

УДК 621.431.75

РАСЧЕТНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКА ВБЛИЗИ ВТУЛОЧНОГО СЕЧЕНИЯ В ЛОПАТОЧНОМ ВЕНЦЕ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ

© 2009 Г. М. Попов, О. В. Батулин

Самарский государственный аэрокосмический университет

В работе проводится сравнение картин течения газа в межлопаточных каналах ступени турбины, полученных в расчете с помощью программы CFX с существующими физическими представлениями и экспериментальными данными. Расчетная структура потока качественно хорошо согласуется с имеющимися данными, и позволяет детально изучить вторичные течения в каналах осевой турбины.

Вычислительная газовая динамика, турбина, конечные элементы, сопловой аппарат, рабочее колесо, отрыв, вторичное течение

До 50% потерь энергии в лопаточном венце турбины происходят в областях вблизи втулочной и периферийной концевых стенок. Обычно данные потери называют вторичными, и считается, что они связаны с перетеканием потока в пределах пограничного слоя от корытца к спинке и влиянием радиальных зазоров. Однако это не совсем верно, поскольку структура потока в этих областях гораздо более сложная. До недавнего времени единственным источником сведений о потоке оставался эксперимент. Очевидно, что он требует больших временных и материальных затрат. Кроме того, ограниченные возможности средств измерения не позволяют получить исчерпывающие данные о каждой точке интересующей области. В результате структура потока в межлопаточном канале оставалась недоисследованной.

В настоящее время развитие вычислительной техники сделало возможным расчетное исследование течений газа с помощью системы уравнений Навье - Стокса. Она описывает течение газа с минимальными допущениями и позволяет учитывать влияние трехмерных явлений, вязкости и переменности свойств рабочего тела и т.п. Программы решающие эту систему являются мощным инструментом структуры потока. Их использование позволит понять сущность физических процессов происходящих в потоке, выявить механизмы возникновения потерь и разработать рекомендации по их уменьшению.

Целью данной работы является изучение пространственной структуры потока в ступени турбины с помощью современного универсального программного комплекса *Ansys CFX*, основанного на численном ре-

шении уравнений Навье - Стокса, и сопоставление полученных результатов с существующими представлениями о структуре течения в ступени турбины.

В качестве объекта исследования была выбрана одноступенчатая турбина высокого давления двигателя НК-93. Расчетная область содержит два блока. Один включает в себя межлопаточный канал соплового аппарата (СА), другой - рабочего колеса (РК). На их границе задается граничное условие, осредняющее в окружном направлении параметры потока за СА и передающее их на вход в РК. Геометрия лопаток и проточной части соответствует геометрии турбины в условиях крейсерского полета. Выдув охладителя, утечки и втекания в проточную часть не моделировались. В отличие от турбины НК-93 РК расчетной модели не имеет бандажной полки.

Созданная модель была разбита четырехугольной структурной конечноэлементной сеткой с помощью модуля *TurboGrid* (рис. 1 и 2). Общее число конечных элементов 831408 (в сопловом аппарате (СА) – 385848, а в рабочем колесе (РК) - 445848). Размер элемента, ближайшего к стенке, составляет 0,004 мм. В радиальном зазоре количество элементов по высоте – 30.

В качестве рабочего тела использовались продукты сгорания, подчиняющиеся закону идеального газа. Вязкость рабочего тела подчиняется закону Сатерленда.

$$\mu = 1,49 \cdot 10^{-5} \frac{273 + 200}{200 + T} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}.$$

Теплоемкость также считалась зависимой от температуры:

$$c_{pz} = 0,000223T^2 - 0,178877T + 1126,691 \frac{\text{Дж}}{\text{кгК}}.$$

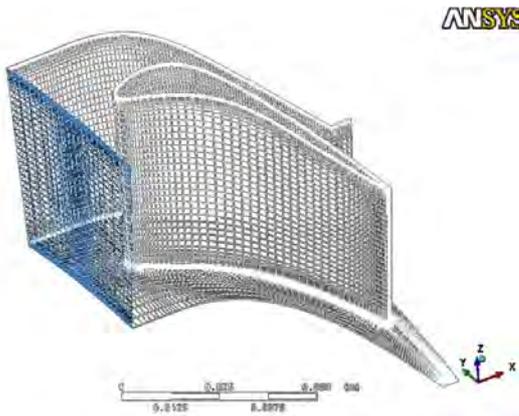


Рис.1. Конечноэлементная модель межлопаточного канала СА

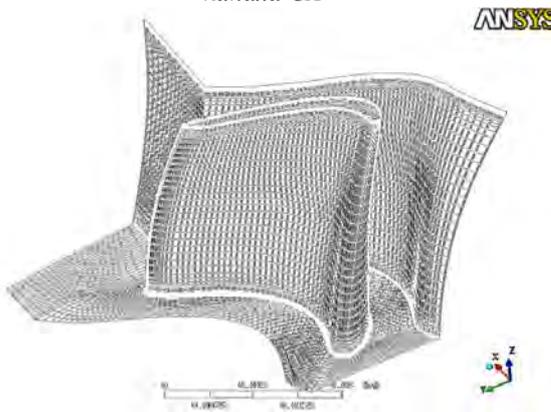


Рис.2. Конечноэлементная модель межлопаточного канала РК

При расчете используется модель турбулентности *k-ε*. Расчет велся в стационарной постановке с осреднением параметров потока за СА.

Для расчета на основании проектного расчета были приняты следующие граничные условия:

- область РК рассчитывалась в подвижной системе координат, вращающейся с частотой вращения ротора $n=14722$ об/мин;
- на поверхностях межлопаточного канала, смежных с соседними устанавливается периодическое граничное условие;
- на входной границе задавались полные температура и давление потока, а также направляющий вектор потока. Радиальные изменения полей давления и температуры не учитывались;
- на выходной границе задавалось статическое давление;
- уровень входной турбулентности потока был принят равным 5%.

В результате расчета были получены поля распределения параметров потока и линий тока во всех точках расчетной облас-

ти. Принципиальной разницы в структуре потока между СА и РК замечено не было (кроме явлений, происходящих в радиальном зазоре). Однако процессы, происходящие в РК значительно более интенсивные, что, видимо, связано с влиянием вращения. Поэтому, в дальнейшем анализ структуры будет проводиться на примере РК.

Результаты расчета показали, что на втулочной поверхности перед входной кромкой лопатки возникает «подковообразный» вихрь (рис. 3-5), который, уходя вниз по потоку, разделяется на две ветви, приобретаая форму подковы. Размер вихря непосредственно перед кромкой лопатки РК составляет порядка 0,5...1 мм в диаметре. Эпицентр вихря располагается примерно на расстоянии 1 мм от входной кромки. Следует также заметить, что в вихре понижается скорость потока.

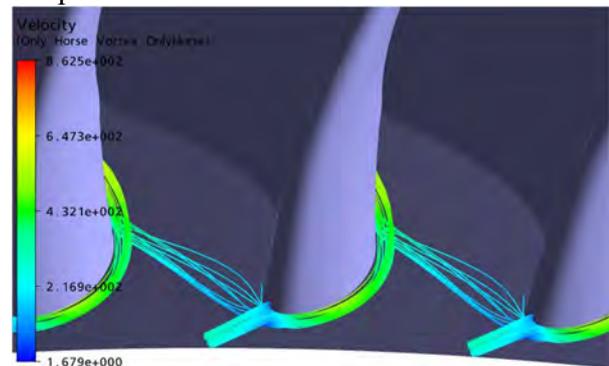


Рис. 3. Подковообразный вихрь

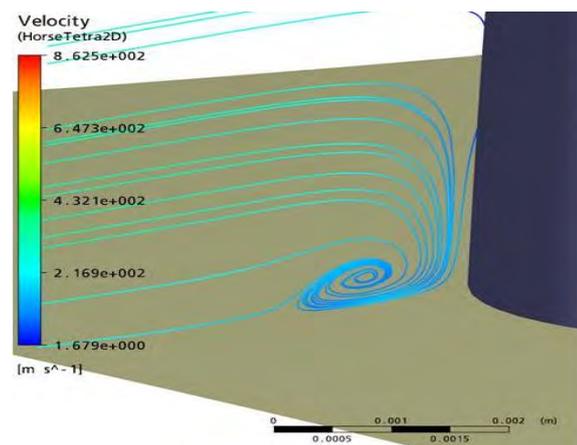


Рис. 4. Радиальное сечение подковообразного вихря

Природу образования подковообразного вихря можно объяснить следующим образом. Лопатка начинает влиять на втулочный пограничный примерно на расстоянии одного шага вверх по течению, что приводит к утолщению пограничного слоя по мере приближения к входной кромке. В то же время

должно произойти разделение пограничного слоя между спинкой и корытцем.

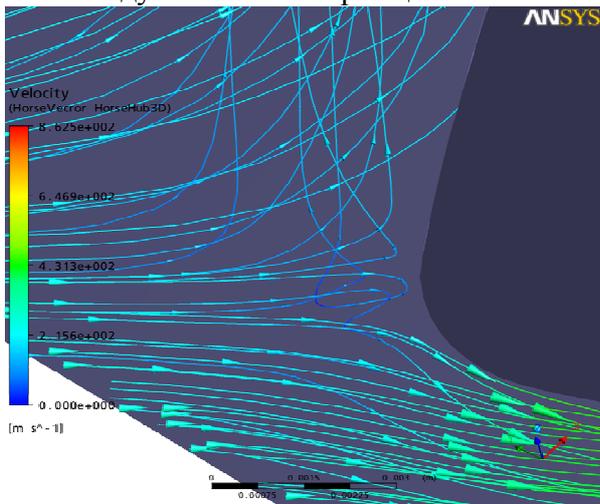


Рис. 5. Формирование подковообразного вихря

Поскольку давление во втулочном пограничном слое меньше давления торможения на входной кромке, то разделение пограничного слоя происходит на некотором расстоянии от входной кромки лопатки с образованием подковообразного вихря (рис. 6) [1].

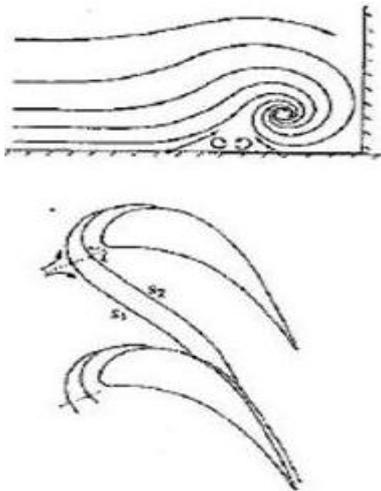


Рис. 6. Формирование подковообразного вихря

Дальнейшее поведение подковообразного вихря определяется градиентом давления, действующим между корытцем и спинкой в межлопаточных каналах. Ветвь, ушедшая после разделения на сторону спинки, прижимается поверхности лопатки. Другая ветвь (со стороны корытца) смещается к спинке соседней лопатки, пересекая межлопаточный канал (рис. 3). Пограничный слой в средней части межлопаточных каналов, с одной стороны взаимодействует с потоком, пересекающим межлопаточный канал, с

другой стороны, он также подвержен градиенту давления между спинкой и корытцем. Всё это приводит к тому, что он также разворачивается к корытцу лопатки. Как видно из рис. 7, весь пограничный слой разворачивается в сторону корытца лопатки, следовательно, в межлопаточном канале начинает под действием формироваться новый пограничный слой, который также будет разворачиваться к корытцу лопатки под действием градиента давления. Новый пограничный слой образуется из потока, текущего в межлопаточном канале.

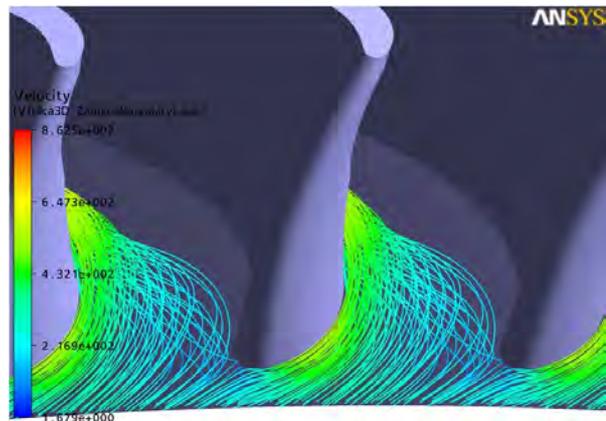


Рис. 7. Разворот концевого пограничного слоя

Достигнув спинки лопатки после пересечения межлопаточного канала, вторичные потоки начинают взаимодействовать с пограничным слоем на спинке и лопатке, а также с потоком, текущим в межлопаточном канале. Взаимодействие с основным потоком приводит к образованию межлопаточного вихря, который расположен в межлопаточном канале вблизи спинки лопатки. К тому же вторичные потоки начинают подниматься по спинке лопатки, искривляя также линии тока потока, текущего в пограничном слое спинки. Развитие межлопаточного вихря и течение на спинке лопатки показано на рис. 8. Следует заметить, что подобные потоки развиваются по длине межлопаточного канала, охватывая всё большую и большую по высоте часть спинки. У лопаток относительно малой высоты может произойти смыкание периферийного и втулочного вихрей. В рассматриваемой лопатке вторичный вихрь охватывает примерно треть высоты лопатки. По ширине межлопаточного канала размер вихря составляет примерно четверть горла.

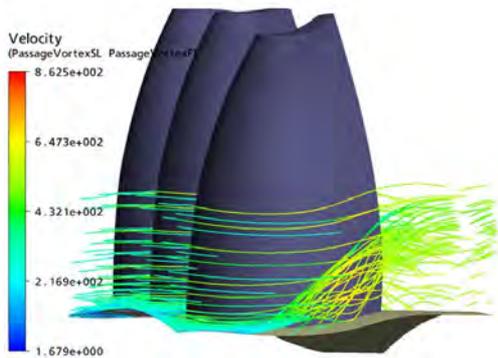


Рис. 8. Развитие втулочного вторичного вихря

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что полученная в расчете структура потока хорошо согласуется с существующими современными представлениями о физике вторичных явлений в ступени турбины [1,3]. Это позволяет говорить о том, что разработанная расчетная модель пригодна для анализа структуры потока в межлопаточном канале и оценке влияния различных мероприятий на нее. Также стоит отметить, что физическое представление о механизме вторичного течения, представленное в отечественной литературе [2] существенно отличается в сторону упрощения.

от полученного в расчете и приведенного в зарубежных источниках

Библиографический список

1. Mjustapha H, Zelesky M, Baines N Axial and radial turbines. Edwards brothers Inc USA, 2003 -358p.
2. Белоусов, А.Н. Теория и расчет авиационных лопаточных машин / А.Н. Белоусов, Н.Ф. Мусаткин, В.М. Радко. - Самара: ФГУП "Издательство Самарский дом печати", 2003. – 336 с.
3. Japike D., Baines N.C., Introduction to Turbomachinery. Concept NREC ETI INC

References

1. Mjustapha H, Zelesky M, Baines N Axial and radial turbines. Edwards brothers Inc USA, 2003 -358p.
2. Belousov A.N., Musatkin N.F. Radko V.M. Theory and calculation of aircraft turbomachine. - Samara: "Samara Publishing House Print", 2003. – 336 p.
3. Japike D., Baines N.C., Introduction to Turbomachinery. Concept NREC ETI INC

THE CALCULATED STUDY OF FLUID STRUCTURE IN A HUB AN AXIAL AVIATION TURBINE

© 2009 G. M. Popov, O. V. Baturin

Samara State Aerospace University

The paper conducts comparison of gas torrent patterns in interblade channels of a turbine stage. Received in calculation by means of CFX program with the existent physical conceptions and experimental data. The calculated torrent structure matches well the given data, and allows to study secondary torrents in an axial turbine channel in detail.

Calculation gas dynamics, turbine, ultimate elements, operating wheel, tearing off, secondary flow

Информация об авторах

Попов Григорий Михайлович, студент Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: grishtty@mail.ru. Область научных интересов: рабочие процессы в лопаточных машинах, вычислительная газовая динамика, рабочие процессы ВРД.

Батурин Олег Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры Теории двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: udet@mail.ru. Область научных интересов: рабочие процессы в лопаточных машинах, вычислительная газовая динамика, агрегаты наддува ДВС.

Popov Grigory Mihailovich, student of Samara State Aerospace University. E-mail: grishtty@mail.ru. Area of research: workflow of turbocharger, turbomachines.

Baturin Oleg Vitalievich, candidate of technical Science, associate professor of Engine Theory Department of Samara State Aerospace University. E-mail: udet@mail.ru. Area of research: workflow of turbocharger, turbomachines.