

УДК 621.452.322-226.2:678:539.4

ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ УГЛЕПЛАСТИКОВОЙ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВУХКОНТУРНОГО ДВИГАТЕЛЯ С БОЛЬШОЙ СТЕПЕНЬЮ ДВУХКОНТУРНОСТИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

© 2015 Т. В. Буюкли, Ю. П. Федорченко, В. А. Шорстов

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

Исследовано динамическое поведение колеблющихся лопаток перспективного широкохордного вентилятора турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД) с большой степенью двухконтурности под воздействием нестационарных аэродинамических нагрузок. Нестационарные аэродинамические силы возникают при обтекании рабочего колеса вентилятора, находящегося в воздухозаборнике при сильном боковом ветре. Данные нагрузки влияют на динамическое поведение лопаток вентилятора и могут привести к увеличению амплитуд колебаний лопаток и их напряжённости. Исследование динамического поведения колеблющихся лопаток проводится на базе трёхмерных газодинамических и конечно-элементных моделей высокого уровня. В газодинамической модели рассматривается нестационарное вязкое трёхмерное течение воздуха. В прочностной модели учитывается геометрическая нелинейность и анизотропия свойств композиционного материала. Для получения нестационарных аэродинамических нагрузок используется разработанный в ЦИАМ программный комплекс Собга, основанный на методе С.К.Годунова. Для решения механической задачи применяется пакет конечно-элементного анализа ANSYS. В работе рассматриваются как вынужденные колебания лопатки при заданных постоянных циклических аэродинамических нагрузках, так и колебания с учётом взаимного влияния конструкции и потока (совместная задача) титановой и углепластиковой лопаток. Проведено сравнение полученных результатов. Показаны различия между результатами решения задачи о вынужденных колебаниях и совместной задачи для каждой из исследуемых лопаток, а также различия между результатами, полученными для лопаток одинаковой конфигурации, но сделанных из разных материалов.

Лопатка широкохордного вентилятора, воздухозаборник, нестационарные аэродинамические нагрузки, вынужденные колебания, взаимное влияние конструкции и потока, титановая лопатка, углепластиковая лопатка.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-160-170

Исследование динамического поведения лопаток вентиляторов является актуальной задачей двигателестроения. Существует множество работ по исследованию колебаний лопаток компрессоров под действием различных нагрузок. Особый интерес представляют работы, описывающие поведение лопаток под действием нестационарных аэродинамических сил, вызванных различными причинами, например, влиянием воздухозаборника [1-4]. Во многих работах для исследования динамического поведения лопаток используются упрощённые методы. Они имеют ряд преимуществ, например, небольшое время расчёта и простота реализации, а следовательно возможность быстрого получения решения для нескольких режимов работы двигателя. В ряде работ даже учитывается взаимное влияние конструкции и потока, что позволяет авторам говорить о решении задачи флаттера лопатки [5-7]. Тем не менее, в

области двигателестроения появляются новые конструктивные решения, среди которых полые высоконагруженные широкохордные лопатки, прогнозирование поведения которых под действием вынуждающих сил с использованием стандартных подходов может привести к неверным результатам. Кроме того, на современном этапе, когда в качестве материала лопаток используются композиционные материалы, решение задач стандартными методами может также сильно повлиять на результаты исследований. Таким образом, исследование динамического поведения углепластиковых и широкохордных титановых лопаток в нестационарном потоке воздуха в полной постановке является актуальной задачей.

В работе проведено исследование влияния нестационарных аэродинамических нагрузок на динамическое поведение углепластиковой лопатки рабочего колеса (РК) перспективного вентилятора ТРДД с

большой степенью двухконтурности. Для сравнения приведены результаты исследования титановой лопатки в той же постановке.

Целями работы являются:

1) исследование вынужденных колебаний углепластиковой лопатки под действием нестационарных аэродинамических сил;

2) сравнение результатов решения задачи о вынужденных колебаниях углепластиковой лопатки с результатами, полученными для титановой лопатки той же конфигурации;

3) прямое решение «совместной» задачи, учитывающей взаимное влияние аэродинамики и конструкции титановой и углепластиковой лопаток;

4) сравнение результатов решения совместной задачи с результатами решения задачи о вынужденных колебаниях титановой и углепластиковой лопаток одинаковой конфигурации.

В качестве возбуждающих сил используются нестационарные аэродинамические силы, возникающие при обтекании рабочего колеса вентилятора, находящегося в воздухозаборнике при сильном боковом ветре.

Исследования вынужденных колебаний проводятся в полной механической постановке. Расчёты выполнены с использованием трёхмерных твёрдотельных моделей с учётом больших перемещений и деформаций и анизотропии свойств используемого композиционного материала.

1. Определение нестационарных аэродинамических нагрузок

1.1. Исследуемая конфигурация

Исследуемое РК перспективного широкохордного вентилятора ТРДД и используемые углепластиковая и титановая лопатки рабочего колеса показаны на рис. 1.

Постановка задачи

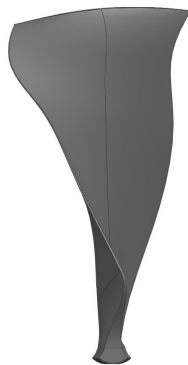
Рассмотрим решение задачи о вязком течении в расчётной области (рис. 2), содержащей рабочее колесо вентилятора с прилегающим участком проточной части, при заданных полных параметрах на входе, заданной скорости вращения РК и соответствующем этим условиям расходе воздуха, определяемым значением статического давления в выходном сечении. Расчёт ведётся в декартовой системе координат xuz , связанной с РК и вращающейся вместе с ним вокруг оси x , совпадающей с осью двигателя, и осями u и z , перпендикулярными к ней.

Для уменьшения объёма вычислений радиальный зазор при расчёте течения в рабочем колесе не учитывался и, кроме того, поверхность кока (втулки) считалась невязкой. В табл. 1 детально описаны используемые граничные условия для каждой из границ расчётной области.

Расчёты выполнялись на вычислительной системе, имеющей в общей сложности 960 ядер в 32 узлах с оперативной памятью на узел 64 Гб.



а



б



в

Рис.1. Рабочее колесо перспективного вентилятора ТРДД (а) и используемые в расчётах лопатки: углепластиковая (б) и титановая (в)

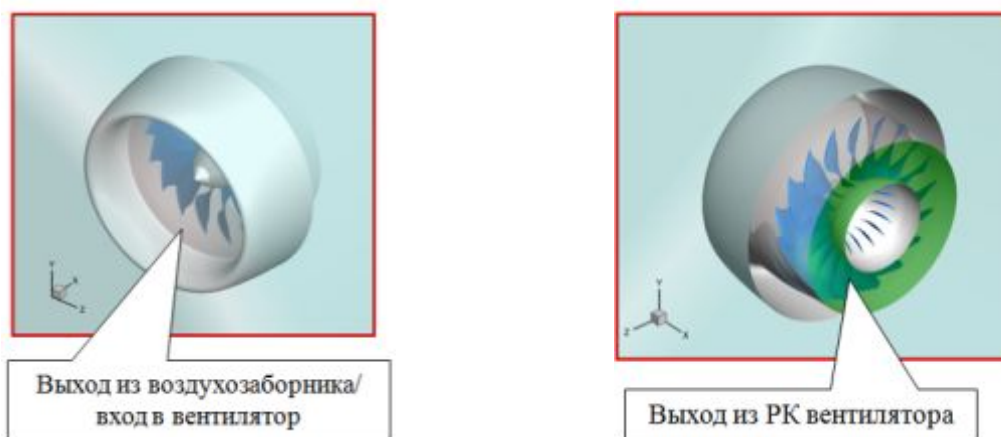


Рис. 2. Расчётная область и её границы

Таблица 1. Используемые граничные условия

Граница	Условие
Сечение входа	Полные давление и температура, осевое втекание
Периферийная поверхность	Прилипание в неподвижной системе координат
Поверхность втулки	Непротекание
Поверхности лопаток	Прилипания
Сечение выхода	Статическое давление с условием радиального равновесия

Методика исследования базируется на известном численном методе С.К. Годунова, реализованном в виде универсального программного комплекса (ПК) Cobra. ПК Cobra позволяет решать 2D/3D стационарные и нестационарные задачи внешней и внутренней аэродинамики посредством численного интегрирования уравнений RANS (Reynolds Averaging Navier-Stocks equations) и URANS (Unsteady RANS equations) с использова-

нием традиционных одно- и двухпараметрических моделей турбулентности (Spalart-Allmaras, $k-\epsilon$ и SST) на неподвижных и подвижных структурированных сетках.

Расчётная сетка

Используемая расчётная сетка, содержащая 14 823 000 ячеек, иллюстрируется на рис. 3.

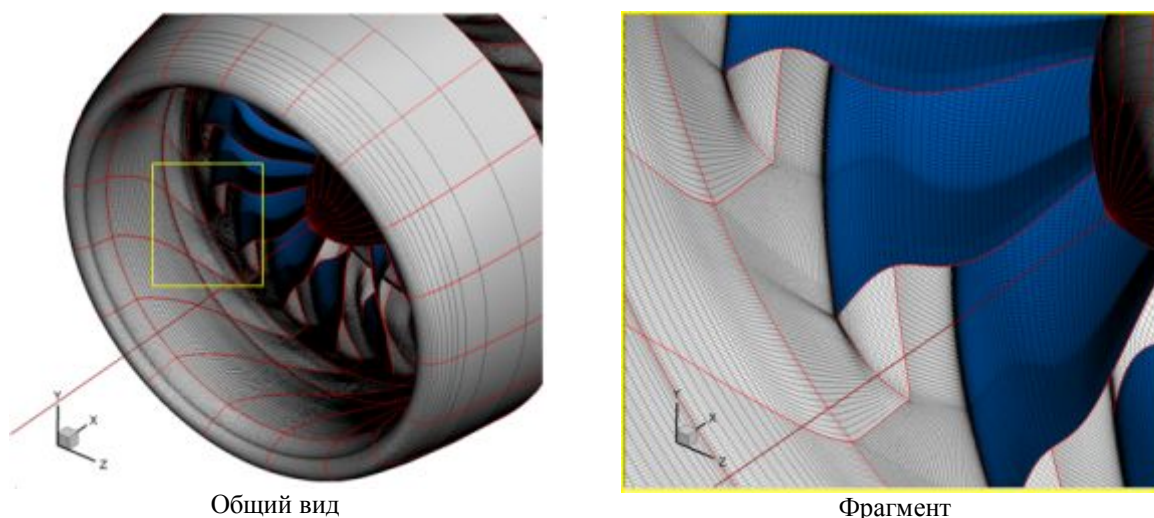


Рис. 3. Сеточные линии на обтекаемых поверхностях

Размер пристеночных ячеек (по нормали к обтекаемым поверхностям) выбирался таким, чтобы известный параметр y_1^+ , характеризующий адекватность описания течения в пограничном слое, находился на большей части обтекаемых поверхностей, где ставилось условие прилипания, в пределах 10-70, обеспечивая правильность работы «закона стенки».

Результаты расчётов

Расчёты обтекания проводились на режиме работы двигателя, соответствующем $H=0$ и $M=0.24$ и углу атаки $\alpha = 18^\circ$. Расчёту нестационарного течения предшествовало решение промежуточной стационарной задачи интегрирования уравнений RANS с выходом на заданный расход с точностью не менее 0.1%, после чего параметры течения «размножались» для всех 18 межлопаточных каналов и на выходе каждого из них фиксировалось найденное из решения стационарной задачи радиальное распределение статического давления.

Вынужденные колебания лопаток

Полученные нестационарные аэродинамические нагрузки (в данной работе – давления на характерных поверхностях

лопатки) использовались для расчёта вынужденных колебаний рассматриваемых лопаток РК вентилятора.

Для расчётов вынужденных колебаний лопаток использовался ПК ANSYS. Исследования проводились с учётом больших перемещений и деформаций.

Геометрические и конечно-элементные модели

Титановая рабочая лопатка – широкохордная, полый конструкции с замком типа «ласточкин хвост». В полости лопатки размещён гофрированный листовой наполнитель. Углепластиковая лопатка широкохордная, сплошной конструкции с замком типа «ласточкин хвост».

Конечно-элементная модель титановой лопатки состоит из 80116 восьмиузловых гексагональных элементов и 108465 узлов. Конечно-элементная модель композитной лопатки состоит из 46458 восьмиузловых гексагональных элементов и 55440 узлов. Модель учитывает анизотропию свойств используемого композитного материала. Обе модели построены в ПК ANSYS (рис. 4).

В качестве граничного условия для обеих лопаток использовалось закрепление контактных поверхностей лопатки с замком по всем степеням свободы.

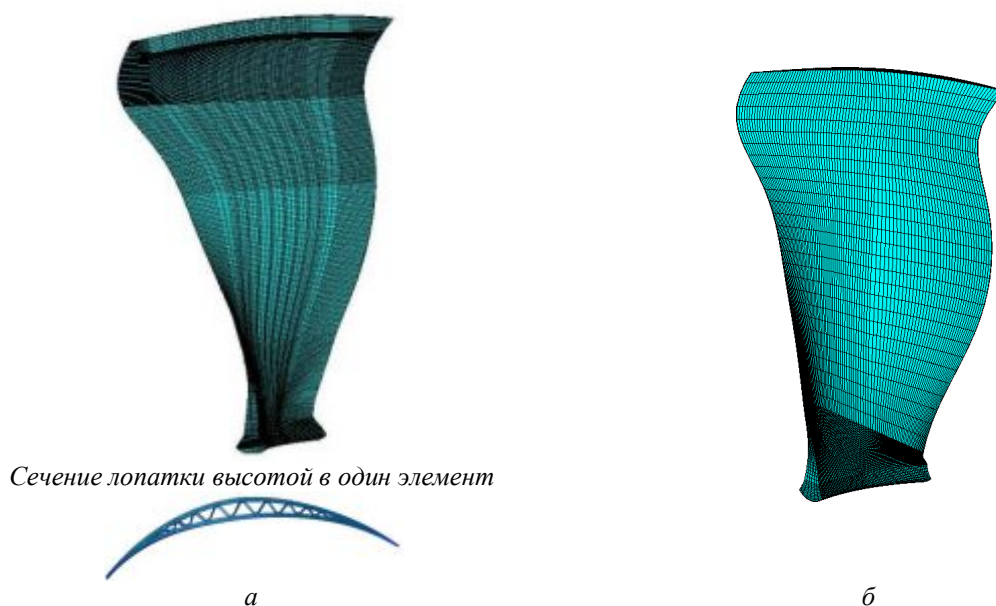


Рис. 4. Конечно-элементные модели лопаток: титановой (а) и углепластиковой (б)

Таблица 2. Механические свойства сплава BT-6

Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Значение
Плотность	ρ	кг/м ³	4430
Модуль Юнга	E	Па	1,15*10 ¹¹
Коэффициент Пуассона	μ	-	0,3

Свойства материалов

В качестве материала титановой лопатки использовался титановый сплав BT-6. Механические свойства сплава представлены в табл. 2 [8].

В качестве материала углепластиковой лопатки использовался анизотропный материал, данные по которому были получены в ЦИАМ.

Интерполяция нагрузок между расчётными сетками

Полученные нестационарные газовые нагрузки (давления) на каждом шаге расчёта пересчитываются из узлов газо-

динамической сетки в узлы прочностной сетки в ПК ANSYS с помощью специально разработанного макроса (модуля интерполяции), написанного на встроенном в ANSYS языке программирования ANSYS Mechanical APDL.

Пример результатов использования макроса для переноса давлений с газодинамической на прочностную сетку показан на рис. 5. Точность интерполяции определяется сравнением момента аэродинамических сил на лопатках. В данном случае разница составляет 5%.

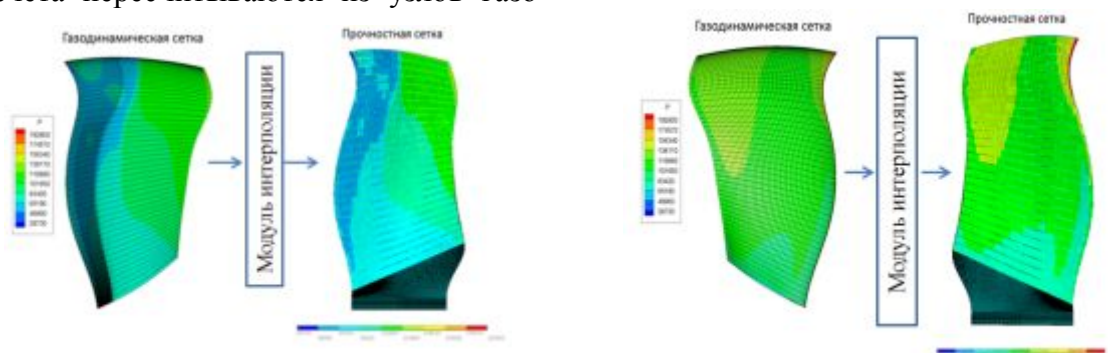
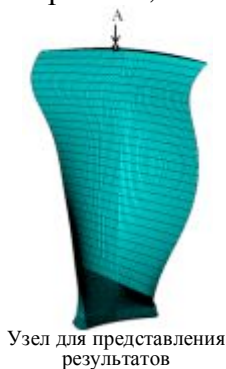


Рис. 5. Перенос давлений с газодинамической на прочностную сетку

Результаты расчётов

Результаты расчётов представлены в виде зависимостей перемещений центрального узла (точка А) каждой лопатки от времени, соответствующего десяти

оборотам РК (рис. 6). Изменения радиальных напряжений в точке 1, в которой за всё время расчёта возникают максимальные напряжения, представлены на рис. 7.



Узел для представления результатов

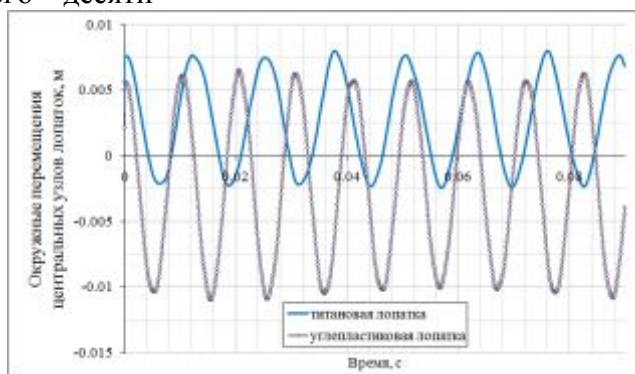


Рис. 6. Изменения перемещений по времени центрального узла (точка А) титановой и композитной лопаток

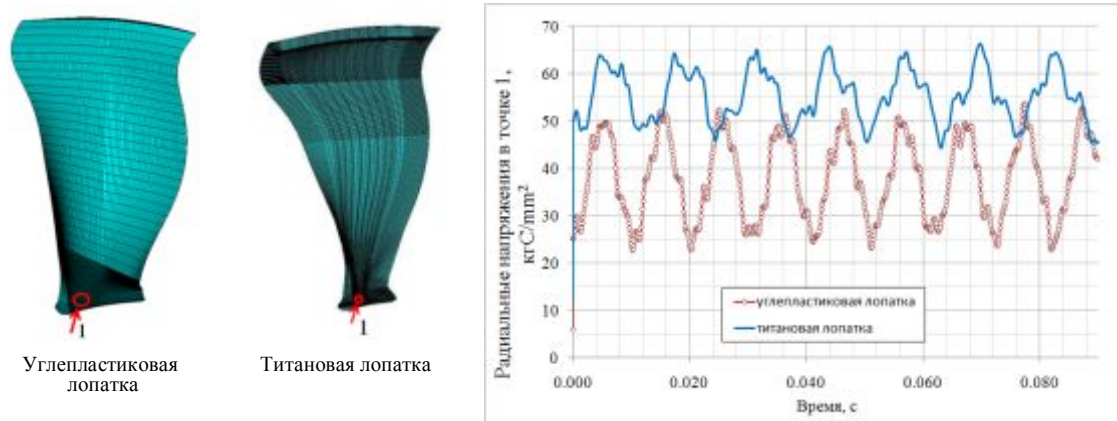


Рис. 7. Изменение радиальных напряжений в одном из узлов углепластиковой и титановой лопаток по времени

Решение совместной задачи

Рассматривается обтекание колеблющейся лопатки потоком воздуха, при котором на каждом шаге расчёта происходит взаимный обмен данными между пакетами прочностного анализа (ANSYS) и газодинамического анализа (Cobra).

В первый момент времени в ПК ANSYS происходит перемещение лопатки под действием инерционных сил в новое положение равновесия. Далее к лопатке прикладывается давление, полученное из решения стационарной аэродинамической задачи, и лопатка занимает ещё одно новое положение равновесия. Полученные перемещения лопатки пересчитываются из узлов КЭ сетки в узлы CFD-сетки и передаются в ПК Cobra, где осуществляется движение сетки в соответствии с полученными данными. Далее происходит обтекание лопатки, находящейся в новом положении равновесия. Полученные на этом шаге газодинамические нагрузки прикладываются к лопатке в ПК ANSYS, откуда полученные перемещения снова передаются в ПК Cobra. Таким образом, аэродинамические нагрузки получаются не просто из задачи обтекания статичной конструкции, а зависят от движения лопатки и влияют на него.

Полученные решения совместной задачи для углепластиковой и титановой лопаток сравниваются с соответствующими решениями задач о вынужденных колебаниях.

Титановая лопатка

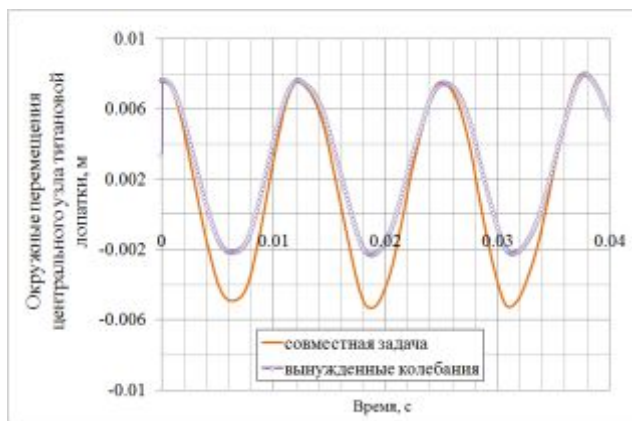
Сравнение перемещений в окружном направлении центрального узла периферийного сечения титановой лопатки при вынужденных колебаниях и в совместной задаче и Фурье-разложение перемещений представлено на рис. 8 для двух оборотов ротора.

Как видно из представленных результатов, перемещения центрального узла титановой лопатки в совместной задаче больше, чем в задаче о вынужденных колебаниях. Учёт взаимного влияния лопатки и потока увеличивает амплитуду колебаний лопатки, что может увеличить уровень напряжений в её корневом сечении.

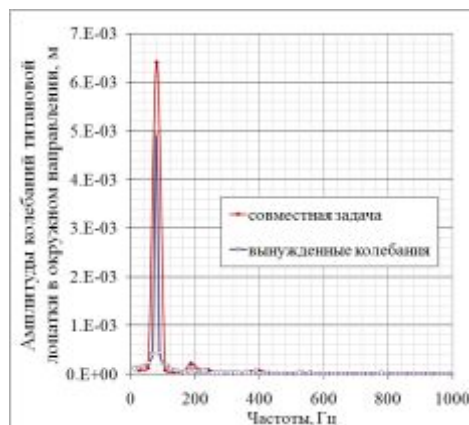
Частоты, возбуждаемые в титановой лопатке в окружном направлении, представлены в табл.3 для вынужденных колебаний и совместной задачи в сравнении с результатами модального анализа изолированной лопатки.

Таблица 3. Результаты Фурье-разложения окружных перемещений титановой лопатки

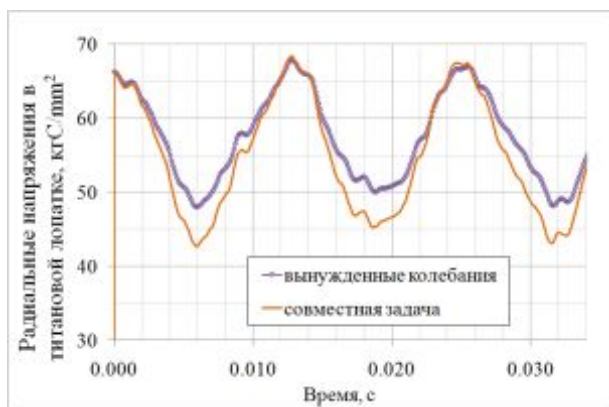
№ частоты	Собственные частоты, Гц	Результат Фурье-разложения, Гц	
		Вынужденные колебания	Совместная задача
1	78,679	77.9	80.1



Окружные перемещения центрального периферийного узла по времени



Результаты разложения в ряд Фурье окружных перемещений



Изменение радиальных напряжений по времени

Рис. 8. Сравнение результатов решения задачи о вынужденных колебаниях и совместной задачи для титановой лопатки

Анализ результатов разложения показывает, что в обеих задачах самую большую амплитуду имеет частота колебаний лопатки, которая близка к первой собственной частоте лопатки. Тем не менее, полученные значения частоты отличаются друг от друга.

Углепластиковая лопатка

Сравнение окружных перемещений центрального периферийного узла углепластиковой лопатки при вынужденных колебаниях и в совместной задаче и результаты разложения перемещений в ряд Фурье представлены на рис. 9 для двух оборотов ротора.

Как видно из представленных результатов, амплитуды колебаний углепластиковой лопатки в совместной задаче меньше, чем амплитуды вынужденных колебаний. Таким образом, учёт взаимного влияния лопатки и потока уменьшает амплитуду колебаний лопатки, что уменьшает и уровень напряжений в её корневом сечении.

Частоты, возбуждаемые в углепластиковой лопатке, представлены в табл. 4 для вынужденных колебаний и совместной задачи в сравнении с результатами модального анализа изолированной лопатки.

Таблица 4. Результаты Фурье-разложения окружных перемещений углепластиковой лопатки

№ частоты	Собственные частоты, Гц	Результат Фурье-разложения, Гц	
		Вынужденные колебания	Совместная задача
1	97,227	100	99,5

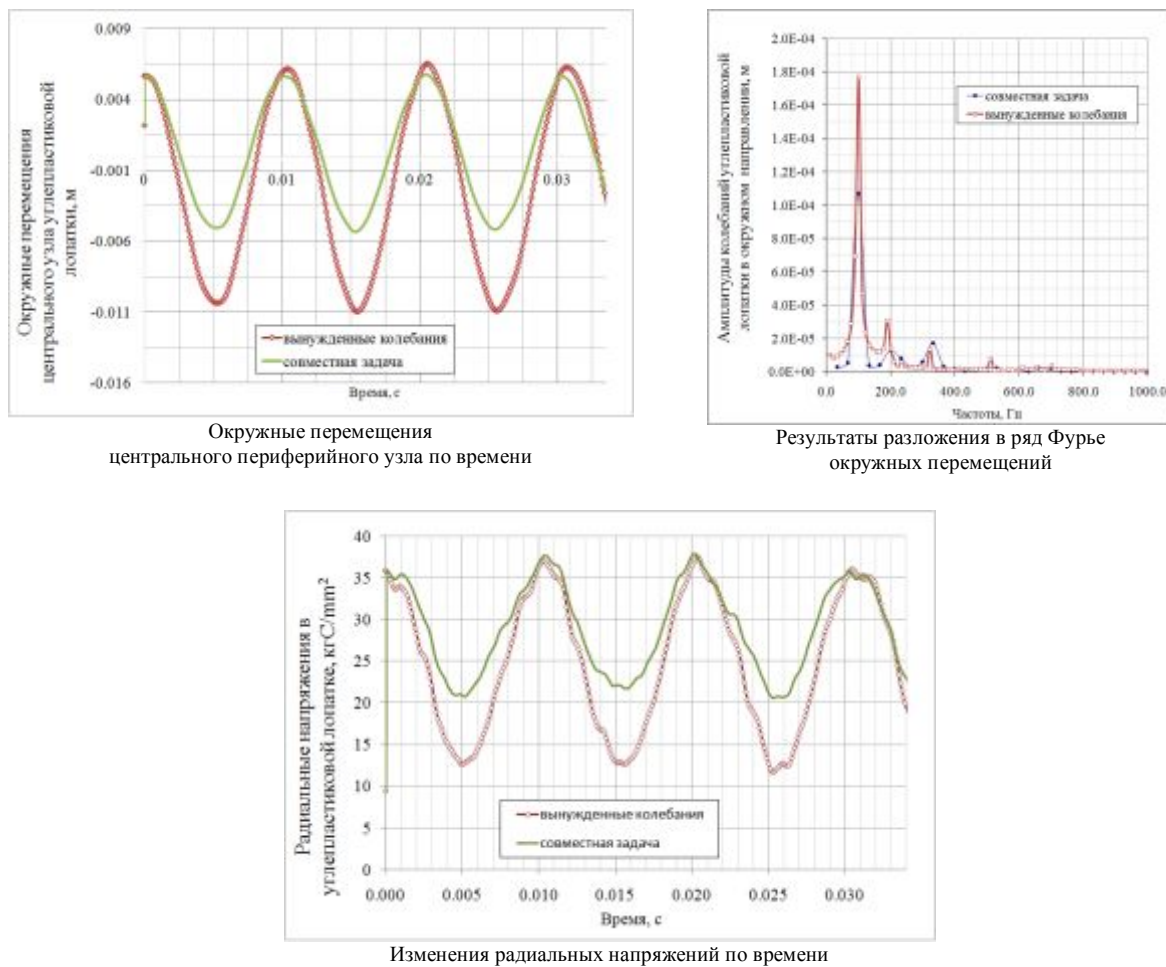


Рис. 9. Сравнение результатов решения задачи о вынужденных колебаниях и совместной задачи для углепластиковой лопатки

Анализ полученных результатов показывает, что в обеих задачах для углепластиковой лопатки самую большую амплитуду имеет частота колебаний лопатки, близкая к первой собственной частоте изолированной лопатки. Как и в случае с титановой лопаткой, полученные частоты отличаются друг от друга, но незначительно.

Выводы

1. В работе проведено исследование влияния нестационарных аэродинамических нагрузок, полученных из-за наличия воздухозаборника на режиме с сильным боковым ветром, на колебания углепластиковой лопатки РК перспективного вентилятора ТРДД с большой степенью двухконтурности. Расчёты выполнены с учётом и без учёта взаимного

влияния конструкции и потока. Результаты исследований сравниваются с результатами для титановой лопатки.

2. Результаты исследований динамического поведения лопаток РК вентилятора, изготовленных из разных материалов, показывают, что:

- углепластиковая лопатка более чувствительна к изменению газовых сил, чем титановая;
- несмотря на большие перемещения, напряжения в углепластиковой лопатке меньше, чем в титановой;
- учёт взаимного влияния титановой лопатки и потока приводит к увеличению амплитуды колебаний и, следовательно, напряжений в титановой лопатке;
- учёт взаимного влияния углепластиковой лопатки и потока приводит к уменьшению амплитуды колебаний и,

следовательно, к уменьшению напряжений в углепластиковой лопатке;

- при вынужденных колебаниях каждой из лопаток самая большая амплитуда колебаний имеет место с частотой, близкой к первой собственной частоте соответствующей изолированной лопатки;

- частоты, возбуждённые в лопатках при решении совместной задачи, отличаются от частот, полученных в задаче о вынужденных колебаниях, в сторону увеличения для титановой лопатки и в сторону небольшого уменьшения для углепластиковой.

Таким образом, совместная постановка не позволяет однозначно определить влияние изменения нестационарных газовых сил на амплитудно-частотные характеристики лопаток одинаковых конфигураций, но изготовленных из разных материалов. Поэтому выработать универсальные рекомендации по выбору способа решения задачи о колебаниях лопатки не представляется возможным. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо проводить набор вычислительных экспериментов, включающих решение задач о вынужденных колебаниях и совместных задач.

Библиографический список

1. Vahdati M., Smith N., Zhao F. Influence of intake on fan blade flutter // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, GT 2014. V. 7B. doi.org/10.1115/gt2014-25859

2. Макаров В.Е., Андреев С.П., Шорстов В.А., Буюкли Т.В. Исследование условий возникновения автоколебаний в вентиляторе ТРДД для БСМС // Основные результаты научно-технической деятельности ЦИАМ (2009-2010). М.: ФГУП ЦИАМ, 2010. С. 285-289.

3. Макаров В.Е., Андреев С.П., Шорстов В.А., Буюкли Т.В., Федорченко Ю.П., Фролов В.Н. Оценка нестационарных нагрузок на лопатки вентилятора ТРДД для БСМС при стационарной неравномерности на входе в двигатель // Основные результаты научно-технической деятельности ЦИАМ (2009-2010). М.: ФГУП ЦИАМ, 2010. С. 289-293.

4. Шорстов В.А., Буюкли Т.В., Макаров В.Е., Андреев С.П. Аэроупругость лопаток вентилятора: 3D моделирование вынужденных колебаний и расчётная оценка условий возникновения автоколебаний в квази-3D постановке // Труды XII международного семинара «Супервычис-

ления и математическое моделирование». Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. С. 113-114.

5. Tateishi A., Watanabe T., Takehiro Himeno, Chihiro Inoue. Multimode flutter analysis of transonic fan using FSI simulation // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. V. 7B. doi.org/10.1115/gt2014-26702

6. Yang H., Zheng Y. A fluid-structure coupling method for rotor blade unrunning design // Proceedings of ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. V. 7B. doi.org/10.1115/gt2013-94653

7. Gan J., Im H., Espinal D., Alexis Lefebvre, Ge-Cheng Zha. Investigation of a compressor rotor non-synchronous vibration with and without fluid-structure interaction // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. V. 7B. doi.org/10.1115/gt2014-26478

8. Александров В.Г. Справочник по авиационным материалам. М.: Транспорт, 1972. 328 с.

Информация об авторах

Буюкли Татьяна Васильевна, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела «Аэродинамика и термодинамика силовых установок», Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: buyukli@ciam.ru. Область научных интересов: колебания лопаток авиационных двигателей, аэроупругость, флаттер лопаток компрессоров.

Федорченко Юрий Павлович, начальник сектора отдела «Аэродинамика и термодинамика силовых установок», Центральный институт авиационного моторо-

строения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: y_fedor@ciam.ru. Область научных интересов: вычислительная газовая динамика, параллельные вычисления, суперкомпьютерные технологии.

Шорстов Виктор Александрович, научный сотрудник отдела «Аэродинамика и термодинамика силовых установок», Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: vit@baluttm.ru. Область научных интересов: вычислительная газовая динамика.

DYNAMIC BEHAVIOUR OF HIGH- BYPASS- RATIO TURBOFAN CARBON FIBER-REINFORCED PLASTIC BLADE UNDER UNSTEADY AIRLOADS

© 2015 T. V. Buyukli, Yu. P. Fedorchenko, V. A. Shorstov

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

The dynamic behavior of vibrating blades of an advanced high- bypass- ratio turbojet engine wide-chord fan under unsteady air loads has been researched. Unsteady air loads occur because of the flow around the impeller situated in the air inlet in the case of strong crosswind. These loads affect the blade dynamic behavior and could lead to increasing of the blade vibration amplitude and the stress in the blades. Blade dynamic behavior is investigated on the basis of 3D high-level gas-dynamic and finite-element models. The gas-dynamic model takes into account unsteady viscous 3D air flows. The strength model takes into account geometrical non-linearity and anisotropy of the composite material. The Cobra software package developed at CIAM and based on Godunov's method is used for aerodynamic research and obtaining unsteady aerodynamic loads. The ANSYS package of finite-element analysis is used to solve the mechanical problem. The paper deals with both forced vibrations of a blade under given cyclic aerodynamic loads and vibrations with account for the fluid-structure interaction (FSI) of the structure and the flow of titanium and carbon-fiber-reinforced blades. The results of investigations have been compared. The differences between the results of solving the task of forced vibrations and vibrations with FSI, as well as the differences between the results obtained for blades of the same configuration but made of different materials are presented.

Wide-chord turbojet engine fan blade, air intake, unsteady aerodynamic loads, forced vibrations, fluid-structure interaction, titanium blade, carbon-fiber-reinforced blade.

References

1. Vahdati M., Smith N., Zhao F. Influence of intake on fan blade flutter. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, GT 2014*. V. 7B. doi.org/10.1115/gt2014-25859
2. Makarov V.E., Andreev S.P., Shorstov V.A., Buyukli T.V. Issledovanie uslovii voznikoveniya avtokolebanii v ventilyatore TRDD dlya BSMS. *Osnovnye rezul'taty nauchno-tehnicheskoi deyatel'nosti CIAM (2009-2010)*. Moscow: CIAM Publ., 2010. P. 285-289. (In Russ.)
3. Makarov V.E., Shorstov V.A., Andreev S.P., Fedorchenko Y.P., Buyukli T.V., Frolov V.N. Ocenka nestacionarnykh nagruzok na lopatki ventilyatora TRDD dlya

BSMS pri stacionarnoi neravnomernosti na vhode v dvigatel'. *Osnovnye rezul'taty nauchno-tehnicheskoi deyatel'nosti CIAM (2009-2010)*. Moscow: CIAM Publ., 2010. P. 289-293. (In Russ.)

4. Makarov V.E., Shorstov V.A., Andreev S.P., Buyukli T.V. Aerouprugost' lopatok ventilyatora: 3D modelirovanie vynyudennykh kolebaniy i raschetnaya ocenka uslovii vozniknoveniya avtokolebaniy v kvazi-3D postanovke Supervychisleniya i matematicheskoe modelirovanie. *Trudy XII mejdunarodnogo seminara «Supervychisleniya i matematicheskoe modelirovanie»*. Sarov: Russian Federal Nuclear Center Publ., 2011. P. 113-114. (In Russ.)

5. Tateishi A., Watanabe T., Takehiro Himeno, Chihiro Inoue. Multimode flutter analysis of transonic fan using FSI simulation. *Proceedings of ASME Turbo Expo*

2014: Turbine Technical Conference and Exposition. V. 7B. doi.org/10.1115/gt2014-26702

6. Yang H., Zheng Y. A fluid-structure coupling method for rotor blade unrunning design. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition*. V. 7B. doi.org/10.1115/gt2013-94653

7. Gan J., Im H., Espinal D. Alexis Lefebvre, Ge-Cheng Zha. Investigation of a compressor rotor non-synchronous vibration with and without fluid-structure interaction. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition*. V. 7B. doi.org/10.1115/gt2014-26478

8. Aleksandrov V.G. *Spravochnik po aviacionnym materialam* [Reference book on aviation materials]. Moscow: Transport Publ., 1972. 328 p.

About the authors

Buyukli Tatiana Vasilyevna, Research Fellow, the Department of Power Plant Aerodynamics and Thermodynamics, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: buyukli@ciam.ru. Area of Research: aviation engine blade oscillations, aeroelasticity, compressor blade flutter.

Fedorchenko Yury Pavlovich, Head of Section, the Department of Power Plant Aerodynamics and Thermodynamics, Central Institute of Aviation Motors named after P.I.

Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: y.fedor@ciam.ru. Area of Research: computational fluid dynamics, high performance computing.

Shorstov Victor Aleksandrovich, Research Fellow, the Department of Power Plant Aerodynamics and Thermodynamics, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: vit@balutm.ru. Area of Research: computational fluid dynamics.