

УДК 51-74:62
ББК 22.193:22.213

Р.Н. Горбунов
О.В. Репецкий

К ПРОБЛЕМЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕМПФИРОВАНИЯ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРИ ОЦЕНКЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ТУРБОМАШИН

Обосновывается необходимость проведения исследований работы газотурбинных двигателей. Определяются преимущества проведения численных исследований. Обозначаются задачи, решение которых позволит разработать численные методы и программное обеспечение, способное с достаточной точностью провести моделирование демпфирования и возмущающих динамических нагрузок при оценке усталостной прочности лопаток турбомашин.

Ключевые слова: возмущающая динамическая нагрузка, демпфирование, турбомашин, численные методы.

R.N. Gorbunov
O.V. Repetskiy

ON ISSUE OF MATHEMATICAL MODELING OF DAMPING AND DYNAMIC LOAD WHEN ESTIMATING ENDURANCE STRENGTH OF DETAILS OF TURBO-MACHINES

The article substantiates the need for research of gas-turbine engines, determines advantages of carrying out numerical studies, and tasks to be solved to work out numerical methods and software capable of accurate modeling of damping and disturbing dynamic load when estimating endurance strength of turbo-machinery blades.

Keywords: disturbing dynamic load, damping, turbo-machine, numerical methods.

В последние десятилетия ритм жизни современного человека значительно вырос, человеку часто приходится перемещаться на дальние расстояния, в чем незаменимым помощником ему являются самолеты. В движение современные самолеты, как правило, приводятся несколькими газотурбинными двигателями (ГТД), которые, в свою очередь, должны работать безотказно и надежно в течение продолжительного периода времени, выход из строя двигателя может привести к гибели сотен людей.

Повышение надежности и долговечности работы подразумевает создание двигателей (турбомашин), обладающих повышенной усталостной прочностью. В настоящее время ставится задача увеличения ресурса авиационных газотурбинных двигателей до ресурса самолета, который составляет несколько десятков тысяч часов [6]. Весь цикл работы турбомашин во время полета обычного пассажирского самолета можно условно разделить на несколько этапов. Старт, когда полностью остановленный двигатель набирает обороты и переходит в режим малого газа. Затем взлет, когда за счет увеличения тяги двигателя происходит разгон самолета, отрыв его от земли и набор высоты. Полет, когда двигатели работают для поддержания требуемой скорости полета. Снижение, когда уменьшение тяги двигателей приводит к уменьшению скорости самолета, после чего самолет способен нормально приземлиться. Затем происхо-

дит посадка, во время которой тяга двигателей еще уменьшается, после контакта с землей для уменьшения скорости самолета зачастую применяется реверс. И, уже в самом конце, происходит остановка двигателя. При взлете, снижении, посадке, а также маневрировании самолета роторы авиационных ГТД подвергаются значительным перегрузкам. Одними из важнейших составных частей ротора ГТД являются лопатки (лопасти). Лопатки жёстко закреплены на роторе, представляющем собой вращающийся вал, во многом от конфигурации лопатки зависит КПД турбины. Лопатки являются высоконагруженными деталями, кроме воздействия высоких температур, более тысячи градусов, на них еще постоянно действуют центробежные силы, давление потока и пр. От прочности лопатки зависит долговечность работы двигателя, преждевременно разрушившаяся лопатка способна привести к разрушению всего двигателя.

Уже давно задача анализа усталостной прочности турбомашин и их составляющих вызвала особенный интерес значительного количества ученых, которые предлагали различные алгоритмы, методы и методики исследования. Наиболее известны из них: И.А. Биргер, В.П. Когаев, А.П. Гусенков, И.В. Демьянушко, В.В. Джамай, Р.А. Дульнев, М.Е. Колотников, Л.В. Кравчук, А.А. Кузнецов, Н.Д. Кузнецов, Н.А. Махутов, А.Н. Петухов, О.В. Репецкий, Л.П. Селифонова, Г.Р. Семенов, Г.С. Скубачевский, Г.Н. Третьяченко, Н.М. Федоров и др. В монографии [6], среди прочих задач, решение которых необходимо для оценки ресурса лопаток ГТД, указаны следующие:

1. Расчетное или расчетно-экспериментальное определение возбуждающей нагрузки на стационарных и переходных режимах работы.

2. Оценка демпфирования в материале, конструкционное демпфирование, аэродинамическое демпфирование и демпфирование от ударных эффектов.

При решении первой задачи необходимо помнить, что лопатки являются механически высоконагруженными деталями. Статические нагрузки, как правило, велики, но легки для анализа в силу своей неизменности. Кроме статических напряжений, возникающих в результате вращения ротора, возникающих от действия газовых и температурных сил, в лопатках так же возникают напряжения от переходных режимов (изменение скоростей вращения ротора), различных колебаний, вызванных деформацией ротора, пульсацией газового потока [6]. В отличие от статических нагрузок динамические нагрузки меняют свои характеристики (значение, направление и пр.) и более сложны для моделирования. Среди динамических нагрузок можно выделить циклические, меняющие свои характеристики по циклическому закону. В некоторых случаях даже незначительные, в сравнении со статическими, динамические нагрузки способны приводить к негативным последствиям. Так, например, в случае совпадения частоты возмущающей динамической нагрузки с одной из собственных частот лопатки наступает явление резонанса, характеризующееся значительным увеличением амплитуд колебаний. Резонансные явления наблюдаются также, когда собственная частота лопатки кратна частоте возмущающей силы [2]. В переходных режимах, например, при необходимости резкого изменения режима работы двигателя, возникают большие перегрузки, которые негативно сказываются на прочности лопаток.

Вторая задача возникает на основании того, что при работе в лопатках турбомашин возникают различного рода колебания. Источником

возбуждения колебаний рабочих колес является воздействие пара или газа, также колебания могут возникать вследствие изменения геометрии ротора. Для гашения колебаний лопаток турбомашин применяются различные механизмы демпфирования. Существует конструкционное демпфирование, когда демпфирование осуществляется посредством различных конструктивных особенностей крепления лопаток, например, бандажей или демпфирующей проволоки, а также в местах крепления лопаток к диску (замки). Также существует демпфирование в самом материале. Демпфирование в материале хорошо изучено в работе [5], в работах [3; 9] было рассмотрено демпфирование в бандажных и в замковых соединениях, в то время как конструкционное демпфирование изучено значительно меньше, хотя в последнее время появились теоретические исследования, проливающие свет на закономерности рассеивания энергии вследствие трения в неподвижных соединениях [4]. Кроме того, в процессе работы турбомашин возникает аэродинамическое демпфирование и демпфирование от ударных эффектов. Стоит отметить, что демпфирование в материале и конструкционное демпфирование оказывают положительное воздействие, в то время как аэродинамическое демпфирование может оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие [6].

При исследовании надежности работы лопаток ГТД не следует забывать и об исследовании диска, на котором установлены лопатки, поскольку различные факторы, например, колебания, возникшие в одной из лопаток, способны через диск передаваться другим лопаткам. В связи с этим при комплексной оценке работы ГТД необходимо проводить исследования как отдельно лопатки, так и облопаченного диска (рабочего колеса). Более подробно моделирование рабочих колес описано в [1; 6; 8].

На практике существует много работ, в которых отдельно рассмотрены задачи несущей способности, динамики и усталостной прочности деталей турбомашин. Но имеется ограниченное количество научных трудов, в которых было рассмотрено моделирование возмущающих динамических нагрузок и демпфирования при оценке усталостной прочности лопаток турбомашин.

Экспериментальное исследование работы турбомашин и их деталей весьма затруднено, во-первых, экспериментальные исследования дорогостоящи, а, во-вторых, исследования процессов, происходящих внутри машины, во время работы, затрудняет высокая температура и значительная скорость вращения ротора. Возникает вопрос о применении иных методов для исследования надежности работы турбомашин, не требующих таких затрат, как при экспериментальном исследовании, и позволяющих работать в более комфортных условиях. Уже давно для решения прочностных задач применяются численные методы исследования, позволяющие смоделировать объект и процессы, протекающие в нем, при помощи математических уравнений. Существует множество различных методов, например Метод конечных элементов, метод Бубнова-Галеркина с полиномиальными базисными функциями, вариационно-разностный метод и прочие. Каждый метод оптимален для решения различного рода задач. В связи с тем, что многие численные методы легко поддаются программированию, в последнее время было создано множество программных продуктов, таких, как ANSYS, NASTRAN, MSC. Fatigue, FastranII, nCode и др., позволяющих проводить моделирование и численные исследования. Однако они разработаны для решения общих

задач или же задач, относящихся к какой-то конкретной области, и не всегда позволяют достоверно и точно смоделировать, рассчитать те объекты и процессы, для которых они не были изначально предназначены. В этих случаях необходима доработка уже существующих или разработка совершенно новых численных методов и программных продуктов для возможности выполнения точного анализа.

Таким образом, разработка математических алгоритмов, численных методов и программ расчета, которые позволяют смоделировать динамические нагрузки и демпфирование при оценке усталостной прочности лопаток и других деталей турбомашин в реальных режимах работы еще на стадии проектирования, а также провести анализ надежности и работоспособности этих деталей, является актуальной технической проблемой современности.

Для решения этой проблемы необходимо решение следующих задач:

1. Исследование видов динамических нагрузок, воздействующих на лопатки ГТД, источника их возникновения, а также влияния, оказываемого ими на работу лопаток ГТД, для оценки усталостной прочности лопаток и других деталей турбомашин при реальной эксплуатационной нагруженности.

2. Исследование демпфирования, его видов, источников возникновения, а также влияния, оказываемого демпфированием на работу лопаток ГТД для оценки усталостной долговечности лопаток и других деталей турбомашин при реальной эксплуатационной нагруженности.

3. Математическое моделирование возмущающей динамической нагрузки и демпфирования для возможности применения созданных моделей при анализе долговечности работы лопаток турбомашин.

4. Проведение анализа и выбор моделей возмущающей динамической нагрузки и демпфирования, наиболее точно моделирующих реальные процессы, происходящие в ГТД.

5. Разработка эффективных численных методов и алгоритмов и их реализация в виде комплексов программ для моделирования возмущающей динамической нагрузки и демпфирования при оценке усталостной прочности лопаток турбомашин.

Список использованной литературы

1. Автоматизация прочностных расчетов турбомашин / под ред. О.В. Репецкого. — Иркутск: Изд-во Иркутск. Союза НИО, 1990.
2. Красюк А.М. Взаимодействие ротора вентилятора с возмущенным воздушным потоком / А.М. Красюк, Е.Ю. Русский // Научный вестник Московского государственного горного университета. — 2011. — № 3. — С. 42–52.
3. Матвеев В.В. Демпфирование колебаний деформируемых тел / В.В. Матвеев. — Киев: Наукова думка. — 1985. — 264 с.
4. Пановко Я.Г. Проблемы теории конструкционного демпфирования в неподвижных соединениях / Я.Г. Пановко // Динамика машин. Труды третьего совещания по основным проблемам теории машин и механизмов. — М.: Машгиз, 1963. — С. 209–234.
5. Писаренко Г.С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов: справ. / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. — Киев: Наукова думка. — 1971. — 376 с.
6. Репецкий О.В. Компьютерный анализ динамики и прочности турбомашин / О.В. Репецкий. — Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999. — 301 с.
7. Репецкий О.В. Исследование скользящего контакта между полками лопатки и круглыми фрикционными демпферами газотурбинных двигателей / О.В. Репецкий, Фан Ван Туан // Известия Иркутской государственной экономической академии. — 2011. — № 5. — С. 176–180.

8. Irretier H. Zu Empfindlichkeitsanalysen, instationären Schwingungen und Lebensdauernberechnungen von Turbinenschaufeln und Laufrädern bei transienten und stationären Betriebsbedingungen / H. Irretier, O. Repetski, K. Sainchkowski. — Kassel: Kassel Universität, Institut für Mechanik, 1994.

9. Zmitrowicz A. A vibration analysis of a turbine blade system damped by dry friction forces / A. Zmitrowicz // Int. J. Mech. Sci. — 1981.

References

1. Avtomatizatsiya prochnostnykh raschetov turbomashin / pod red. O.V. Repetskogo. — Irkutsk: Izd-vo Irkutsk. Soyuz NIO, 1990.

2. Krasyuk A.M. Vzaimodeistvie rotora ventilyatora s vozmushchennym vozdushnym potokom / A.M. Krasyuk, E.Yu. Russkii // Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta. — 2011. — № 3. — S. 42–52.

3. Matveev V.V. Dempfirovanie kolebaniy deformiruemykh tel / V.V. Matveev. — Kiev: Naukova dumka. — 1985. — 264 s.

4. Panovko Ya.G. Problemy teorii konstruktсионного dempfirovaniya v nepodviznykh soedineniyakh / Ya.G. Panovko // Dinamika mashin. Trudy tret'ego soveshchaniya po osnovnym problemam teorii mashin i mekhanizmov. — M.: Mashgiz, 1963. — S. 209–234.

5. Pisarenko G.S. Vibropogloshchayushchie svoystva konstruktсионnykh materialov: sprav. / G.S. Pisarenko, A.P. Yakovlev, V.V. Matveev. — Kiev: Naukova dumka. — 1971. — 376 s.

6. Repetskii O.V. Komp'yuternyi analiz dinamiki i prochnosti turbomashin / O.V. Repetskii. — Irkutsk: Izd-vo IrGTU, 1999. — 301 s.

7. Repetskii O.V. Issledovanie skol'zyashchego kontakta mezhdu polkami lopatki i kruglymi friktsionnymi dempferami gazoturbinnnykh dvigatelei / O.V. Repetskii, Fan Van Tuan // Izvestiya Irkutskoi gosudarstvennoi ekonomicheskoi akademii. — 2011. — № 5. — S. 176–180.

8. Irretier H. Zu Empfindlichkeitsanalysen, instationären Schwingungen und Lebensdauernberechnungen von Turbinenschaufeln und Laufrädern bei transienten und stationären Betriebsbedingungen / H. Irretier, O. Repetski, K. Sainchkowski. — Kassel: Kassel Universität, Institut für Mechanik, 1994.

9. Zmitrowicz A. A vibration analysis of a turbine blade system damped by dry friction forces / A. Zmitrowicz // Int. J. Mech. Sci. — 1981.

Информация об авторах

Горбунов Роман Николаевич — аспирант, кафедра информатики и кибернетики, Байкальский государственный университет экономики и права, г. Иркутск, e-mail: gorbunow@list.ru.

Репецкий Олег Владимирович — доктор технических наук, профессор, проректор по международной деятельности, Байкальский государственный университет экономики и права, г. Иркутск, e-mail: repetskiy@isea.ru.

Authors

Gorbunov Roman Nikolaevich — post-graduate student, Chair of Computer Science and Cybernetics, Baikal State University of Economics and Law, Irkutsk, e-mail: gorbunow@list.ru.

Repetskiy Oleg Vladimirovich — Doctor of Science in Engineering, Professor, Vice Rector for International Relations, Baikal State University of Economics and Law, Irkutsk, e-mail: repetskiy@isea.ru.