

УДК 621.431.75

СНИЖЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЗОНАНСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЛОПАТКАХ РАБОЧИХ КОЛЁС В ПОСЛЕДНЕЙ СТУПЕНИ КСД

© 2012 А. О. Шкловец, М. Н. Сеньчев, П. Т. Джигбиллов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В статье рассматриваются методы расчёта резонансных напряжений в лопатках компрессоров, вызванных окружной неравномерностью потока. Показаны подходы к снижению данных напряжений за счёт установки лопаток направляющего аппарата под разными углами и применения профиля Шварова.

Колебания, гармоники, окружная неравномерность.

Одной из основных целей внедрения программ численного моделирования в процесс проектирования и доводки ГТД является снижение потребного количества испытаний и, как следствие, сокращение времени проектирования и доводки изделия. В целом в мировой практике отмечено, что использование численных методов позволяет более чем на порядок снизить затраты на доводку авиационного газотурбинного двигателя.

В данной работе приводятся результаты газодинамических и прочностных исследований по снижению уровня резонансных напряжений в лопатке пятого рабочего колеса (РК) компрессора среднего давления (КСД), вызванных окружной неравномерностью потока из-за наличия в тракте ГТД промежуточной опоры. На рис. 1 представлена схема проточной части исследуемого компрессора.

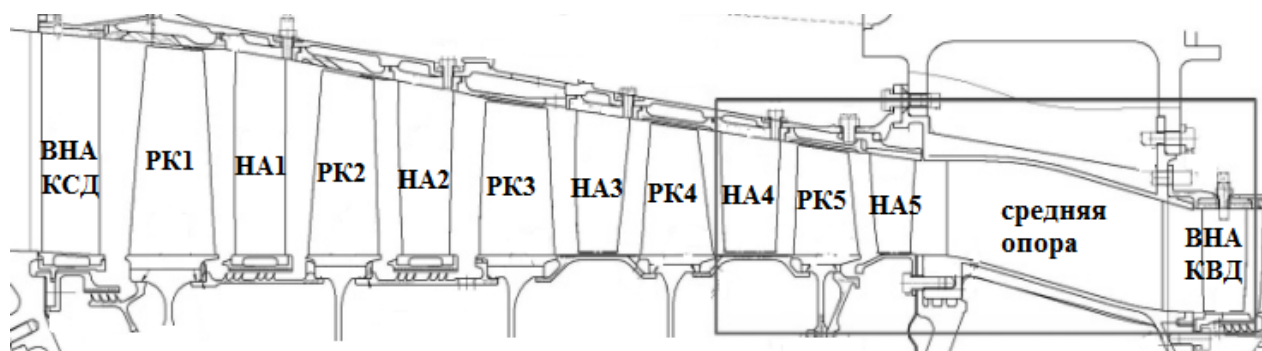


Рис. 1. Схема проточной части исследуемого компрессора

Стойки промежуточной опоры двигателя, располагающиеся за направляющим аппаратом пятой ступени (НА5), имеют разную толщину и распределены с разным угловым смещением относительно друг друга. Из-за сильной неравномерности потока в окружном направлении рабочие лопатки пятой ступени исследуемого компрессора выполнены с антивибрационной полкой.

Для определения наиболее неблагоприятных, с точки зрения неравномерности потока, условий работы компрессора была проведена серия расчётов на основных режимах двигателя: взлётном, крейсерском и малом газе. Для определения распределения пара-

метров потока в последнем рабочем колесе РК5 было решено осуществить моделирование течения воздуха в полноразмерных лопаточных венцах направляющего аппарата четвёртой ступени НА4, РК5, направляющего аппарата пятой ступени НА5, в проточной части средней опоры и входном направляющем аппарате (ВНА) компрессора высокого давления (КВД). Данные венцы выделены на рис. 1. По причине того, что эти лопаточные венцы работают в составе всего компрессора газогенератора, граничные условия для данной полноразмерной модели было решено определять из расчёта секторной модели, которая включала в себя КСД, среднюю опору

и ВНА КВД.

Расчётные сеточные модели создавались в сеткогенераторе Numeca AutoGrid 5. При создании секторной сеточной модели учитывались галтели лопаток и радиальные

зазоры. Средняя опора моделировалась с равномерно распределёнными стойками средней толщины. Рабочая лопатка пятой ступени моделировалась без антивибрационной полки.

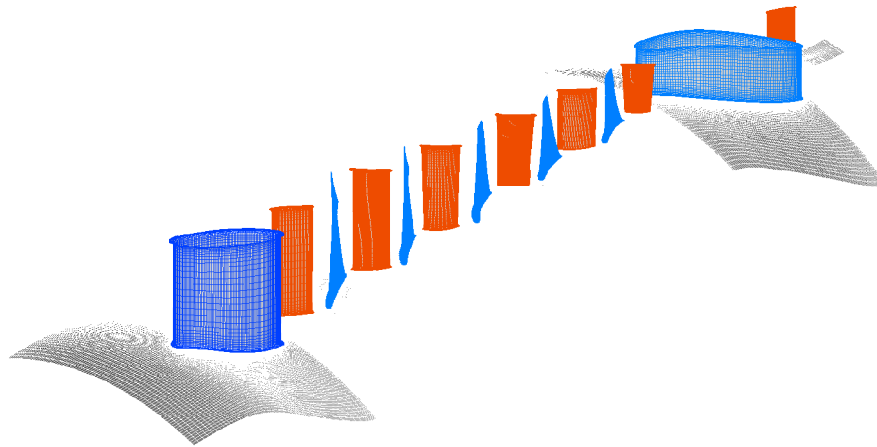


Рис. 2. Расчётная сетка секторной модели

При построении сетки количество элементов по высоте лопаток варьировалось от 57 (короткие лопатки последних ступеней) до 69. Размер элемента, ближайшего к стенке, подбирался таким образом, чтобы обеспечить значение безразмерного параметра y^+ на уровне 1. Среднее количество элементов на лопаточный венец в секторной модели составило 500 тысяч. Общий размер расчётной сетки равен 7,6 миллионов элементов.

Расчёт секторной модели осуществлялся в программном комплексе NUMECA FineTurbo. При расчётах в качестве рабочего тела использовалась модель идеального газа со свойствами сухого воздуха. При этом теплоёмкость и вязкость задавались в полиномиальной зависимости от температуры воздуха. В расчётах в соответствии с рекомендациями [1] была использована низкорейнольдсовая модель турбулентности $k-\epsilon$ Low Re Yang – Shih. Для передачи параметров между венцами использовался интерфейс Full Non Matching Mixing Plane с осреднением параметров потока в окружном направлении. Для моделирования условий определённого режима использовалась соответствующая частота вращения ротора, на входе задавались значения полного давления и температуры, а также угол потока, соответствующие рассматриваемому режиму.

На выходе из расчётной модели задавалось статическое давление таким образом, чтобы степень повышения давления соответ-

ствовала расчётному значению на данном режиме. В результате расчёта секторной модели были определены радиальные эпюры полного давления, полной температуры и угла потока в сечении перед НА4 для каждого из рассмотренных режимов работы компрессора. Далее полученные данные служили граничными условиями для расчёта полноразмерной модели. Расчётная сетка создавалась также в программном комплексе Numeca AutoGrid 5. Количество элементов на один межлопаточный канал было приблизительно равно 75 тысячам. Количество элементов сетки средней опоры составило порядка 4 миллионов. Суммарный размер сетки расчётной модели (рис.3) был равен примерно 40 миллионам элементов. Расчёт данной модели выполнялся в программном комплексе ANSYS CFX в стационарной постановке. В данной модели для передачи параметров между венцами использовался интерфейс Frozen Rotor. Выбор данного интерфейса был обусловлен тем, что в процессе его работы не происходит осреднения параметров потока. Расчёты проводились с помощью модели турбулентности $k-\epsilon$.

В качестве рабочего тела при моделировании использовался идеальный газ со свойствами сухого воздуха, теплоёмкость и вязкость которого зависели от температуры воздуха.

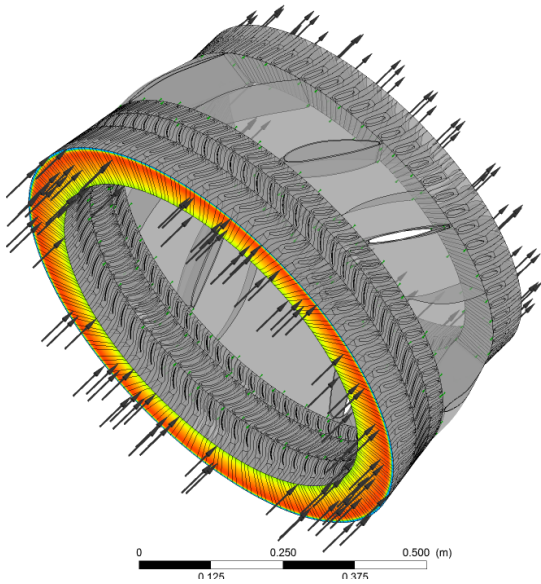


Рис. 3. Вид полноразмерной расчётной модели для определения окружной неравномерности потока

В качестве граничных условий на входе в компрессор задавались распределения полного давления, полной температуры и углов потока на входе. На выходе из расчётной модели задавалось статическое давление. Следует отметить, что граничные условия соответствовали выбранному режиму работы и брались из результатов расчёта секторной модели компрессора.

Расчёт данной модели выполнялся на суперкомпьютере СГАУ «Сергей Королёв». В результате расчёта данной модели были определены газодинамические нагрузки, действующие на все лопатки РК5. Газодинамические нагрузки представляют собой поля

статического давления, действующие на поверхность каждой лопатки. По результатам расчёта были построены графики изменения статического давления в окружном направлении на среднем диаметре в сечении за РК5 компрессора для трёх режимов (взлётный, крейсерский и малый газ). В дальнейшем они были представлены для каждого режима работы в относительном виде. Для этого значения статического давления в окружном направлении были отнесены к среднему давлению в сечении за РК5 для соответствующего режима. Графики изменения относительного статического давления в сечении за РК5 в зависимости от угловой координаты φ приведены на рис. 4.

На нём четко выделяются 7 скачков давления, которые соответствуют стойкам средней опоры, причём самый большой пик располагается напротив самой толстой стойки ($\varphi=180^\circ$).

Необходимо также отметить, что характер окружной неравномерности не зависит от режима работы компрессора и чётко связан с геометрией опоры. Это наглядно видно из рис. 4: графики относительного статического давления для различных режимов работы двигателя «накладываются» друг на друга. Количественно максимальная окружная неравномерность (разница между самым высоким пиком и самой глубокой впадиной на графиках) достигает 18% перед самой толстой стойкой опоры ($\varphi=180^\circ$).

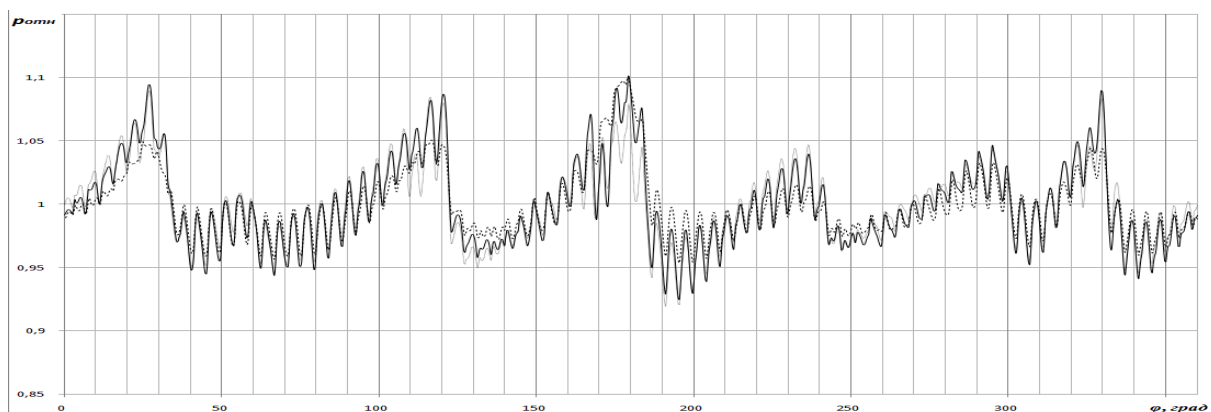


Рис. 4. Изменение относительного статического давления в сечении за РК5 на среднем диаметре: — взлётный режим; - крейсерский режим; - - - малый газ

Уровень резонансных напряжений в исходной конструкции лопатки РК5 определялся в программном комплексе

Ansys Mechanical. Для этого была создана конечно-элементная модель РК (рис. 5) с упорядоченной сеткой, состоящей из 8

узловых конечных элементов для значительного сокращения времени расчёта. В расчётной модели были учтены все особенности конструкции, в том числе галтельный переход пера лопатки в хвостовик.

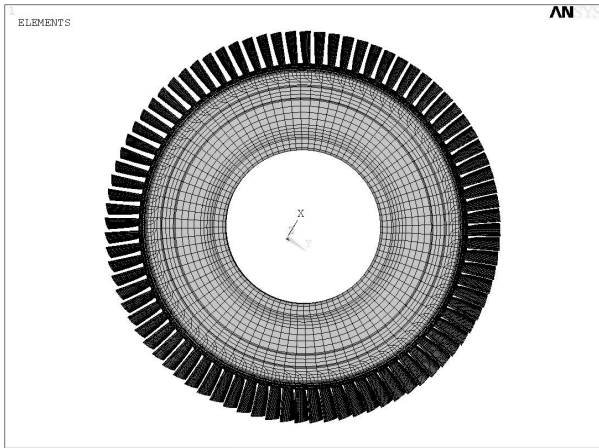


Рис. 5. Конечно-элементная модель РК5

Газовая нагрузка по лопаткам импортировалась из CFD расчёта в Ansys Mechanical, а затем интерполировалась по всем лопаткам РК5. Затем нагрузка раскладывалась в ряд Фурье с целью определения амплитуд возбуждающих гармоник и дальнейшего нагружения модели только гармониками, имеющими максимальную амплитуду. Для вращающегося РК5 возбуждающая гармоника представляет собой цепь назад бегущих волн. Стационарная неоднородность газового потока эквивалентна воздействию совокупности возбуждающих гармоник, совершающих гармонические колебания во времени.

Для определения наиболее опасных режимов работы РК5 в программном комплексе Ansys Mechanical с помощью модального анализа была построена резонансная диаграмма (рис. 6).

Анализ резонансной диаграммы и разложение в ряд Фурье газовой нагрузки показали, что наиболее опасными являются 8-я и 12-я гармоники. Поэтому расчёт напряжений в лопатке вёлся на двух режимах работы: резонансных с 12-й гармоникой и с 8-й гармоникой. В первом случае максимальные эквивалентные напряжения для базового варианта лопатки составили 152,91 МПа, во втором - 121 МПа.

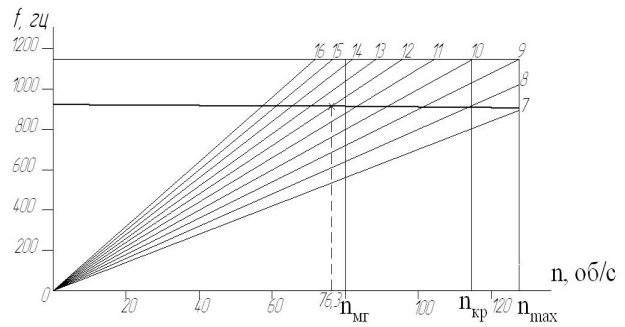


Рис. 6. Резонансная диаграмма РК5

Данный уровень резонансных напряжений является недопустимо высоким, поэтому были рассмотрены различные конструктивные решения по снижению вибрационных напряжений в РК5.

Для увеличения прочностных характеристик лопаток РК5 было принято решение применить профиль Шварова. Аналогично исходной конструкции были проведены газодинамические и прочностные исследования лопатки РК5 с профилем Шварова. На рис. 7 приведено распределение давления по лопаткам с профилем Шварова, а на рис. 8 – КЭ модель данной лопатки.

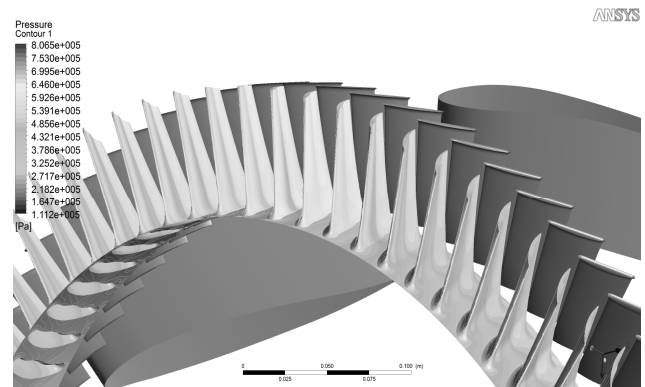


Рис. 7. Распределение давления по лопаткам с профилем Шварова (4 НА условно не показан)

Для лопатки с профилем Шварова максимальные переменные напряжения при резонансе с 12-й гармоникой составили 110,2 МПа [3].

Было рассмотрено конструктивное решение по снижению окружной неравномерности потока. Поскольку опора является сложным техническим узлом и изменение её конструкции приведёт к значительной переделке всего двигателя, для снижения окружной неравномерности потока был выбран путь изменения конструкции НА5.

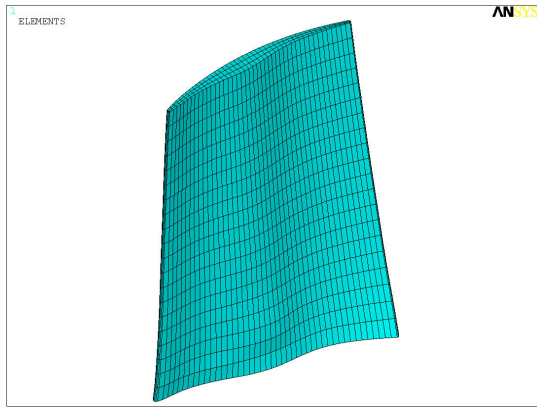


Рис. 8. Конечно-элементная модель лопатки с профилем Шварова

В работе [2] показано, что равномерная решётка профилей, установленная перед плохообтекаемым телом, переносит возмущения вверх по потоку, значительно усиливая их по сравнению с возмущениями, вызванными этим телом при отсутствии решётки. Расположение перед плохообтекаемым телом лопаток под различным углом установки может значительно снизить неравномерность потока, в том числе в области течения перед лопаточным венцом. В этой связи было решено расположить лопатки НА5 перед стойками опоры с различными углами установки. Для этого все лопатки НА5 были разделены на 7 групп. Для разделения лопаток по группам была выполнена развёртка стоек опоры и лопаток НА5 в окружном направлении с жёсткой привязкой друг к другу. Изменение угла установки в пределах каждой группы схематично продемонстрировано на рис. 9. Лопатки, расположенные по разные стороны от плоскости симметрии стойки, поворачивались в противоположные направления относительно исходного положения (показано пунктиром). При этом лопатки, расположенные ближе к стойке, поворачивались на больший угол, а расположенные дальше от стойки - на меньший угол. Следует отметить, что если лопатка НА располагалась в плоскости симметрии стойки, угол её установки не менялся. На данном этапе работы изменение углов установки лопаток в пределах групп было осуществлено по линейному закону. Было рассмотрено два варианта линейных законов, которые отличались один от другого лишь максимальными углами поворота лопаток.

Каждый линейный закон характеризу-

ется максимальным изменением угла установки внутри своей группы. Для первого закона максимальный угол составлял 6° , а для второго - 9° .

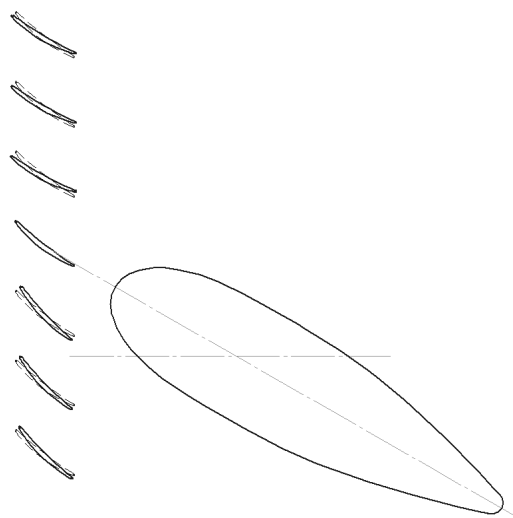


Рис. 9. Схема разворота лопаток в пределах одной группы

Для создания сеток для каждого из законов была построена параметрическая модель, позволяющая при введении максимального угла поворота лопатки автоматически определять угол поворота остальных лопаток группы. Перестроение сетки и создание полноразмерной расчётной модели, аналогичной описанной выше, также происходило автоматически. Таким образом, было создано две расчётные полноразмерные модели, соответствующие двум линейным законам изменения углов установки лопаток НА5.

При определении граничных условий новых расчётных моделей вводилось допущение о том, что изменение углов установки лопаток незначительно повлияет на интегральное распределение параметров между лопаточными венцами. Поскольку ранее было показано, что окружная неравномерность зависит только от конфигурации опоры, для оценки влияния изменения углов установки лопаток на неравномерность потока был произведён расчёт только на взлётном режиме работы двигателя. Технология расчёта полноразмерной модели ничем не отличалась от описанной выше. Для количественной и качественной оценки влияния изменения углов установки лопаток на окружную неравномерность потока были построены графики изменения относительного статиче-

ского давления в сечении за РК5 на среднем диаметре в зависимости от угловой координаты φ (рис. 10). Анализ графиков показывает, что разность давлений на выходе из РК5

при прохождении мимо каждой стойки уменьшилась до 11...12% при первом законе и до 7...12% при втором законе изменения углов установки лопаток НА5.

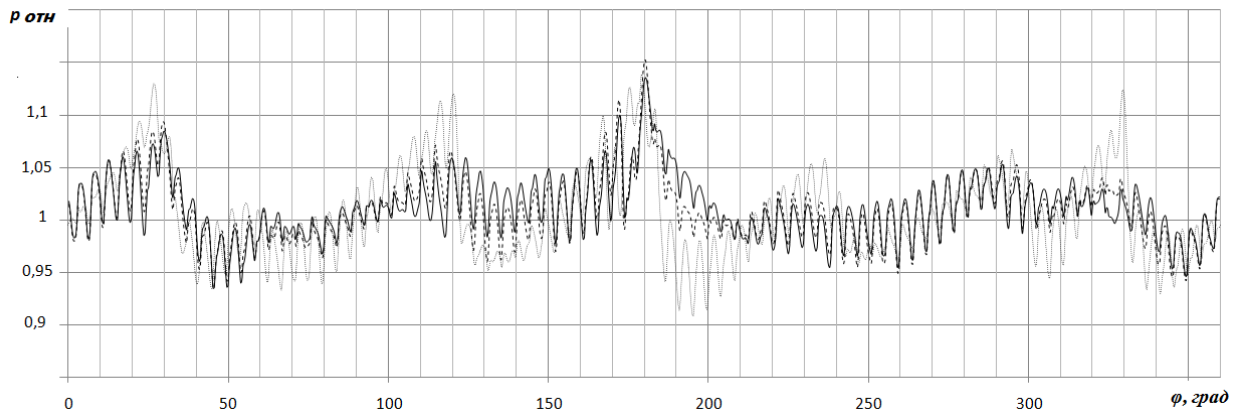


Рис. 10. Изменение относительного статического давления в сечении за РК5 на среднем диаметре на взлётном режиме:

- - исходная форма НА5;
- - - - - первый закон изменения углов установки лопаток НА5;
- - второй закон изменения углов установки лопаток НА5

Следует также отметить практически полное устранение на графике относительного давления "впадины" в области $\varphi=190^{\circ}$ (в районе самой толстой стойки опоры). Относительное давление здесь увеличилось примерно на 7...8%, что позволило снизить перепад давлений на лопатках РК5 при прохождении мимо этой стойки в 1.5 раза.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что за счёт изменения углов установки лопаток НА5 удалось существенно изменить характер неравномерности потока в РК5,

снизить разность давлений на рабочей лопатке при её прохождении мимо каждой стойки опоры.

Проведённые прочностные исследования показали, что максимальные эквивалентные напряжения для первого закона изменения углов установки НА5 составили 87,647 МПа, для второго закона - 78,742 МПа. В табл. 1 представлен результат прочностного расчёта РК5 при резонансе с наиболее опасной 12-й гармоникой для четырёх вариантов исполнения КСД.

Таблица 1. Результаты прочностных расчётов

Виды напряжений	Вариант расчета			
	Исходная лопатка	Профиль Шварова	Разноугловица 1 (исходная лопатка)	Разноугловица 2 (исходная лопатка)
Эквивалентные напряжения, МПа	152,91	110,24	87,647	78,742

Таким образом, только за счёт изменения углов установки лопаток НА5 удалось снизить переменные напряжения в лопатке РК5 практически в 2 раза.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

Библиографический список

1. Матвеев, В.Н. Оценка адекватности

электронной модели потока и КПД - характеристики центробежного микротурбинного привода [Текст] / В.Н. Матвеев, Л.С. Шаблий // Вестн. СГАУ. – Самара, 2011. – №2 (26). Ч. 2. – С. 41-47.

2. Сарен, В.Э. Обтекание неравномерной решётки пластин, расположенной перед цилиндром [Текст]: технический отчёт / В.Э. Сарен. – М: ЦИАМ, 1984. – 36 с.

3. Шкловец А.О. Расчёт вынужденных колебаний лопаток рабочего колеса компрессора авиационного газотурбинного дви-

гателя, возникающих от действия окружной // Изв. Самар. научн. центра Российской ака-
неоднородности газового потока [Текст] / демии наук. – 2012. Т. 14.- №1(2). - С.517-
А.О. Шкловец, Г.М. Попов, Д.А. Колмакова 520.

REDUCTION OF VARIABLE RESONANCE STRESSES IN THE LAST STAGE OF MEDIUM PRESSURE COMPRESSOR

© 2012 A. O. Shklovets, M. N. Sen'chev, P. T. Dzhibilov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

This paper deals with methods for calculating the resonant stresses in compressor blades caused by flow circumferential nonuniformity with modern programs of numerical simulation. Also shown are the approaches to reducing these stresses through the installation guide blades at different angles and profile of Shvarov application.

Fluctuations, harmonics, circumferential nonuniformity.

Информация об авторах

Шкловец Александр Олегович, младший научный сотрудник, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: SSAU_Shklovets@mail.ru. Область научных интересов: динамика и прочность в лопаточных машинах, анализ конструкций методом конечных элементов.

Сеньчев Максим Николаевич, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: rider_max@mail.ru. Область научных интересов: рабочие процессы в лопаточных машинах, вычислительная газовая динамика, рабочие процессы ВРД.

Джибилов Павел Тимурович, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет). E-mail: grishatty@mail.ru. Область научных интересов: рабочие процессы в лопаточных машинах, вычислительная газовая динамика, рабочие процессы ВРД.

Shklovets Alexander Olegovich, junior research assistant of industrial research laboratory №1, Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: SSAU_Shklovets@mail.ru. Area of research: dynamics and strength in blade machines, analysis of structures using FEM.

Sen'chev Maxim Nikolaevich, magistrand, Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: rider_max@mail.ru. Area of research: workflows in turbomachines, computational fluid dynamics, work processes of the jet engines.

Dzhibilov Pavel Timurovich, magistrand, Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: grishatty@mail.ru. Area of research: workflows in turbomachines, computational fluid dynamics, work processes of the jet engines.