

УДК 621.452.3

Е. С. ГОРЯЧКИН, Г. М. ПОПОВ, В. Н. МАТВЕЕВ

Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ТРЕХСТУПЕНЧАТОГО КОМПРЕССОРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В статье приводятся результаты численного моделирования рабочего процесса трехступенчатого компрессора низкого давления. В ходе работы изучено влияние на протекание расчётных характеристик компрессора используемого типа интерфейса между вращающимися и невращающимися доменами. Проведена валидация численной модели компрессора путем сравнения расчётных характеристик с экспериментальными характеристиками на различных частотах вращения. Исследовано влияние отбора воздуха. Полученная информация может быть использована при создании численных моделей компрессоров.

Ключевые слова: компрессор низкого давления, гидродинамика, интерфейс, эксперимент.

Компрессор – один из основных узлов ГТД, эффективность которого в значительной степени определяет эффективность всего двигателя [1]. Современные компрессоры должны обеспечивать максимально высокий коэффициент полезного действия (КПД), заданную величину повышения давления и обладать при этом достаточными запасами газодинамической устойчивости. Часто выполнение этих требований противоречит друг другу и оптимальным является компромиссное решение.

Поиск такого решения значительно облегчается благодаря использованию современных методов вычислительной газовой динамики (CFD – методы). Применение программных комплексов, основанных на численных методах моделирования потока, позволяет конструктору с достаточной степенью точности определять характеристики компрессора еще на стадии проектирования. Что, в конечном итоге, позволяет существенно снизить сроки и стоимость разработки нового изделия.

Объектом исследования в данной работе являлся компрессор низкого давления (КНД) стационарной газотурбинной установки. Компрессоры подобного типа характеризуются сложной пространственной картиной течения потока, наличием отрывов и вихрей, а также сверх- и трансзвуковой скоростью потока в первых ступенях.

Целью работы являлось:

- создание численной модели трехступенчатого компрессора низкого давления;
- изучение влияния на протекание расчётных характеристик используемого типа интерфейса между вращающимися и невращающимися доменами;

- изучение влияния на характеристики компрессора отбора воздуха.

Создание расчётной модели и расчёт осуществлялся в программном комплексе *NUMECA Fine/Turbo*.

При создании численной модели были приняты допущения:

- течение во всех лопаточных венцах (ЛВ) обладает свойством циклической симметрии;
- характер течения в КНД не является сугубо нестационарным, то есть расчёт можно выполнять в стационарной постановке;
- деформация лопаток от рабочих нагрузок моделировалась раскруткой лопаток на некоторый угол. Для втулочного сечения угол был принят равным нулю. В периферийном сечении угол был принят равным одному градусу. В остальных сечениях угол раскрутки определялся из условия линейного закона распределения по высоте лопатки;
- не учитывался теплообмен между стенками проточной части и потоком.

Геометрия расчётной области была построена на основе конструкторской документации и состояла из доменов входного направляющего аппарата, рабочих колёс, направляющих аппаратов (рис. 1).

Созданная трёхмерная сетка конечных элементов расчётной модели КНД представлена на рис. 2. Суммарное количество элементов в сетке составило около 2,1 млн. Средний размер сетки для одного ЛВ составил 300 тысяч элементов. Величина минимальной скошенности в трёхмерной сетке составила 32 градусов. Среднее значение параметра *Aspect Ratio* составило примерно 2000.

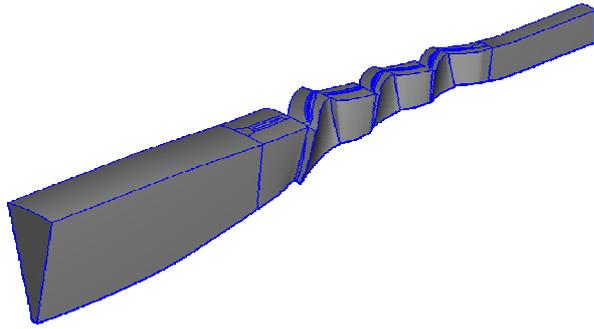


Рис. 1. Геометрия расчётной области

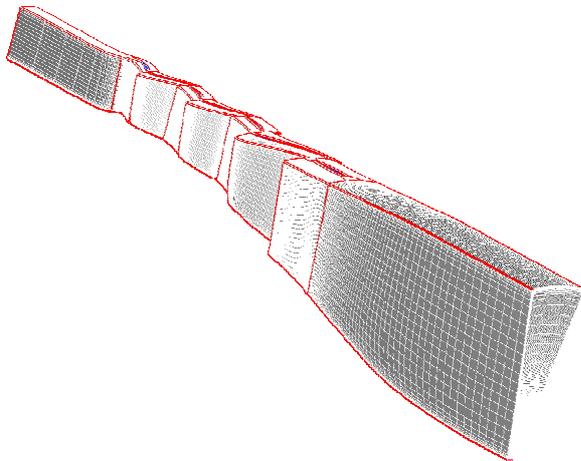


Рис. 2. Созданная конечно-элементная сетка численной модели КНД

При настройках расчётной модели в программном комплексе *NUMECA Fine/Turbo* в качестве рабочего тела использовался идеальный газ со свойствами сухого воздуха, переменной изобарной теплоёмкостью и вязкостью.

При расчётах использовалась модель турбулентности *k-ε (Low Re Yang-Shih)*.

В качестве граничных условий на входе в КНД задавалось значение полного давления $P^* = 101,325$ кПа и полной температуры $T^* = 288,15$, направление потока на входе было задано осевым.

На выходе из КНД задавалось статическое давление во втулочном сечении с учётом радиальной неравномерности потока.

В первых ступенях современных компрессоров низкого давления поток обладает сверх- и транзвуковыми скоростями. При этом возникает система скачков уплотнений. При положении системы скачков уплотнений, когда возможен её выход за пределы интерфейса, связывающего вращающиеся домены рабочих

колес и неподвижные домены направляющих аппаратов, могут возникнуть неточности при расчёте.

Для того чтобы исключить влияние возможного отражения скачка уплотнения от интерфейса, связывающего домен первого рабочего колеса и входного направляющего аппарата, была проведена серия расчётов при частоте вращения доменов рабочих колёс 5000 об/мин с использованием различных типов интерфейсов:

- *full non matching mixing plane* – интерфейс, осредняющий параметры потока в окружном направлении;

- *non reflecting 1D* – интерфейс, не позволяющий волнам уплотнений отражаться;

- *local conservative coupling* – интерфейс, осредняющий параметры потока по всем узлам в окружном направлении.

Рассчитанные с использованием различных типов интерфейсов характеристики КНД показаны на рисунке 3.

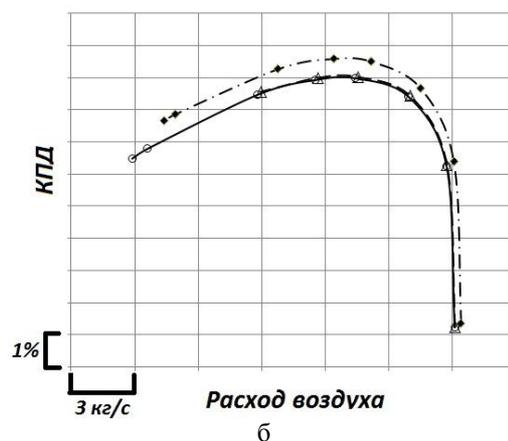
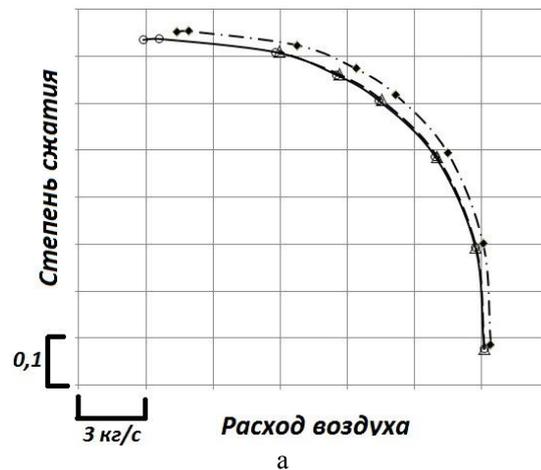


Рис. 3. Рассчитанные характеристики компрессора с различными типами интерфейсов:

а - напорная, б – КПД

На графиках сплошной линией с маркерами в виде кругов показаны характеристики, рассчитанные с использованием интерфейса *full non matching mixing*

plane; сплошными линиями с маркерами в виде треугольников показаны характеристики, рассчитанные с помощью интерфейса *local conservative coupling*; штрихпунктирной линией показаны характеристики, рассчитанные с помощью интерфейса *non reflecting 1D*.

Из анализа графиков, представленных на рисунке 3 видно, что расчёт с использованием интерфейсов *non reflecting 1D* и *full non matching mixing plane* дают разные по величине, но сравнимые по величинам запасов устойчивой работы результаты; расчёт с использованием интерфейсов *local conservative coupling* и *full non matching mixing plane* даёт равные по величине, но существенно различающиеся по величинам запасам устойчивой работы результаты.

Дальнейшие исследования было решено проводить с использованием интерфейса *full non matching mixing plane*.

На рисунке 4 показана система скачков уплотнений в первом рабочем колесе рассматриваемого компрессора на частоте вращения 5000 об/мин при различных перепадах давления с использованием интерфейса *full non matching mixing plane*.

Для валидации созданной численной модели был проведён расчёт характеристик КНД на частотах вращения 4200 об/мин, 4600 об/мин, 5000 об/мин.

Результаты расчёта характеристик и их сравнение с экспериментальными приведено на рис. 5.

Из графиков видно, что рассчитанные напорные и КПД ветки имеют некоторые отклонение от экспериментальных, но позволяют точно описывать

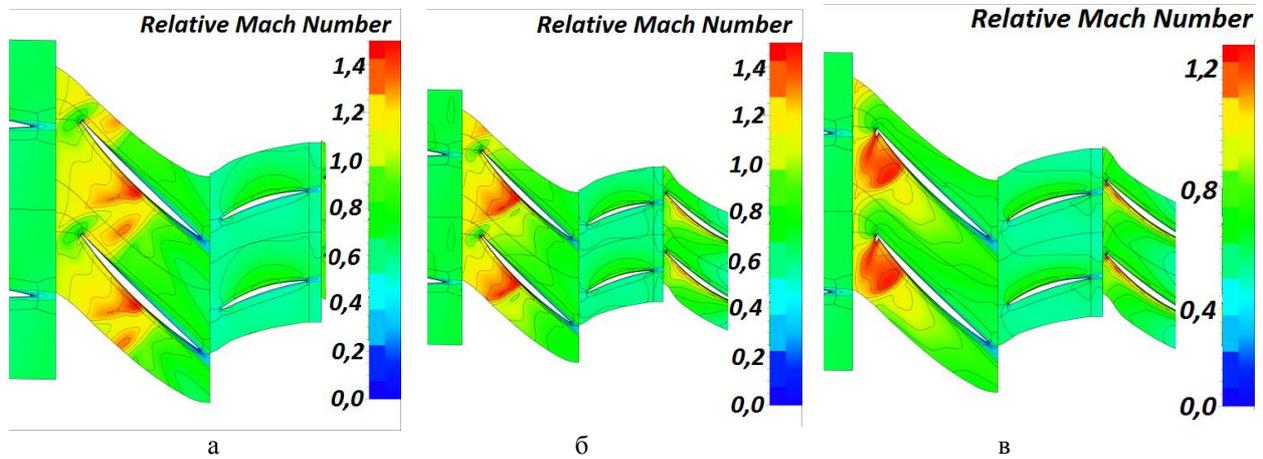


Рис. 4. Система скачков уплотнения в первом РК КНД: а – на режиме запираания, б – на расчётном режиме, в – на режиме срыва

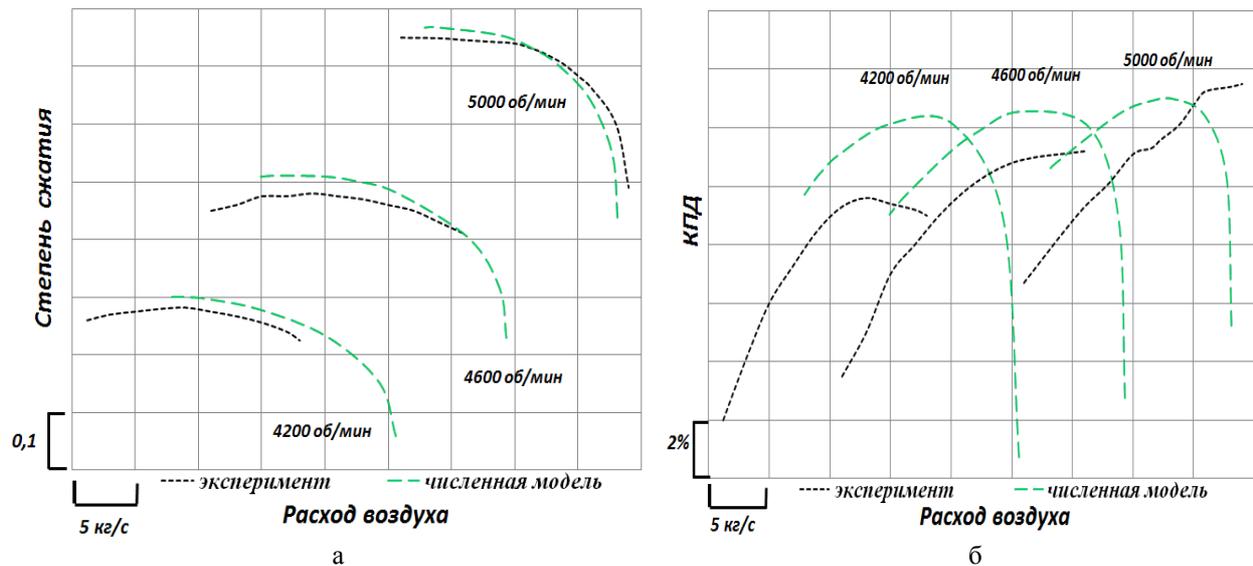


Рис. 5. Рассчитанные характеристики КНД: а – напорная, б – КПД

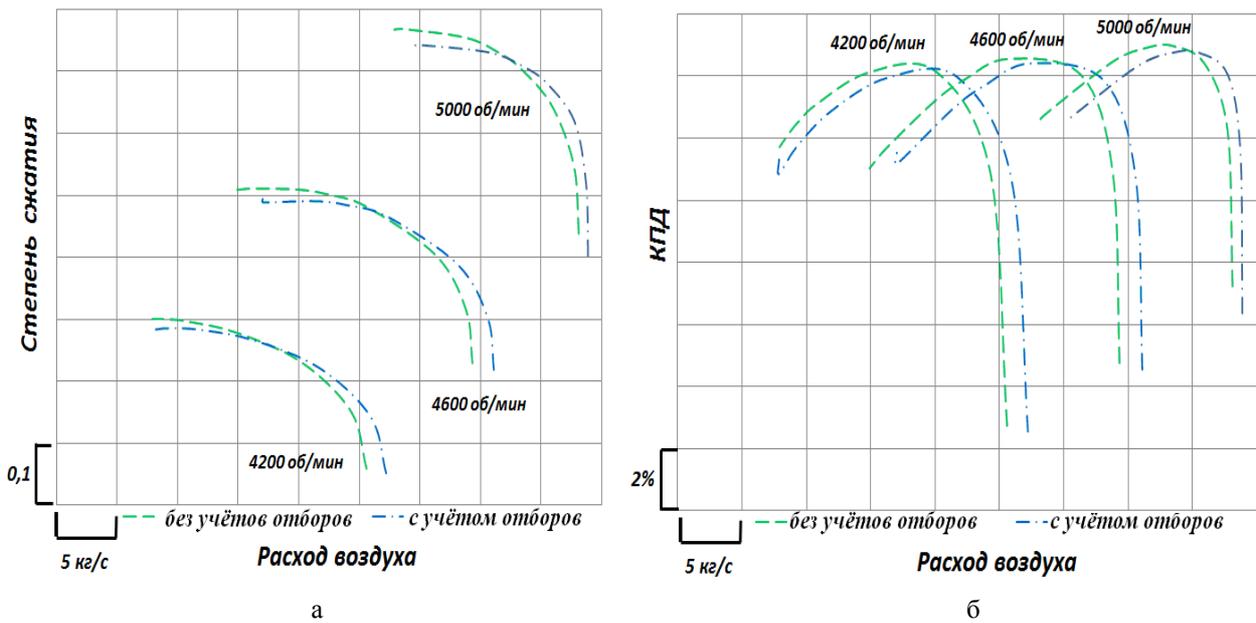


Рис. 6. Сравнение рассчитанных характеристик с учётом отбора и без: а – напорная, б – КПД

тенденции изменения характеристик компрессора.

Как известно, отбор воздуха от компрессоров может оказывать существенное влияние на их характеристики [3].

Для изучения влияния отбора воздуха на характеристики компрессора, был выполнен расчёт характеристик с помощью численной модели с учётом отбора воздуха за первым направляющим аппаратом КНД. Сравнение с характеристиками, рассчитанными без учёта отбора, показано на рис. 6.

По результатам работы можно сделать выводы:

1. При расчётах компрессоров со сверхзвуковыми ступенями тип интерфейса между вращающимися и неподвижными доменами может оказывать влияние на результаты расчёта.

2. Созданная расчётная модель позволяет адекватно оценивать характеристики компрессора во всем диапазоне частот вращения.

3. Отбор воздуха за первой ступенью КНД приводит к падению степени сжатия до 1% на повышенных режимах, и незначительно влияет на степень сжатия на малых режимах.

4. Отбор воздуха из-за первой ступени КНД приводит к падению КПД на величину до 0,1%.

Литература

1. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок [Текст] : учеб. / А. А. Иноземцев, М. А. Нихамкин, В. Л. Сандрацкий. – М. : Машиностроение, 2008. – 368 с.
2. Теория, расчёт и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок [Текст] : учеб. для вузов / В. В. Кулагин. – М. : Машиностроение, 2003. – 616 с.

**Работа выполнена при финансовой поддержке
Правительства Российской Федерации
(Минобрнауки) на основании постановления №218
от 09.04.2010 (шифр темы 2013-218-04-4777)**

Рецензент: д-р техн. наук, проф., декан факультета двигателей летательных аппаратов А. И. Ермаков, Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), Самара.

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ТРЬОХСТУПЕНЕВОГО КОМПРЕСОРА НИЗЬКОГО ТИСКУ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Є. С. Горячкін, Г. М. Попов, В. М. Матвеев

У статті наводяться результати чисельного моделювання робочого процесу двохступеневого компресора низького тиску. В ході роботи вивчено вплив на протікання розрахункових характеристик компресора використовуваного типу інтерфейсу між обертовими і необертними доменами. Проведено валідацію чисельної моделі компресора шляхом порівняння розрахункових характеристик з експериментальними характеристиками на різних частотах обертання. Досліджено вплив відбору повітря. Отримана інформація може бути використана при створенні чисельних моделей компресорів.

Ключові слова: компресор низького тиску, гідродинаміка, інтерфейс, експеримент.

WORKFLOW MODELING OF THREE STAGE LOW PRESSURE COMPRESSOR OF GAS TURBINE ENGINE

E. S. Gorachkin, G. M. Popov, V. N. Matveev

The results of numerical modeling workflow two stage compressor low pressure. During the study the effect on the course of the calculated characteristics of the compressor type used interface between rotating and non-rotating domain. Conducted validation of the numerical model by comparing the calculated compressor characteristics with experimental characteristics at different rotation speeds. The influence of air sampling. The information obtained can be used to create numerical models of compressors.

Key words: low-pressure compressor, fluid dynamics, interface, experiment.

Горячкін Евгений Сергеевич – магистрант факультета двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), Самара, Россия, e-mail: evgeni0063@yandex.ru.

Попов Григорий Михайлович – аспирант факультета двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), Самара, Россия, e-mail: grishatty@gmail.com.

Матвеев Валерий Николаевич – д-р техн. наук, проф., зав. каф. теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), Самара, Россия, e-mail: mvn@ssau.ru.