

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS CFX ПРИ РАСЧЕТЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ

А.Я. Абдулин, Н.Б. Проскурина, Н.С. Сенюшкин, Р.Р. Ямалиев

В работе рассматривается численное моделирование течения в центробежном компрессоре с помощью программного комплекса ANSYS CFX, проводится сравнение натурного и численного экспериментов

Ключевые слова: центробежный компрессор, численное моделирование, газодинамические расчеты

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при проектировании перспективных силовых установок кораблей и самолетов для гражданской и боевой авиации проявился определенный интерес к центробежным компрессорам, их предлагается применять для замены трех последних ступеней КВД. Возможность достижения в них высоких степеней повышения давления при небольшой осевой протяженности и массе компрессора отодвинула на второй план такой недостаток центробежного компрессора, как более низкий КПД по сравнению с осевым компрессором.

Широкое применение центробежные компрессоры получили в малоразмерных газотурбинных двигателях для беспилотных летательных аппаратов и газотурбинных энергетических установок. Применение центробежных компрессоров в данном случае обусловлено возможностью получения требуемых степеней повышения давления в одной ступени компрессора, что позволяет сократить количество деталей, а соответственно, и стоимость изделия [4].

Приведенный анализ указывает на актуальность проведения исследований в области проектирования центробежных компрессоров.

На современном этапе развития авиационного двигателестроения в рамках CALS-технологий при проектировании новых изделий все большее применение находит использование различных программных комплексов. Применение CALS-технологий позволяет значительно сократить сроки и материальные затраты при проведении различных работ на ранних стадиях проектирования.

Данная работа посвящена оценке возможности использования программного комплекса ANSYS CFX при расчете центробежных компрессоров.

1. УСТАНОВКА ОПТ-210

Установка ОПТ предназначена для экспериментального исследования характеристик центробежного компрессора. Она состоит из входного участка с соплом Вентури, вращающегося центробежного колеса с диффузорным течением потока, выходного участка – улитки. Далее поток по трубкам собирается в общий газосборник и выдувается в атмосферу. Перед выходом в атмосферу располагается дроссельная заслонка, которая позволяет регулировать расход воздуха через компрессор. Фотографии установки представлены на рис. 1.



Рис. 1. Фотографии лабораторной установки ОПТ

Абдулин Арсен Яшарович – УГАТУ, магистрант, тел. (347) 273-36-77, e-mail: avia112@mail.ru
Проскурина Наталия Борисовна – УГАТУ, магистрант, тел. (347) 273-36-77, e-mail: rose.dew@mail.ru
Сенюшкин Николай Сергеевич – УГАТУ, канд. техн. наук, тел. (347) 273-36-77, e-mail: aviastar-ufa@mail.ru
Ямалиев Руслан Рафаилович – УГАТУ, ассистент, тел. (347) 273-36-77, e-mail: cyamalrr@mail.ru

Геометрическая модель установки была создана по рабочим чертежам в среде Unigraphics. Она включает в себя статорную (входной патрубков и улитка) и роторную (лопаточный венец) части. Изображения трехмерной модели с разных ракурсов представлены на рис. 2,3.

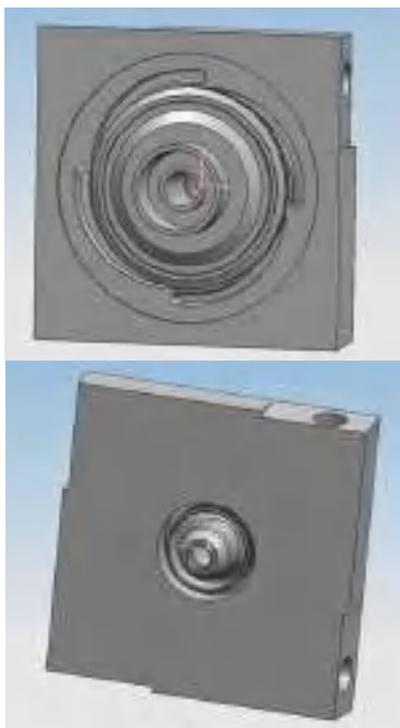
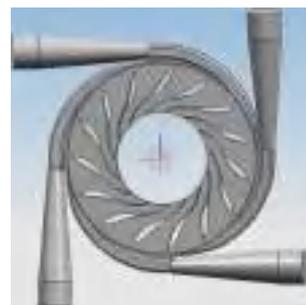


Рис. 2. Различные виды 3D модели, созданной по рабочим чертежам



г



д

Рис. 3. Геометрия элементов расчетной области

а – входной участок; б – ротор; в – улитка; г, д – вид расчетной области спереди и сзади (без входного участка)

2. ПОСТРОЕНИЕ СЕТКИ CFX-MESH

После создания геометрии расчетной области была сформирована сеточная модель. В модуле CFX-Mesh были построены автономные модели входного участка, ротора и улитки (рис. 4).



а



б



в



а



б

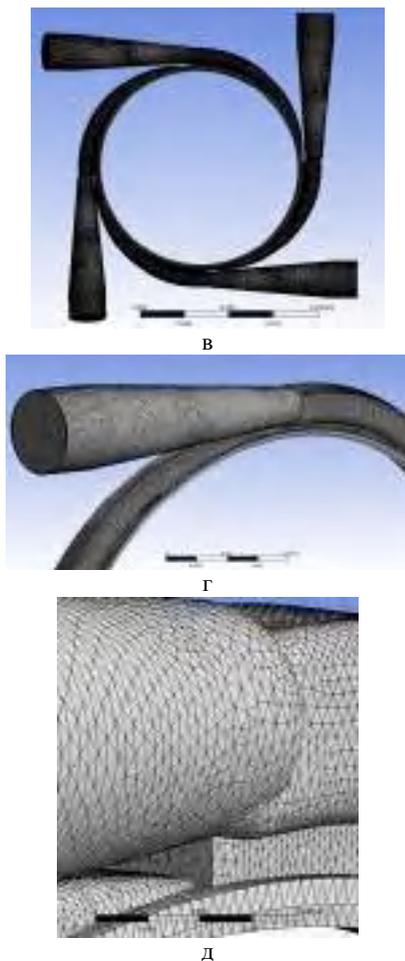


Рис. 4. Сеточные модели расчетной области
 а – сеточная модель ротора; б – сеточная модель входного участка; в, г, д – сеточная модель улитки, различные виды

Параметры сетки:

максимальный размер ячейки во всей расчетной области 0,8 мм;

размер поверхностной сетки во всей расчетной области 0,4...0,8 мм;

у стенок 5 призматических слоев с суммарной толщиной не более 0,8 мм;

размеры поверхностной сетки в улитке, где есть радиусы скругления, составляют 0,4...0,5 мм.

Количество ячеек:

входной участок – 1153906 ячеек;

ротор – 832552 ячейки;

улитка – 1968910 ячеек.

3. ПОДГОТОВКА МОДЕЛИ К РАСЧЕТУ В CFX-PRE

Модель с расставленными граничными условиями представлена на рис. 5. На входе задается полное давление, на выходе массовый расход. В местах соприкосновения ротора и статора задается взаимодействие областей Frozen Rotor: параметры от входного участка к ротору и от ротора к выходному участку передаются без осреднения потока [1].



Рис. 5. Модель центробежного компрессора с расставленными граничными условиями
 1 – взаимодействие областей ротор-статор;
 2 – выход; 3 - вход

Граничные условия в ANSYS CFX-Pre

Модель турбулентности: стандартная k-ε.

Вещество: воздух, подчиняющийся закону идеального газа.

Модель теплопереноса: Total Energy (учитывается сжимаемость жидкости, решаются уравнения теплопереноса).

Опорное (ссылочное) давление: 101325 Па.

Взаимодействие областей ротор-статор: Frozen Rotor.

Граничное условие «Вход»: задается полное давление, равное атмосферному и температура.

Граничное условие «Стенка»: стенка с прилипанием.

Граничное условие «Выход»: задается массовый расход.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Натурный эксперимент проведен на лабораторной установке ОРТ-210.

Таблица 1

Результаты натурного эксперимента

№	t, С	P _в , кПа	P _{вх} , кПа	P _{вых} , кПа	p* _{вых} , кПа	T* _{вых} , С	m _в , кг/с
1	21,5	-0,3	0,0	0,1	0,2	22,3	0,0102
2	21,5	-1,4	-0,5	0,8	0,9	23,6	0,0220
3	21,6	-1,0	-0,3	2,3	2,4	24,5	0,0186
4	21,7	-2,2	-0,7	5,3	5,5	27,5	0,0274
5	21,7	-0,3	0,0	7,4	7,5	28,2	0,0102
6	21,9	-3,1	-1,1	2,2	2,5	28,6	0,0323
7	22,0	-4,3	-1,5	2,7	3,1	30,8	0,0376

Результаты занесены в табл. 1. Эксперименты проводились при различных частотах вращения

компрессора и различных углах дроссельной заслонки, каждый последующий эксперимент происходит с увеличением заторможенной температуры на выходе.

Примечание к таблице: 1 – частота вращения 100 об/с, дроссель 90 град; 2 – частота вращения 200 об/с, дроссель 90 град; 3 – частота вращения 200 об/с, дроссель 45 град; 4 – частота вращения 300 об/с, дроссель 45 град; 5 – частота вращения 300 об/с, дроссель 20 град; 6 – частота вращения 300 об/с, дроссель 70 град; 7 – частота вращения 350 об/с, дроссель 90 град.

Расход воздуха подсчитывается в сечении в-в.

Массовый расход определяется в узком сечении входного участка (в-в), где располагается приемник статического давления (трубка Вентури).

$$m_e = A(k, R) \cdot \frac{F_a \cdot q(\lambda) \cdot p^*}{\sqrt{T^*}},$$

где F_a – площадь входного участка в сечении в-в

$$F_a = \pi \cdot d^2 / 4 = 3,14 \cdot 0,02205^2 / 4 = 0,000382 \text{ м}^2;$$

$q(\lambda)$ определяется по $\pi(\lambda) = p_e/p^*$, $p^*=p_{и}$; $p_{и} = 101325 \text{ Па}$ [2, 3].

5. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данные, полученные по результатам расчета в ANSYS CFX занесены в табл. 2. После проведено сравнение натурального и численного эксперимента в табл. 3.

На рис. 6 видно, что статическое давление повышается от входного участка к выходному, т.к. течение в компрессоре диффузорное.

Таблица 2

Данные численного эксперимента

№	$m_{вх}/m_{вых}$, г/с	$T^*_{вых}$, К	$p^*_{вых}$, кПа	$P_{вх}$	$P_{вых}$
1	10,4/10,2	295,40	0,3	-0,1	0,3
2	22,2/22,0	297,90	1,1	-0,3	0,8
3	19,0/18,6	298,29	2,2	-0,2	2,0
4	26,8/27,4	301,24	5,6	-0,3	5,6
5	10,3/10,2	301,72	7,6	-0,1	7,3
6	31,7/32,3	302,04	2,4	-1,2	2,0
7	36,3/37,6	302,41	3,2	-1,3	2,8

Распределение полного давления показано на рис. 7: полное давление считается по относительным параметрам потока в роторной части (p_w^*), и является примерно постоянным, без учета потерь полного давления. В выходной статорной части (улитке), полное давление считается по абсолютным параметрам потока, поэтому происходит скачкообразное изменение на картине распределения полного давления. Далее, по

выходным патрубкам осредненное полное давление падает, неравномерность поля давлений по поперечному сечению патрубка уменьшается.

Таблица 3

Сравнение натурального и численного экспериментов

№	Эксп	$T^*_{вых}$, К	$p^*_{вых}$, кПа	$P_{вх}$	$P_{вых}$
1	Числ	295,40	0,5	-0,1	0,3
	Натур	295,35	0,2	0,0	0,1
2	Числ	297,90	1,1	-0,3	0,8
	Натур	296,75	0,9	-0,5	0,7
3	Числ	298,29	2,2	-0,2	2,0
	Натур	297,55	2,4	-0,3	2,3
4	Числ	301,24	5,6	-0,3	5,6
	Натур	300,85	5,5	-0,7	5,3
5	Числ	301,72	7,6	-0,1	7,3
	Натур	301,35	7,5	0,0	7,4
6	Числ	302,04	2,4	-1,2	2,0
	Натур	301,75	2,5	-1,1	2,1
7	Числ	302,41	3,2	-1,3	2,8
	Натур	303,95	3,1	-1,5	2,6

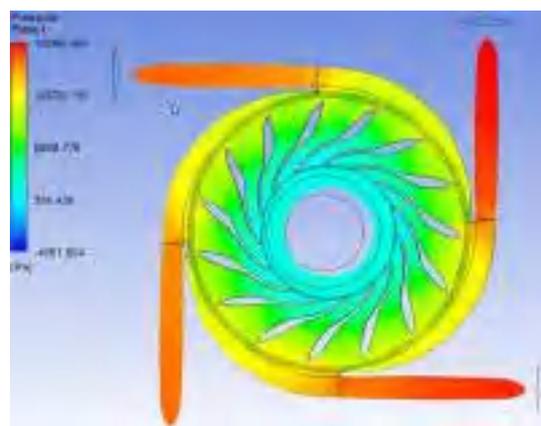


Рис. 6. Распределение статического давления в плоскости компрессора

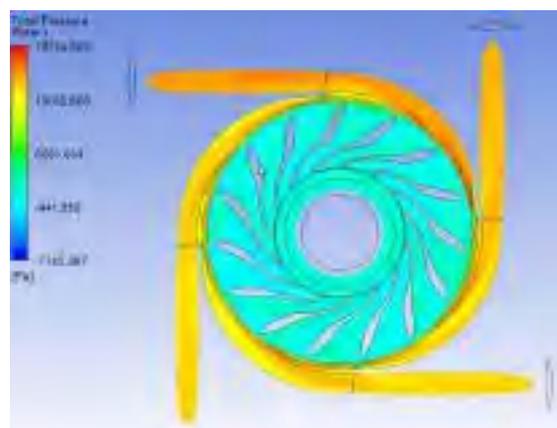


Рис. 7. Распределение полного давления в плоскости компрессора

ВЫВОДЫ

Результаты, полученные в численном эксперименте, показывают хорошее соответствие с результатами натурального эксперимента.

Погрешность между натурным и численным экспериментом составляет не более 5%.

Картины распределения параметров, полученные в ANSYS CFX, соответствуют основным закономерностям течения в центробежных компрессорах.

Осреднение параметров потока наиболее предпочтительно по массовому потоку, а не по площади, поскольку, в случае обратных течений, при осреднении по потоку параметры суммируются по модулю, а при осреднении по площади, суммирование происходит с учетом знака. Так как на выходе из компрессора наблюдается большая неравномерность, то целесообразно применять осреднение по массовому расходу.

С учетом вышесказанного можно сделать вывод о правильности задания граничных условий и соответствии численной модели, построенной в препроцессоре ANSYS CFX, течению в реальном компрессоре установки OPT-210.

Работы ведутся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Литература

1. ANSYS inc. Руководство пользователя ANSYS CFX.
2. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч. 1: Учебное руководство: Для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука., 1991. – 600 с.
3. Ржавин Ю.А. Осевые и центробежные компрессоры двигателей летательных аппаратов. Теория, конструкция и расчет: учебник. – М.: Изд-во МАИ, 1995. – 344 с.
4. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин: Учеб. для авиац. вузов и фак. – М.: Машиностроение, 1970. – 610 с.

Уфимский государственный авиационный технический университет

ESTIMATION OF PROGRAM COMPLEX ANSYS CFX FOR CALCULATION OF CENTRIFUGAL COMPRESSORS USAGE POSSIBILITY

A.Y. Abdulin, N.B. Proskurina, N.S. Senyushkin, R.R. Yamaliev

Given work observes numerical modeling of a current in the centrifugal compressor by means of program complex ANSYS CFX. This work considers comparison of natural and numerical experiments

Key words: the centrifugal compressor, numerical modeling, gas-dynamic calculations