

УДК 629.7.035.2/3

С.С. КАРНАУХОВА

ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн», Рыбинск, Россия

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДОПУСКОВ В ГЕОМЕТРИИ ЛОПАТОК НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОНАПОРНОГО ШИРОКОХОРДНОГО ВЕНТИЛЯТОРА ГТД

В данной статье рассматривается методология доводки при помощи математического моделирования и проведении численной оценки. Представлены результаты работы по оценке влияния геометрических отклонений на характеристики высоконапорного широкохордного вентилятора. Выполнена численная оценка влияния геометрических отклонений в пределах конструкторских допусков при изготовлении лопаток на аэродинамические характеристики вентилятора. Расчеты выполнены в программном комплексе вычислительной газовой динамики CFX-TASCflow версия 02.12.02.

**Ключевые слова:** лопатка вентилятора, радиальный зазор, угол установки, толщина профиля, осевая хорда, монтажная геометрия, рабочая геометрия.

### Введение

В настоящее время актуален вопрос сокращения сроков доводки узлов авиационного двигателя, снижения издержек на его проектирование и производство. Одним из таких узлов, существенно влияющим на эффективность авиационного двигателя, является высоконапорный вентилятор. Экспериментальный подход к определению аэродинамического профиля высоконапорной широкохордной лопатки вентилятора требует больших затрат, времени и средств и длителен по времени. Поэтому в данной работе ставится задача ускорения сроков доводки широкохордной лопатки вентилятора на основе использования современного коммерческого программного комплекса вычислительной газовой динамики CFX-TASCflow3D.

Решение поставленной задачи сводится к оценке влияния отклонений угла установки лопатки, радиального зазора, толщины профиля и хорды лопатки на аэродинамические характеристики широкохордной лопатки вентилятора, такие как, коэффициент полезного действия, расход воздуха, степень повышения давления и запас по газодинамической устойчивости.

### 1. Основная часть – исследование

Исследование проводилось в программном комплексе вычислительной газовой динамики CFX-TASCflow v.02.12.02. CFX-TASCflow – программный продукт способный решить разнообразные и сложные многомерные задачи газовой динамики. Решающее устройство CFX-TASCflow3D, обеспе-

чивает решения для несжимаемого или сжимаемого, стационарного или нестационарного, ламинарного или турбулентного однофазного газового потока в сложных геометриях. Данный программный продукт позволяет использовать блочно-структурные неортогональные сетки с встроенными и присоединенными доменами, для дискретизации расчетной области.

В начале всего исследования в программном комплексе Unigraphics была смоделирована вентиляторная ступень в составе лопатки широкохордного вентилятора и спаренного выходного направляющего аппарата (рис. 1). Применение широкохордных лопаток позволяет увеличить КПД вентилятора, тем самым повысить экономичность двигателя.

При моделировании были приняты следующие допущения:

- Для лучшей сходимости задачи обводы проточной части на входе и выходе из расчетной области приведены к цилиндрическому виду.
- На границе стыковки расчетных сеток статора и ротора использовалось граничное условие типа «stage». Это допущение моделирует полное перемешивание неравномерности потока в окружном направлении на входе в венец в стационарной постановке задачи. Газ принимался совершенным с постоянным коэффициентом адиабаты для воздуха  $k = 1,4$  и газовой постоянной  $R = 287,3$  Дж/(кг\*К).
- Для уменьшения расчетной области на боковых поверхностях использовались граничные условия типа «периодичность». Это упрощение позволило моделировать сектор размером, равным шагу решетки.

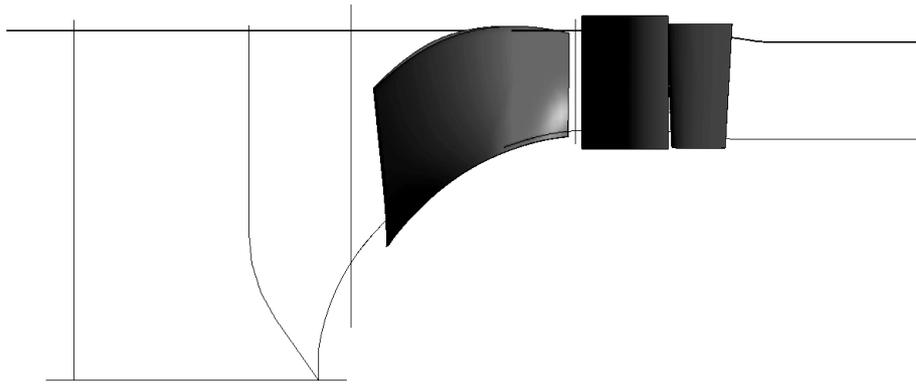


Рис. 1. Геометрия проточной части вентилятора

- Поверхности лопаток и корпусов адиабатные.
- Не моделировалось надроторное устройство над рабочим колесом.
- Для упрощения расчетной области не вводились в рассмотрение радиусы сопряжения лопаток с поверхностью втулки и периферии.
- Все расчеты были остановлены при установлении баланса расходов между входом и выходом из расчетной области  $1e-4$  и величине максимальных невязок не менее  $1e-3$ .

- Расчеты проводились с использованием k-ε модели турбулентности, для лучшей сходимости задачи.

Дискретизация расчетной области была выполнена при помощи программного комплекса построения сеток CFX-TASCgrid.

Размерность расчетных сеток составила 1 454 972 узлов.

Расчетная сеточная область представлена на рис. 2.

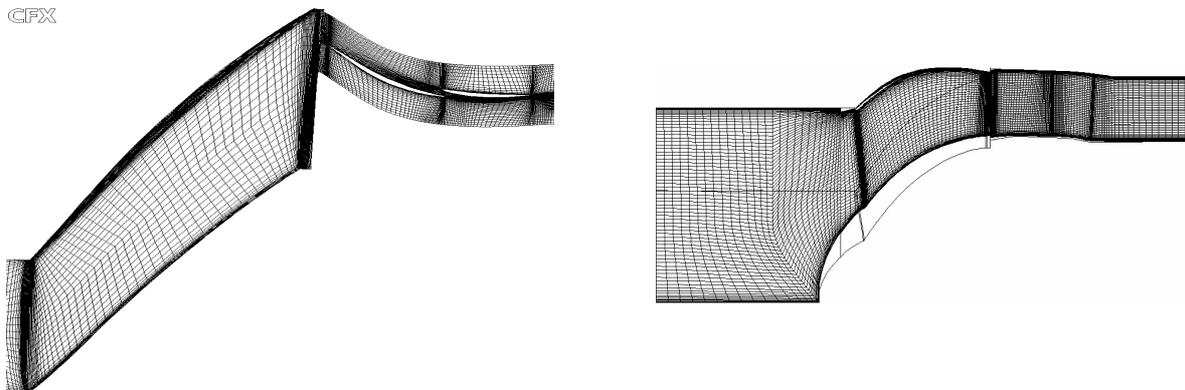


Рис. 2. Расчетная сетка вентилятора

В начале исследования были выполнены расчеты по переводу геометрии лопатки вентилятора из монтажного состояния в рабочее.

Перевод осуществлялся серией совместных аэродинамических и прочностных расчетов.

Оценка изменения аэродинамических характеристик в монтажном и рабочем состоянии проводилась на режиме  $\bar{n} = 1$  (относительная частота вращения). Рабочая геометрия лопатки получена за 2 итерации.

В результате перевода геометрии из монтажного состояния в рабочее лопатка под действием центробежных и газовых сил раскрылась. То есть изменилась величина входного геометрического угла.

На рис. 3 представлено сравнение входного геометрического угла двух моделей вентилятора. Из графика видно, что геометрический угол установки лопатки увеличивается на 1,1% в периферийной части лопатки и уменьшается на 0,45% во втулочной части лопатки.

В такой постановке уменьшилась степень повышения полного давления и адиабатный КПД (коэффициент полезного действия) на линии рабочих режимов.

Перевод геометрии лопатки вентилятора из монтажного в рабочее, привел к уменьшению запасов ГДУ (граница газодинамической устойчивости) на 1,8 %.

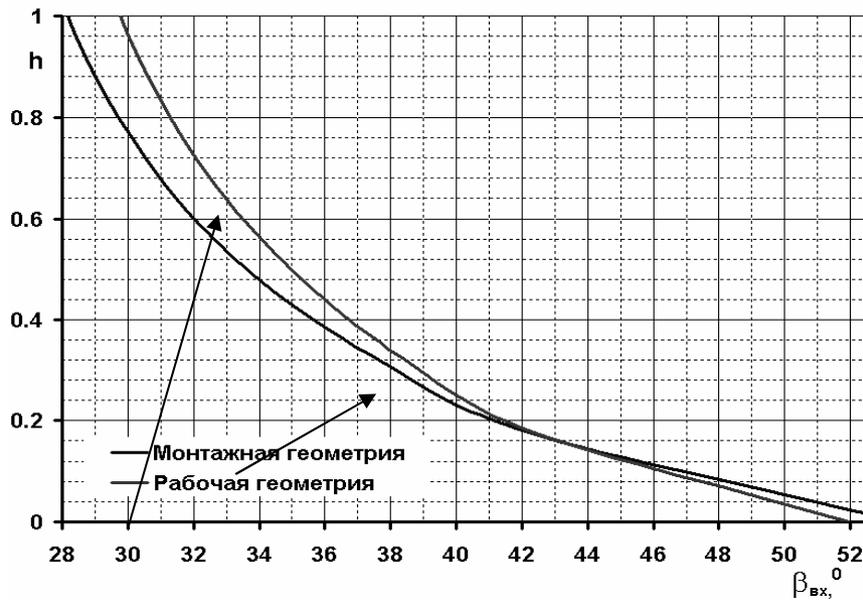


Рис. 3. Сравнение входного геометрического угла двух моделей вентилятора

Такое ухудшение аэродинамических характеристик в межлопаточном канале вентилятора объясняется тем, что на раскрученной геометрии произошло перераспределение системы скачков в периферийной части лопатки. Это стало причиной уменьшения расхода воздуха, проходящего через вентилятор и привело к ухудшению аэродинамических характеристик.

Таким образом, влияние центробежных и газовых сил на аэродинамические характеристики широкохордных лопаток вентилятора обязательно должны учитываться при проектировании.

На последующих этапах исследования была проведена оценка влияния геометрических отклонений рабочей лопатки в пределах конструкторских допусков на аэродинамические характеристики высоконапорного широкохордного вентилятора для следующих параметров:

- радиальный зазор над рабочей лопаткой;
- угол установки лопатки;
- толщина профиля лопатки;
- осевая хорда лопатки.

## 2. Анализ полученных результатов

Далее будут использованы следующие сокращения:

- Z – высота радиального зазора, м;
- G – расход воздуха, кг/с;
- $\Delta K_u$  – запас газодинамической устойчивости, %;
- $\delta$  – отклонение, %;
- $\beta$  – угол установки, град;
- $\eta$  – коэффициент полезного действия (КПД);
- $\pi^*$  – степень повышения полного давления;

ГДУ – граница газодинамической устойчивости;  
 max – геометрия с отклонениями в сторону увеличения размера;  
 min – геометрия с отклонениями в сторону уменьшения размера.

Исследование по влиянию величины радиального зазора на аэродинамические характеристики вентилятора показало:

- увеличение величины радиального зазора до  $Z_{\max} = 0,6$  мм приводит к снижению характеристик вентилятора по отношению к номинальной геометрии ( $Z = 0,3$  мм) на величину  $\delta\eta = -0,7\%$ ,  $\delta G = -1,1\%$ ,  $\delta\pi^* = -1,1\%$  при росте  $\Delta K_u$  на 4,2;
- минимизация величины радиального зазора ( $Z_{\min} = 0,15$  мм) улучшает характеристики вентилятора на величину  $\delta\eta = 0,5\%$ ,  $\delta G = 0,6\%$ ,  $\delta\pi^* = 0,7\%$  по отношению к номинальной геометрии, при снижении  $\Delta K_u$  на 1,8 %.

Уменьшение толщины лопатки вентилятора на 0,2 мм по всему профилю приводит к изменению характеристик вентилятора на величину  $\delta\eta = -0,2\%$ ,  $\delta G = 0,2\%$  по отношению к номинальной геометрии. При этом степень сжатия и запасы ГДУ не изменились.

Уменьшение осевой хорды пера лопатки по отношению к номинальной геометрии на 1,6 мм (2,2 %) дает снижение характеристик вентилятора:  $\delta\eta = -0,3\%$ ,  $\delta G = -1,0\%$ ,  $\delta\pi^* = -0,8\%$ , при росте  $\Delta K_u$  на 1,7 %.

Расчеты по изменению величины угла установки лопатки по отношению к номинальной геометрии показали:

- увеличение угла установки на 1 градус приводит к росту аэродинамических характеристик:

$\delta\eta = 2,0 \%$ ,  $\delta G = 1,1 \%$ ,  $\delta\pi^* = 1,0 \%$ . При этом  $\Delta K_u$  снизился на  $6,7 \%$ ;

- уменьшение угла установки на 1 градус снижает аэродинамические характеристики на величину  $\delta\eta = -0,2 \%$ ,  $\delta G = -1,3 \%$ ,  $\delta\pi^* = -1,4 \%$  при увеличении  $\Delta K_u$  на  $2,4 \%$ .

По результатам проведённой работы основными геометрическими отклонениями, оказывающими существенное влияние на аэродинамическую эффективность вентилятора, являются изменение величины радиального зазора и изменение угла установки лопатки.

В табл. 1 представлены значения отклонений интегральных параметров лопатки от значений полученных для номинальной геометрии с зазором равным  $0,3 \text{ мм}$ .

Такое изменение параметров объясняется тем, что при увеличении радиального зазора на  $100 \%$  увеличиваются потери на перетекание. Отсюда следует снижение расхода в межлопаточном канале, уменьшение  $\eta$  и  $\pi^*$ . Соответственно изменяется характер обтекания лопатки вентилятора (становится более устойчивым). Этим объясняется увеличение  $\Delta K_u$ .

При минимизации величины радиального зазора на  $50\%$ , потери на перетекание становятся меньше. Расход воздуха,  $\eta$  и  $\pi^*$  увеличиваются. В таком случае течение в межлопаточном канале становится более неустойчивым. Поэтому  $\Delta K_u$  снижается.

В табл. 2 показано влияние изменения угла установки на аэродинамическую эффективность высоконапорного широкохордного вентилятора.

При изменении угла установки, изменяется угол натекания потока и, как следствие, изменяется характер течения в межлопаточном канале. При раскрытии лопатки на 1 градус, происходит уменьшение вихревых зон в межлопаточном канале и потерь, связанных с ними.

Таким образом, увеличиваются аэродинамические параметры, но  $\Delta K_u$  снижается из-за увеличения скорости потока в межлопаточном канале (течение становится более неустойчивым). При прикрытии лопатки на 1 градус, увеличивается области вихревых зон. Таким образом, потери растут и снижаются аэродинамические параметры потока. Но из-за снижения скорости потока в межлопаточном канале, происходит рост  $\Delta K_u$ .

Таблица 1

Влияние величины радиального зазора (в % к номинальной геометрии  $Z = 0,3 \text{ мм}$ )

Варианты геометрии	$\delta\pi^*$ , %	$\delta\eta^*$	$\delta G$ , %	$\delta\Delta K_u$ , %
$Z = 0,15 \text{ мм}$ (-50 % от величины номинального зазора)	0,71	0,51	0,62	-1,8
$Z = 0,6 \text{ мм}$ (+100 % к величине номинального зазора)	-1,07	-0,69	-1,1	4,22

Таблица 2

Влияние изменения угла установки (в % к номинальной геометрии)

Варианты геометрии	$\delta\pi^*$ , %	$\delta\eta^*$	$\delta G$ , %	$\delta\Delta K_u$ , %
Раскрытая лопатка (плюс 1 градус по отношению к номинальной геометрии)	1,01	1,95	1,13	-6,7
Прикрытая лопатка (минус 1 градус по отношению к номинальной геометрии)	-1,36	-0,15	-1,32	2,37

## Выводы

На основе результатов, полученных при исследовании влияния геометрических отклонений, спроектирована лопатка высоконапорного широкохордного вентилятора с геометрией наименее чувствительной к производственным отклонениям в пределах конструкторских допусков.

Разработанная модель в процессе проектирования позволяет:

- выбрать угол установки, отвечающий наилучшим аэродинамическим характеристикам высоконапорной широкохордной лопатки вентилятора с учётом газодинамических и центробежных сил;
- определить величину радиального зазора с учётом компромисса между КПД и ГДУ;
- выбрать величину осевой хорды пера лопатки высоконапорного широкохордного вентилятора с учётом компромисса между КПД и ГДУ;

– выбрать толщину профиля пера лопатки с учётом компромисса между значением расхода воздуха и КПД.

### Литература

1. Крюков А.И. Некоторые вопросы проектирования ГТД / А.И. Крюков. – М.: Издательство МАИ, 1993. – 335 с.

2. Тиханов Н.Т. Теория лопаточных машин авиационных газотурбинных двигателей / Н.Т. Тиханов, Н.Ф. Мусаткин, В.И. Матвеев. – Самара: Самарский аэрокосмический университет, 1992. – 151 с.

3. Холицевников К.В. Теория и расчёт авиационных лопаточных машин / К.В. Холицевников, О.Н. Емин, В.Т. Митрохин. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.

Поступила в редакцию 28.05.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., заместитель начальника ОКБ-1 по САУ техники В.В. Червонюк, ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия.

### ОЦІНКА ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДОПУСКІВ В ГЕОМЕТРІЇ ЛОПАТОК НА АЕРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИСОКОНАПІРНОГО ШИРОКОХОРДНОГО ВЕНТИЛЯТОРА ГТД

*С.С. Карнаухова*

У даній статті розглядається методологія доведення за допомогою математичного моделювання і проведення чисельної оцінки. Представлені результати роботи за оцінкою впливу геометричних відхилень на характеристики високонапірного широкохордного вентилятора. Виконана чисельна оцінка впливу геометричних відхилень в межах конструкторських допусків при виготовленні лопаток на аеродинамічні характеристики вентилятора. Розрахунки виконані в програмному комплексі обчислювальної газової динаміки CFX-TASCflow версія 02.12.02.

**Ключові слова:** лопатка вентилятора, радіальний зазор, кут установки, товщина профілю, осьова хорда, монтажна геометрія, робоча геометрія.

### ESTIMATION OF INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL TOLERANCES IN BLADES GEOMETRY ON AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE FAN

*S.S. Karnauhova*

In this article the methodology of development by means of mathematical modelling and conducting of numerical estimation is considered. Work results according to influence of geometrical deviations on characteristics of high-pressure widechord fan are presented. The numerical estimation of geometrical deviations influence within the design tolerances limits is performed at blades manufacturing on aerodynamic characteristics of the fan. Calculations are performed in the computing gas dynamics program complex CFX-TASCflow, version 02.12.02.

**Key words:** fan blade, radial clearance, angle of setting, profile thickness, center chord, assembly geometry, operating geometry.

**Карнаухова Светлана Сергеевна** – инженер-конструктор 3 категории конструкторского отдела систем инженерного анализа, ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн», Рыбинск, Россия, e-mail pavel.chupin@npo-saturn.ru.