

УДК 629.7.036.34

А.О. ШКЛОВЕЦ, Г.М. ПОПОВ, Д.А. КОЛМАКОВА

Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ СТУПЕНИ КОМПРЕССОРА ГТД С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ В РАБОЧЕМ ЛОПАТОЧНОМ ВЕНЦЕ

В статье рассмотрены подходы к снижению переменных напряжений в лопатке компрессора, возникающих при резонансе. На основе разработанного метода расчета вынужденных колебаний лопаток, определены максимальные переменные напряжения в лопатке пятой ступени компрессора среднего давления двигателя НК36-СТ, работающей в условиях окружной неравномерности газового потока. Для снижения напряжений была создана параметрическая CFD-модель канала компрессора, позволяющая менять угол и шаг установки направляющих аппаратов за исследуемым рабочим колесом. За счет изменения этих параметров удалось снизить неравномерность потока и как следствие, уменьшить резонансные напряжения более чем в 2,5 раза.

**Ключевые слова:** двигатель, компрессор, лопатка, опора, ANSYS, CFX, вынужденные колебания, оптимизация

### Введение

В статье «К вопросу численного исследования вынужденных колебаний лопаток компрессора ГТД», Вестник двигателестроения №2, 2012, с.223-227, рассмотрена методика расчета переменных резонансных напряжений, возникающих в лопатке рабочего колеса компрессора газотурбинного двигателя при вынужденных колебаниях. Методика основана на газодинамическом расчете полноокружной модели канала компрессора в *Ansys CFX*, с последующим экспортом газовой нагрузки в *Ansys Mechanical APDL* и динамическим прочностным расчетом. Последовательность расчета динамических напряжений имеет следующий вид (рис. 1):

1. В программном комплексе *NUMECA Fine Turbo* выполняется расчет на необходимом режиме работы двигателя (взлетный режим и малый газ) секторной модели КСД НК36-СТ с входным направляющим аппаратом компрессора высокого давления (ВНА КВД), средней и промежуточной опорой двигателя. В результате данного расчета определяются радиальные эпюры полного давления, полной температуры и направление потока в сечении за рабочим колесом (РК) 4 ступени КСД;

2. Выполняется расчет «полноокружной» модели в программном комплексе *Ansys CFX*, состоящей из лопаточных венцов четвертого направляющего аппарата (4 НА), 5 РК, 5 НА КСД, промежуточной опоры и ВНА КВД с граничными условиями, полученными при расчете

секторной модели КСД. В результате данного расчета определяется газодинамическая нагрузка, действующая на лопатки 5 РК КСД;

3. В программном комплексе *Ansys Mechanical* выполняется расчет собственных частот лопатки 5 РК, на основе которого происходит построение резонансной диаграммы РК и определяются частоты вращения ротора КСД, на которых может возникнуть резонанс;

4. Используя возможности объектно-ориентированного языка программирования *APDL*, встроенного в *Ansys*, газовая нагрузка представляется в виде совокупности назад бегущих волн нагрузки (гармонических волн) и определяется гармоника с наибольшей амплитудой. Делается перерасчет газовой нагрузки на режиме резонанса с наиболее опасной гармоникой;

5. Проводится динамический расчет на резонансном режиме работы при резонансе с наиболее опасной гармоникой. Демпфирование материала задается на основе экспериментальных данных. Схема КСД и постановка задачи представлена на рис. 2.

### 1. Мероприятия по снижению переменных напряжений в лопатке

В качестве мероприятий по снижению уровня резонансных напряжений были выбраны следующие направления:

- использование в последнем рабочем колесе (РК) лопаток со спецпрофилем Шварова;

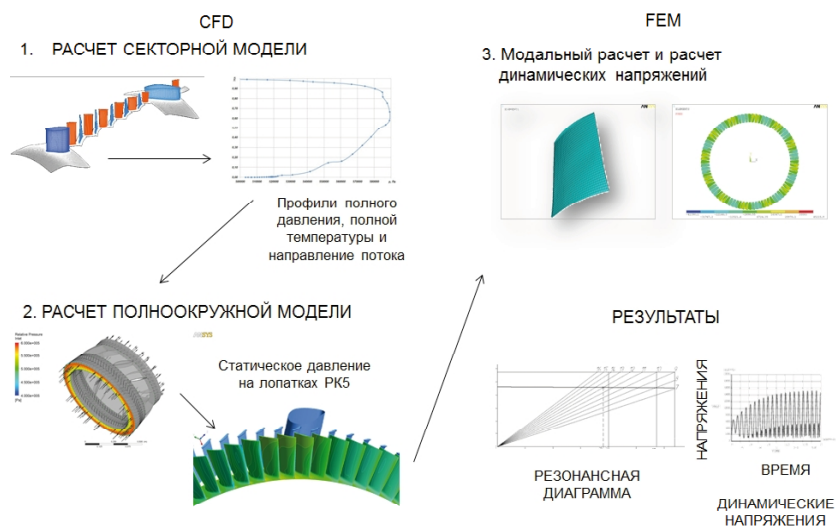


Рис. 1. Схема методики расчета вынужденных колебаний лопаток РК компрессора

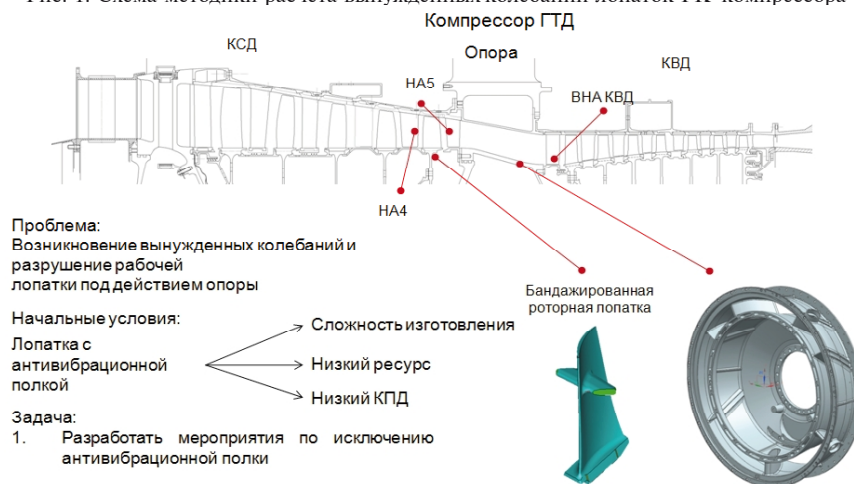


Рис. 2. Схема компрессора среднего давления НК36-СТ

– применении направляющего аппарата (НА), находящегося перед опорой, с лопатками, установленными под разными углами (разноугловица) и с переменным по окружности шагом (разношаговица).

Также особое внимание уделялось тому факту, что количество лопаток 5 НА, которые имеет угол установки отличный от штатного, должно быть как можно меньше. Для введения разноугловицы и разношаговицы лопаток 5 НА была выполнена параметризация полноо́кружной модели компрессора.

На первом этапе создания параметрической модели стойки опоры и лопатки 5 НА ступени были разделены на группы. Для этого была выполнена развертка лопаточного венца в окружном направлении. При введении разноугловицы и разношаговицы лопаток 5 НА ступени КСД было принято допущение о том,

что для нескольких групп лопаток будут задаваться одинаковые параметры по разноугловице и разношаговице. При введении разноугловицы ключевым фактором являлось минимальное количество изменяемых лопаток, поскольку изготовление большого количества лопаток разной геометрии сильно увеличивают затраты на производство. Количество изменяемых лопаток в группе задавалось числом в скобках (табл. 1). При этом, данное число всегда было кратно 2.

Затем определялся максимальный угол поворота лопаток в пределах объединенных групп. Для лопаток 5 НА, расположенных в плоскости симметрии стойки, у первой и последней лопатки в группе угол установки не изменялся. Изменение углов установки лопаток в пределах групп проводилось по линейному закону. Лопатки, расположенные по разные стороны от плоскости симметрии стойки, поворачиваются

в противоположные направления, относительно исходного положения (рис. 3). Лопатки, расположенные ближе к стойке, поворачиваются на больший угол. Если лопатка поворачивалась на закрытие (увеличение угла установки) перед углом стоит знак «+», если на открытие – знак «-».

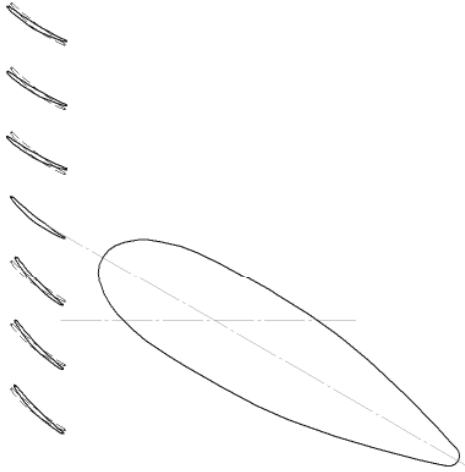


Рис. 3. Схема поворота лопаток НА

В случае изменения шага, количество изменяемых лопаток не ограничивалось. Разношаговница устанавливалась в пределах  $-0,35...+0,35$  от шага. Знак «-» означает, что в районе стойки шаг между лопатками уменьшался, а знак «+» - что

шаг увеличивался. Число обозначает максимальное увеличение (уменьшение) шага между лопатками в группе в относительных величинах от штатного шага при равномерно расположении лопаток. При введении разношаговницы в группах положение крайних лопаток групп не изменялось. Закон изменения шага также являлся линейным. Таким образом, была создана универсальная параметрическая модель, позволяющая вводить разноугловость и разношаговость НА пятой ступени КСД НК-36СТ.

**2. Оптимизационные расчеты динамических напряжений пятой рабочей лопатки КСД**

С использованием параметрической модели были выполнены расчеты динамических напряжений для 11 вариантов пятой ступени КСД. Во всех вариантах в качестве рабочей лопатки пятой ступени КСД использовалась лопатка со спецпрофилем Шварова. Варианты отличались между собой величинами параметров разноугловицы и разношаговницы 5 НА ступени КСД. При этом первый вариант соответствовал штатному исполнению НА.

Результаты расчетов динамических напряжений, возникающих при резонансе с наиболее сильной 12-й гармоникой, параметры каждого из вариантов, а также суммарное количество изменяемых лопаток 5 НА ступени КСД приведены в табл. 1.

**Таблица 1** – Результаты расчета параметрической модели КСД

Номер варианта	Параметр разноугловости, максимальный угол поворота (число лопаток) для групп			Параметр разношаговности для групп:					Число изменяемых лопаток 5 НА	Напряжения, МПа
	2, 5, 6	1, 3, 7	4 (3)	1, 7	2, 6	3	4	5		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	86.7
2	0	0	0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0	115.98
3	3 (6)	3 (6)	3 (8)	0	0	0	0	0	42	43.791
4	3 (6)	3 (6)	3 (8)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	42	31.877
5	3 (6)	6 (6)	9 (8)	0	0	0	0	0	42	37.536
6	0	0	0	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0	86.95
7	0	0	0	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	0	105.94
8	0	0	0	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	0	137.741
9	6 (2)	6 (2)	6 (2)	0	0	0	0	0	14	46.737
10	0	6 (2)	6 (2)	0	0	0	0	0	8	57.214
11	6 (2)	6 (2)	6 (4)	0	0	0	0	0	16	44.426

Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что при применении профиля Шварова на рабочей лопатке и введении разноугловицы для лопаток НА пятой ступени КСД НКЗ6-СТ достигнуто значительное снижение уровня динамических напряжений, возникающих в лопатке РК той же ступени КСД при резонансе с 12-й гармоникой.

Так при применении лопатки 5 РК ступени со спецпрофилем Шварова и штатного 5 НА КСД уровень динамических напряжений при резонансе с 12-й гармоникой составляет 86,7 МПа. А при применении 5 РК со спецпрофилем Шварова и 5 НА КСД с разноугловицей и разношаговицей (вариант №4 в таблице 1, 42 изменяемых лопатки 5 НА) уровень динамических напряжений при резонансе с 12-й гармоникой составляет 31,9 МПа (снижено в 2,7 раз). В то же время, использование 5 РК со спецпрофилем Шварова и 5 НА КСД с разноугловицей (вариант №9 в таблице 1, всего 14 изменяемых лопаток 5 НА

КСД) уровень динамических напряжений незначительно больше, чем в варианте №4 и составляет 46,7 МПа (снижено в 1,85 раз).

### 3. Анализ газодинамического расчета для оптимального варианта расположения лопаток 5 НА

На рис. 4 приведены графики изменения относительного статического давления (отношение статического давления к среднему давлению на данном диаметре) в сечении за 5 РК на среднем диаметре на режиме малого газа для базового варианта компрессора и варианта №4. На данных графиках базовый вариант показан голубым цветом, а модернизированный (вариант №4) – красным. Выделены отдельные пики давления, соответствующие стойкам опоры и участкам вблизи них. Необходимо отметить, что характер окружной неравномерности не зависит от режима работы компрессора и полностью определяется геометрией стоек опоры.

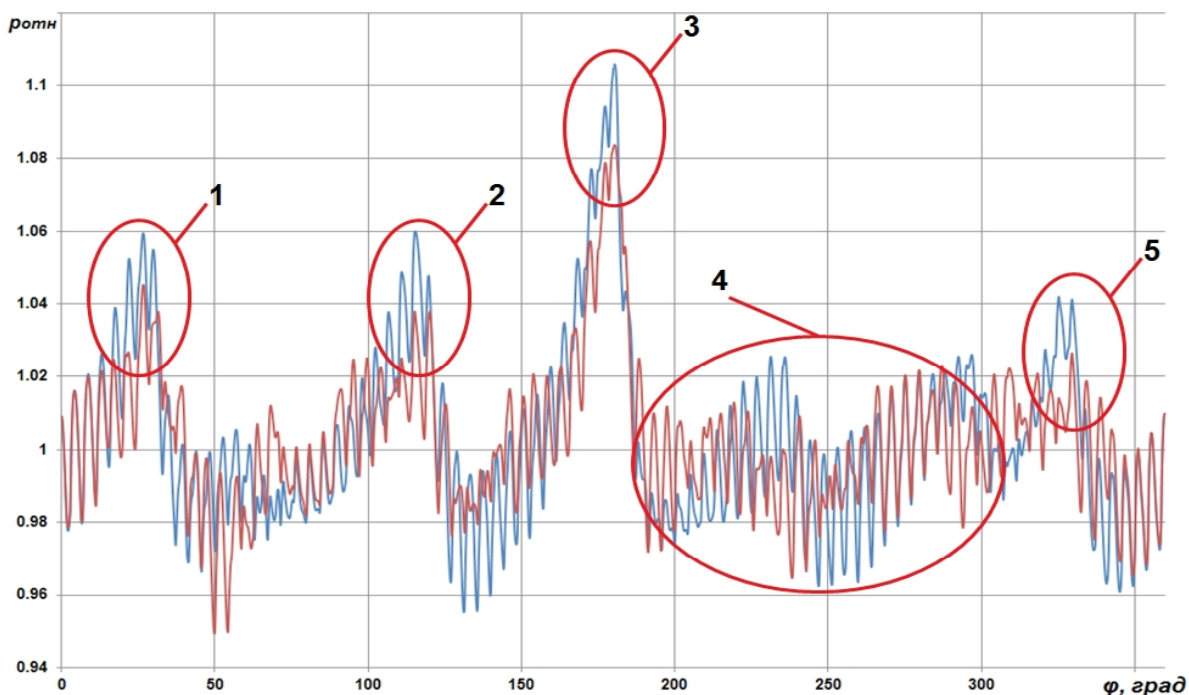


Рис. 4. Графики изменения относительного статического давления базового (голубой цвет) и модернизированного (красный цвет) варианта

На рис. 5 представлено сравнение полей распределения статического давления в сечении 50% по высоте проточной части для базового варианта и для варианта №4 (табл. 1) на участке 1. На рис. 6 аналогичное сравнение для чисел Маха потока.

Как видно из представленных графиков и полей распределения статического давления,

для участков 1, 3 и 5 наблюдается снижение пиков статического давления в модернизированных вариантах (№4 и №9) по сравнению с базовым вариантом компрессора. Кроме того, для всех характерных областей достигается более периодичное и равномерное поле потока.



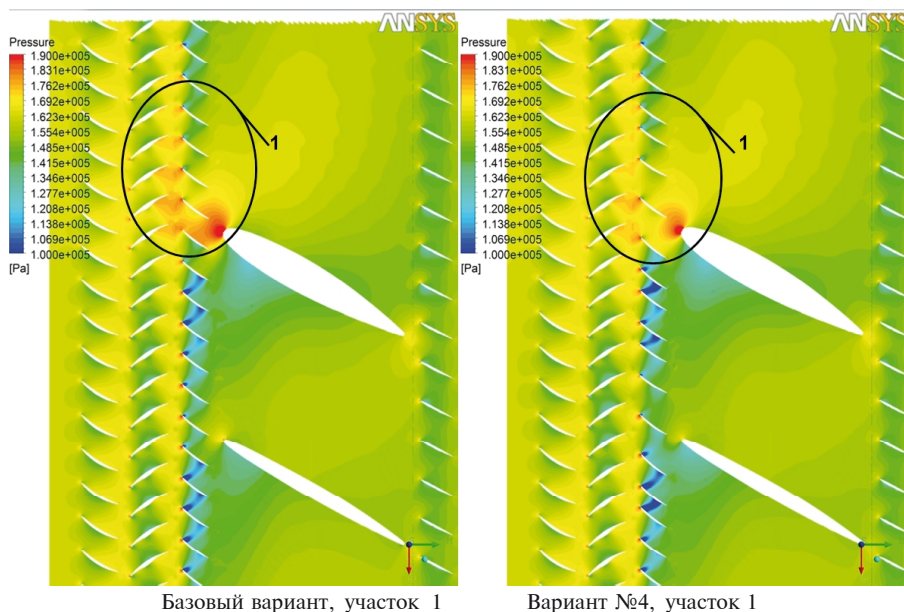


Рис. 5. Поля статического давления вблизи стоек опор первого участка

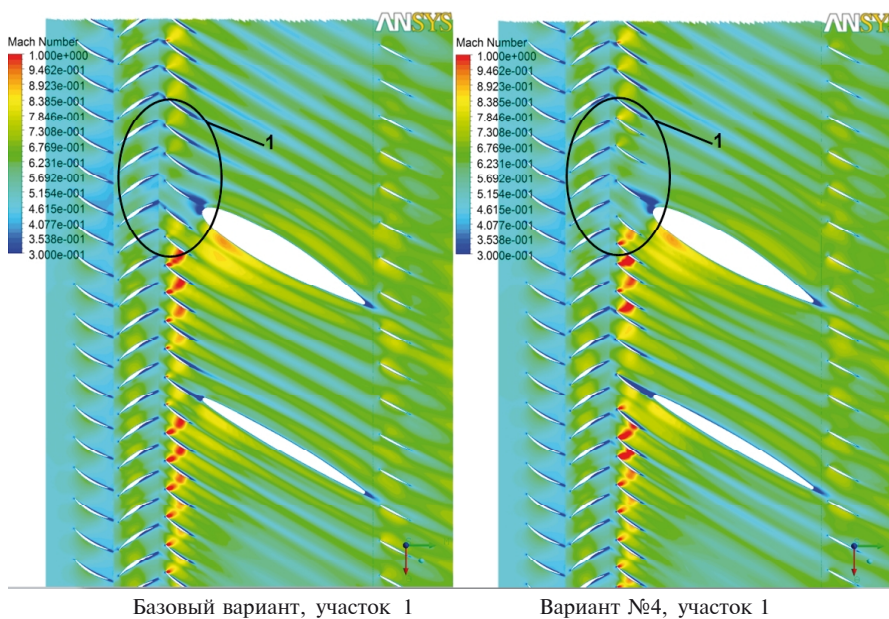


Рис. 6. Поля чисел Маха вблизи стоек опор первого участка

**Выводы**

Таким образом, в результате проведенной работы достигнуты следующие основные результаты:

1. Достигнуто значительное снижение уровня динамических напряжений, возникающих в лопатке 5 РК КСД при резонансе с 12-й гармоникой. А именно, динамические напряжения снижены в 2 раза по сравнению с лопаткой 5 РК с профилем Шварова и штатным 5 НА КСД.

2. Установлено, что введение разноугловицы и разношаговицы 5 НА позволяет «сгладить» окружающую неравномерность потока в сечении за 5 РК КСД.

3. Предложены различные варианты снижения напряжений в лопатке рабочего колеса, учитывающие технологические ограничения на изготовление направляющих аппаратов ступени.

**Литература**

1. Иванов В.П. Колебания рабочих колес турбомашин [Текст]/ В.П. Иванов. – М.: Машиностроение, 1983. – С.138-156.
2. Бойко А.В. Аэродинамический расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин [Текст]/А.В. Бойко, Ю.И. Говорущенко, С.В. Ершов.– Х.: НТУ «ХПИ», 2002.– 341 С.
3. Шкловец А.О. К вопросу численного исследования вынужденных колебаний лопаток компрессора ГТД [Текст]/ А.О. Шкловец, Г.М. Попов, Д.А. Колмакова // Вестник двигателестроения. – 2012. – №2. – С.223-227.
4. Иноземцев А.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок [Текст]: учеб. для ВУЗов: в 5 т./ А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий.– М.: Машиностроение, 2008.– Т.5.– С.136-140.

*Поступила в редакцию 01.06.2013*

**О.О. Шкловец, Г.М. Попов, Д.О. Колмакова. Оптимізація проточної частини ступеня компресора ГТД з метою забезпечення динамічної міцності в робочому лопатковому вінці**

*У статті розглянуто підходи до зниження змінних напружень в лопатці компресора, що виникають при резонансі. На основі розробленого методу розрахунку вимушених коливань лопаток визначено максимальні змінні напруги в лопатці п'ятого ступеня компресора середнього тиску двигуна НК36-СТ, що працює в умовах колової нерівномірності газового потоку. Для зниження напружень було створено параметричну CFD-модель каналу компресора, що дозволяє змінювати кут і крок установки напрямних апаратів за 5 РК. За рахунок зміни цих параметрів вдалося знизити нерівномірність потоку і, як наслідок, зменшити резонансні напруги більш ніж в 2,5 рази.*

**Ключові слова:** *двигун, компресор, лопатка, опора, ANSYS, CFX, вимушені коливання, оптимізація.*

**A.O. Shklovets, G.M. Popov, D.A. Kolmakova. Optimization of the compressor stage blading of gas turbine engine to ensure the dynamic strength in rotor blade row**

*The approaches to reducing the alternating stresses in the compressor blade, arising at a resonance are discussed in paper. Maximum alternating stresses in blade of the fifth NK36-ST engine medium pressure compressor stage, that operating in under the gas flow circumferential variation conditions, are defined on the basis of the calculation of forced blade oscillations method. Parametric CFD-model of the compressor duct that allows to change the stagger angle and pitch of guide vanes for fifth rotor blade was created to reduce the stress. The flow circumferential variation was reduced by changing these parameters and as a consequence the resonant stresses were decreased by more than 2.5 times.*

**Key words:** *Gas turbine engine, compressor, blade, support, ANSYS, CFX, forced oscillations, optimization.*