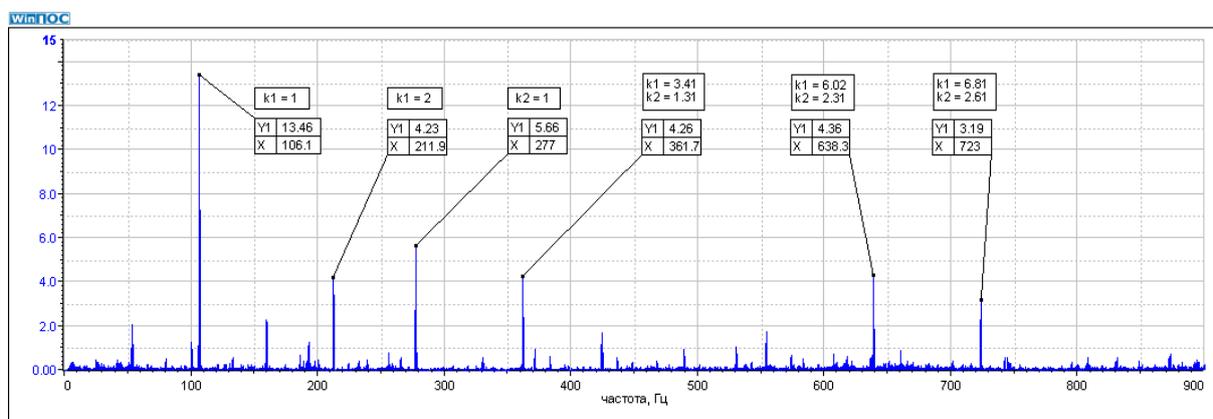


Рис. 5. Спектр виброскорости

Важной особенностью испытаний авиационного газотурбинного двигателя в условиях обледенения является отсутствие возможности тензометрирования лопаток компрессора, т.к. тензометры на лопатках и средства передачи сигналов на регистрирующую аппаратуру станут дополнительными концентраторами для образования льда и будут искажать реальную картину обледенения. Это затрудняет диагностику колебаний лопаток. Диагностика в этом случае возможна с применением бесконтактных методов. Другая особенность испытаний двигателя в условиях обледенения связана с длительностью таких испытаний. При этом процесс обледенения, как правило, занимает значитель-

ное время. Получаемые экспериментальные данные соответственно будут иметь также значительный объём. Это обстоятельство делает обработку экспериментальных данных довольно затруднительной, требующей применения большого количества вычислительных ресурсов.

Учитывая эти особенности испытаний ГТД в условиях обледенения, можно выделить следующие направления дальнейших исследований данной проблемы: разработка и развитие новых методов бесконтактной диагностики колебаний входных элементов ГТД; разработка и развитие алгоритмов автоматизированной обработки экспериментальных данных.

Библиографический список

1. Авиационные правила. Часть 33. Нормы лётной годности двигателей воздушных судов. М.: Авиаздат, 2004. 46 с.
2. Гельмедов Ф.Ш., Горячев А.В. [и др.] Методические вопросы проведения испытаний авиационных двигателей в условиях обледенения и оценка изменения характеристик ТРДД // Авиационно-космическая техника и технология. 2008. № 7(54). С. 133-138.

3. Анализ факторов, приводящих к появлению вращающегося срыва в процессе обледенения вентилятора ТРДД, и факторов, способствующих сбросу льда с входных элементов двигателя. Технический отчёт № 300-5143. Хориков А.А. совместно с отд. 300. М.: ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2006.

Информация об авторах

Данилкин Сергей Юрьевич, начальник сектора, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: danilkin@rtc.ciam.ru. Область научных интересов: прочность, динамика, цифровая обработка сигналов.

Телешев Виктор Анатольевич, ведущий инженер, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: danilkin@rtc.ciam.ru. Область научных интересов: прочность, динамика, цифровая обработка сигналов.

INVESTIGATION OF THE VIBRATION BEHAVIOR OF A GAS TURBINE ENGINE IN ICING CONDITIONS

© 2014 S.Y. Danilkin, V.A. Teleshev

P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation

With respect to aeronautical engineering it is focused on the problems of the dynamic strength of parts and units of aircraft engines, namely the resistance of the material under the action of various oscillatory processes (vibration) arising from the operation of such engines. An important aspect of this problem is to ensure the safety of flight in atmospheric icing conditions. Relevance of study is determined, above all, the lack of study

of the processes of icing. The paper summarizes the results of processing the experimental data obtained in a test of gas turbine engines in icing conditions at a specialized ground test rig. The stages of the process with regard to icing vibration condition of the engine. In the course of experiments on icing were found in the spectrum of the vibration diagnostic signs of the blades self-oscillations. One of the probable causes of such hazardous processes may be throttling the fan due to ice build-up on the blades straightener or on input parts of the fan. However, for a more detailed description of these phenomena occurring in icing conditions, additional studies, experiments, calculations. This article describes the features of the study of vibrating processes in the engine in such trials. It is discussed the directions for further research on this issue.

Icing, vibrations, GTE testing, vibration diagnostics, spectral analysis.

References

1. Aviatsionnye pravila. Chast' 33. Normy letnoy godnosti dvigateley voz-dushnykh sudov [Aviation Regulations. Part 33. Standards of airworthiness of aircraft engines]. Moscow: Aviaizdat Publ., 2004. 46 p.
2. Gelmedov F.SH., Goryachev A.V. and others. Methodological aspects of testing aircraft engines in icing conditions and assessment of changes in the characteristics of turbofan // *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2008. No. 7(54). P. 133-138. (In Russ.)
3. Analiz faktorov, privodyashchikh k poyavleniyu vrashchayushchegosya sryva v protsesse obledeneniya ventilyatora TRDD, i faktorov, sposobstvuyushchikh sbrosu l'da s vkhodnykh elementov dvigatelya [Analysis factors that lead to the rotating stall in the icing fan turbofan engines, and factors contributing to the discharge of ice from the input elements of the engine]. Tech. report No. 300-5143. Khorikov A.A. in conjunction with the department 300. Moscow: CIAM Publ., 2006. (In Russ.)

About the authors

Danilkin Sergey Yurievich, chief of group, P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motors, Moscow. E-mail: danilkin@rtc.ciam.ru. Area of Research: strength, dynamics, experiment-calculated analysis.

Teleshev Victor Anatolievich, leading engineer, P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motors, Moscow. E-mail: danilkin@rtc.ciam.ru. Area of Research: strength, dynamics, experiment-calculated analysis.