

# УЧЁТ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭФФЕКТОВ В ПЕРЕХОДНОМ КАНАЛЕ ТУРБИНЫ СОВРЕМЕННОГО АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Д.В. Ворошнин, А.С. Муравейко

ООО «НУМЕКА», Санкт-Петербург

d.voroshnin@numeca-ru.com

Применение стационарного приближения в CFD расчётах является стандартной практикой при проектировании, модернизации и доводке турбомашин, но в ряде случаев крайне важно учитывать нестационарные эффекты. На современном уровне развития вычислительной техники решение задач с использованием полной нестационарной постановки URANS занимает значительное время и требует больших вычислительных ресурсов. Применение упрощённых методов, таких как нелинейный гармонический метод, может существенно упростить процесс оценки нестационарных явлений в тракте турбомшины.

Цель работы - создание математической модели переходного канала турбины, моделирование нестационарных эффектов. Объект состоит из ротора турбины высокого давления, переходного канала с 7-ю стойками и соплового аппарата турбины низкого давления (Рис. 1).



Рис. 1. Общий вид переходного канала турбины.

Расчёты выполнены в ПО NUMECA Fine/Turbo. Решались осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса методом конечных объёмов, система замыкалась моделью турбулентности k-ε с расширенным пристеночным моделированием. Граничные условия на входе - направление потока, полное давление и температура. На выходе - статическое давление.

На первом этапе проведены трёхмерные расчёты в стационарной постановке с использованием поверхности смешения Mixing Plane на сетке в 30 млн. Положение отрыва в переходном канале свидетельствует о трехмерном характере течения (Рис. 2). Для оценки окружной неравномерности выполнено моделирование с использованием Frozen Rotor. Расчеты показали, что Frozen Rotor является отражающим условием (Рис. 3), течение в обширных безлопаточных участках моделируется некорректно

вследствие значительных отклонений направления переноса следов. Результаты подтверждены в других коммерческих кодах (ANSYS Fluent, CFX, Star CCM+).

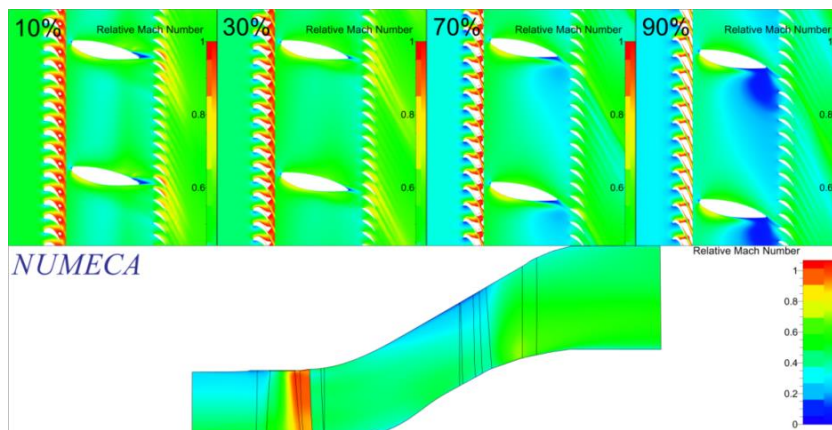


Рис. 2. Распределение числа Маха в относительном движении. Сечения по высоте канала. Осреднение в окружном направлении.

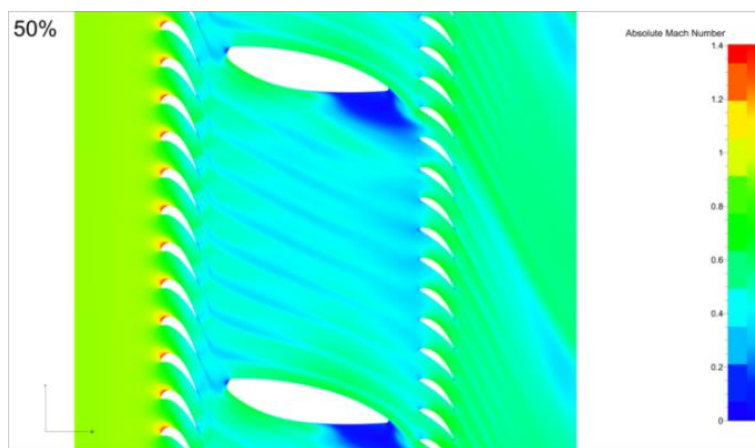


Рис. 3. Особенности моделирования течения с условием Frozen Rotor.

Для анализа нестационарных эффектов и нагрузок на лопатках проведены расчеты в полной нестационарной постановке и нелинейным гармоническим методом NLH [1, 2]. NLH метод подразумевает решение уравнений Навье – Стокса с учётом пульсационных составляющих, связанных с ротор-статор взаимодействием. Для отработки методики и сокращения времени расчёты проводились в B2B постановке (цилиндрический слой толщиной в одну ячейку).

В турбине реализуется сложное течение. Во времени интенсивность ударных волн на выходе из межлопаточного канала ротора меняется по мере приближения и отдаления от стойки. Сверхзвуковая зона у передней кромки на стойке пульсирует по мере прохождения лопаток рабочего колеса. Следы от рабочих лопаток мигрируют в меридиональном направлении и диссипируют в сопловом аппарате. Наблюдается значительная окружная неравномерность течения на выходе из соплового аппарата.

Решения, полученные NLH методом и в полной нестационарной постановке, хорошо соответствуют друг другу (Таблица 1, Рис. 4). По поверхности стойки наблюдаются значительные градиенты давления и большие амплитуды колебаний вблизи передней кромки: до 60% по давлению. Подобные результаты получены и в полной трёхмерной постановке.

Таблица 1 – Сравнение интегральных параметров

	$\epsilon_{\text{Eff}}$	$\epsilon_{\text{MF}}$	$\epsilon_{\text{Pr}^*}$	$\epsilon_{\text{Pr}}$	$\epsilon_{\text{Tr}^*}$	$\epsilon_{\text{Tr}}$
Steady/Unsteady	0.229%	0.064%	-0.105%	0.117%	-0.074%	-0.023%
NLH/Unsteady	-0.006%	0.018%	-0.007%	0.051%	-0.002%	0.009%

В рассматриваемой задаче стационарный расчёт сходится за 15 минут, NLH - за 1,5 часа, URANS - за 12 суток (i7-4771 3.5 GHz, 32 Gb RAM).

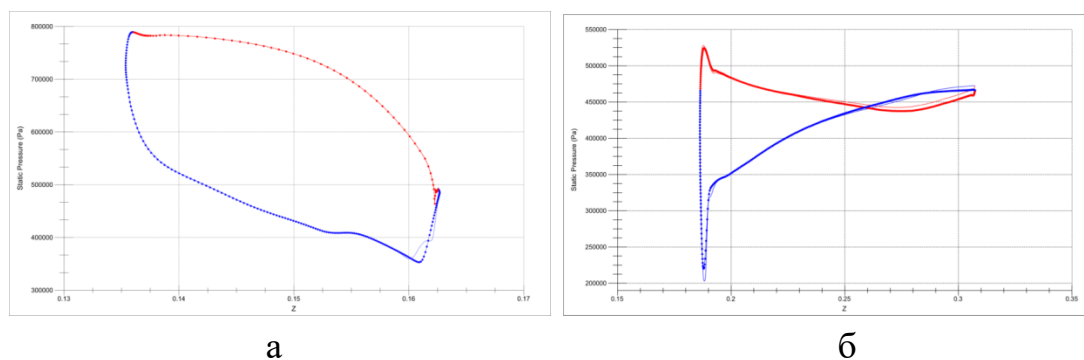


Рис. 4. Распределение статического давления: а - по лопатке РК; б - по стойке. Точки - нестационарная постановка. Линии - NLH метод.

В работе описана сложность проведения трёхмерных расчётов в полной нестационарной постановке. Проанализированы поля параметров течения, их изменение во времени, выведены нестационарные нагрузки на лопатки турбины. Выполнено сопоставление решений, полученных NLH методом и в полной нестационарной постановке. NLH может быть рекомендован как для быстрой оценки нестационарных эффектов в турбомашинах на стадии проектирования, так и для точного определения нестационарных нагрузок на элементы проточной части турбомашин.

#### Литература:

1. Chen T., Vasanthakumar P., He L., "Analysis of Unsteady Blade Row Interaction Using Nonlinear Harmonic Approach", JOURNAL OF PROPULSION AND POWER Vol. 17, No. 3, May–June 2001.
2. Vilmin, S., Lorrain, E., Hirsch, Ch., "Unsteady Flow Model across the Rotor/Stator Interface Using the Nonlinear Harmonic Method", ASME paper GT-2006-90210, 2006.

3. C. Hirsch, Numerical Computation of Internal & External Flows: the Fundamentals of Computational Fluid Dynamics, 2nd ed. (Elsevier), 2007.