

УЧЁТ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭФФЕКТОВ В ПЕРЕХОДНОМ КАНАЛЕ ТУРБИНЫ СОВРЕМЕННОГО АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В ходе работы проведены расчёты турбины в стационарной постановке, нестационарной постановке и с использованием метода нелинейного гармонического анализа (NLH). Показано, что NLH метод моделирует течение с высокой точностью. Выполнен нестационарный анализ течения в переходном канале.

В настоящее время стационарное приближение в расчётах стало стандартной практикой при проектировании, модернизации и доводке турбомашин. В ряде случаев оказывается крайне важным учёт нестационарных эффектов, реализуемых в тракте турбомашин. Например, в переходных каналах, которые характеризуются обширными безлопаточными участками, в трансзвуковых ступенях, где присутствуют сложные нестационарные ударно-волновые процессы. Но даже на современном уровне развития вычислительной техники решение задач с использованием полной нестационарной постановки URANS занимает значительное время, и необходимы большие вычислительные ресурсы из-за требований нестационарных расчётов к совпадению периодичности вычислительных сеток для венцов. Поэтому применение упрощённых методов, таких как нелинейный гармонический метод, может значительно упростить процесс оценки нестационарных явлений в тракте турбомашин.

В работе проводятся CFD расчёты турбины. Рассматриваемый объект включает в себя ротор турбины высокого давления, переходный канал с 7 стойками и сопловой аппарат турбины низкого давления (рис. 1).

Расчёты выполнены в ПО NUMECA Fine/Turbo v.9.1-3. Решались осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье — Стокса методом конечных объёмов, замыкала систему уравнений модель турбулентности $k-\epsilon$ с подключением расширенного пристеночного моделирования. Ротор—статор взаимодействие моделировалось для стационарных расчётов с помощью поверхности смешения (mixing plane) и Frozen rotor, для нестационарных расчётов были использованы условия для нелинейного гармонического метода (NLH) и Domain Scaling Method в постановке URANS. В качестве рабочего тела был выбран термически совершенный газ. Граничное условие на входе — направление потока, полное давление и температура. На выходе ставилось условие среднего статического давления.



Рис. 1. Общий вид турбины

На первом этапе проведены трёхмерные расчёты в стационарной постановке на сетке в 30 млн ячеек, подобная сетка необходима для разрешения всех особенностей течения. Турбина характеризуется значительно трёхмерным характером течения, особенно это заметно по положению отрыва в переходном канале, распределению поля числа Маха по высоте проточной части в рабочем колесе (рис. 2).

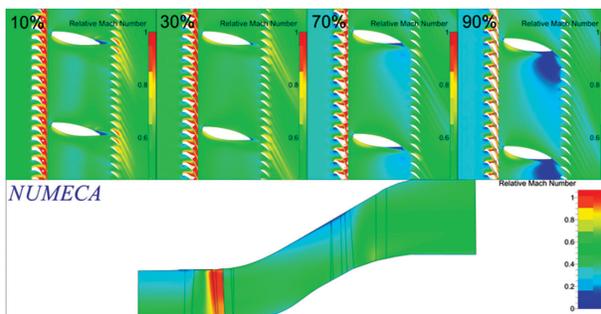


Рис. 2. Поле числа Маха в относительной системе координат в сечениях и осреднённое в окружном направлении

Чтобы смоделировать окружную неравномерность течения посчитана стационарная постановка с использованием «Frozen Rotor», но течение в переходном канале при этом моделируется нефизичное: ударные волны отражаются от интерфейса «ротор—статор» и искажается направление переноса окружной неравномерности (следов) при переходе через интерфейс (на рис. 3,а показано поле числа Маха). Для подтверждения полученных результатов выполнены расчеты ряда тестовых задач. Результаты подтвердили, что условия «Frozen Rotor» отражающие (рис. 3,в) и решение в обширных безлопаточных участках моделируется некорректно, вследствие значительных отклонений направления переноса следов (рис. 3,б). Результаты подтверждены также и в других коммерческих кодах: ANSYS Fluent и CFX.

Таким образом, стационарные расчёты с использованием условия Mixing Plane неприменимы для решения рассматриваемой задачи, так как не моделируется окружная неравномерность. Расчёты с использованием условия Frozen Rotor также неприменимы в связи с вышеперечисленными особенностями. По этим причинам и для оценки нестационарных эффектов в турбине использованы методы, которые явно учитывают ротор—статор взаимодействие и в которых влияние интерфейса «ротор—статор» на решение минимально. В работе рассматривается два метода: полная нестационарная постановка и нелинейный гармонический метод (NLH) [1, 2]. NLH метод подразумевает решение уравнений Навье — Стокса с учётом пульсационных составляющих, связанных с ротор—статор взаимодействием. Пульсации представляются как сумма гармоник. Чтобы отработать методику постановки задачи расчёта с явным учётом ротор—статор взаимодействия и сократить время счёта, расчёты проведены в В2В постановке.

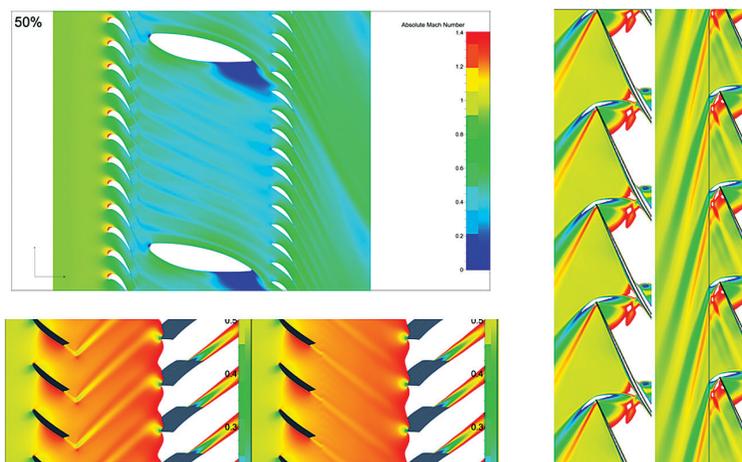


Рис. 3. Особенности моделирования течения с условием Frozen Rotor

Результаты расчётов показали, что 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 мимо неё. Следы от лопаток ротора мигрируют в меридиональном направлении и диссипируют в сопловом аппарате. Наблюдается значительная окружная неравномерность течения на выходе из соплового аппарата.

Решения, полученные с помощью NLH метода и полной нестационарной постановки, хорошо соответствуют друг другу (рис. 4). Течение в рабочем коле-

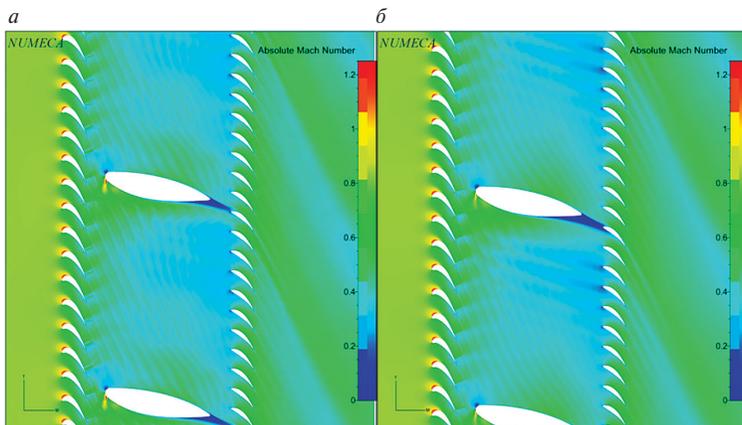


Рис. 4. Абсолютное число Маха для мгновенного NLH решения (а) и нестационарного решения (б)

се моделируется одинаково. Положение, размер, интенсивность сверхзвуковой зоны около передней кромки на стойке моделируется схожим образом для двух методов. Размеры отрывов за стойкой практически идентичны.

Осреднённое распределение статического давления по поверхности лопатки ротора для полной нестационарной постановки и решения NLH методом практически одинаковы, за исключением незначительных отличий вблизи задней кромки (рис. 5).

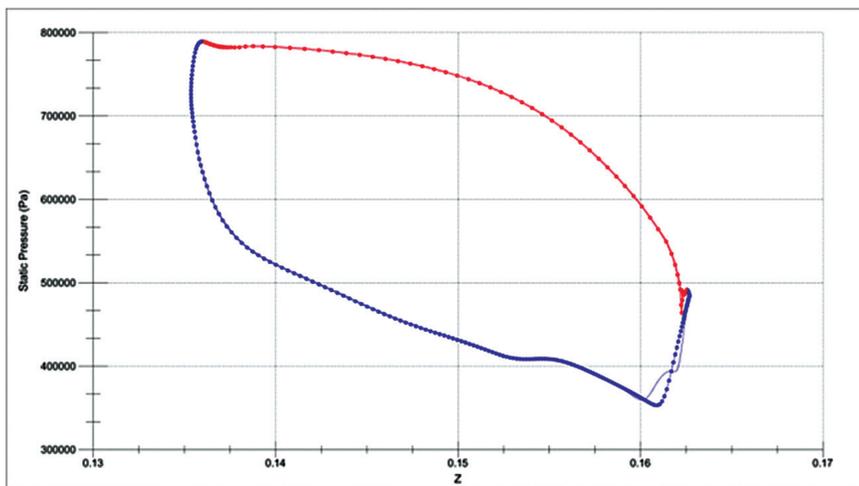


Рис. 5. Распределение статического давления по лопатке рабочего колеса.

Линии с точками — нестационарная постановка, линии без точек — NLH метод.

Во времени распределение давления на лопатке ротора по стороне сжатия меняется слабо, на стороне разрежения происходят наиболее интенсивные колебания параметров из-за взаимодействия нестационарных ударных волн и поверхности лопатки. Вблизи задней кромки по поверхности лопатки выявлены большие амплитуды колебаний давления (до 20%).

На рисунке 6 представлено осреднённое распределение давления по поверхности стойки. Результаты почти эквивалентны для обеих постановок с явным учетом «ротор—статор» взаимодействия.

По поверхности стойки наблюдаются значительные градиенты давления, а также большие амплитуды колебаний вблизи передней кромки — до 60% по давлению.

Для лопаток соплового аппарата характерно небольшое колебание давления вблизи передней кромки, порядка 7%.

Решение в полной нестационарной постановке показало интегральные параметры, очень близкие к решению, полученному с помощью NLH метода (табл. 1). В среднем параметры нелинейного гармонического метода на порядок ближе к полной нестационарной постановке по сравнению со стационарной.

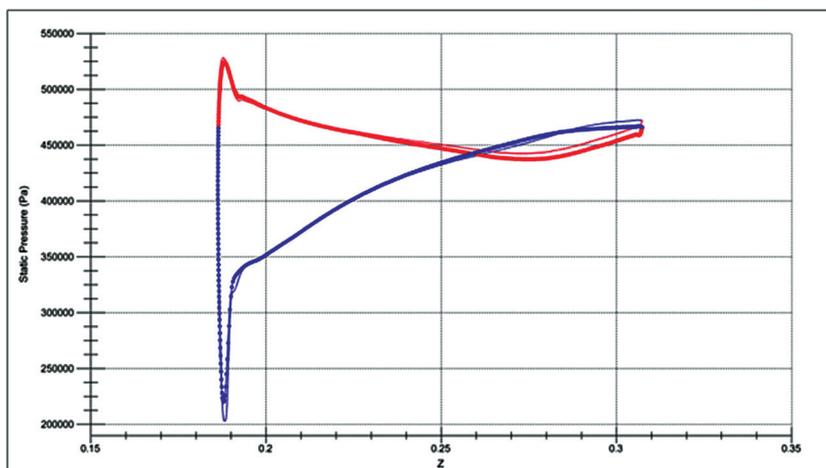


Рис. 6. Распределение статического давления по стойке.

Линии с точками — нестационарная постановка, линии без точек — NLH метод.

Таблица 1

Отличие интегральных параметров относительно параметров нестационарного расчёта

	ϵ_{Eff}	ϵ_{MF}	ϵ_{Pr^*}	ϵ_{Pr}	ϵ_{Tr^*}	ϵ_{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%
Unsteady	—	—	—	—	—	—

Немаловажным при выборе метода является время, требуемое для получения решения. Для достижения сходимости нестационарного расчёта нужно 3600 временных шагов, при этом необходимо 100 внутренних итераций, так как при меньшем количестве поле течения не разрешается за один временной шаг (количество итераций: $N_{it} = N_r \times N_t \times N_p \times N_{inner} = 9 \times 20 \times 20 \times 100 = 3600 \times 100$, где N_r — количество моделируемых лопаток ротора, N_t — количество положений ротора, N_p — число повторения периодики, N_{inner} — количество внутренних итераций). При переходе к трёхмерным расчётам подобные требования приводят к существенным трудностям моделирования течения в постановке URANS: необходимо очень много машинного времени и ресурсов для получения решения. В то же время нелинейный гармонический метод не требует совпадения периодичности сетки для венцов. Таким образом, необходим всего один межлопаточный канал, и решение получается за существенно меньшее время. Например, для рассматриваемой задачи стационарный расчёт сходится за 15 минут, решение NLH методом получается за 1,5 часа, в то же время нестационарный расчёт сходится примерно за 12 суток (i7-4771 3.5 GHz, 32 Gb RAM).

В ходе работы описана сложность проведения трёхмерных расчётов в полной нестационарной постановке, обоснована необходимость расчётов с помощью нелинейного гармонического метода. Отработана методика расчёта турбины с учётом нестационарных эффектов NLH методом. Показаны поля параметров течения, их изменение во времени, выведены нестационарные нагрузки на лопатки турбины. Выполнено сопоставление решения, полученного NLH методом и в полной нестационарной постановке, которое показало хорошее соответствие как полей течения, так и интегральных характеристик. Нелинейный гармонический метод 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, N 3. 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. *Japikse D., Nicholas C. Baines.* Introduction to Turbomachinery. Concepts ETI, Inc., 1997.
4. *Hirsch C.* Numerical Computation of Internal & External Flows: the Fundamentals of Computational Fluid Dynamics: 2nd ed. Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2007.
5. Flow Integrated Environment: User Manual / Numeca Int. Brussels (Belgium), 2014.
6. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа. М.; Л.: Гостехиздат, 1950.

УДК 621.431.75

Д. В. Ворошнин, И. Н. Клочков, И. М. Лакомова, О. В. Маракуева

ООО «НУМЕКА», Санкт-Петербург

contact@numeca-ru.com

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ТУРБОМАШИН. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ В ЦИКЛЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТУРБОМАШИН

В работе рассматриваются современные тенденции использования вычислительных методов в практике проектирования турбомашин, в том числе в процессе оптимизации по газодинамическим параметрам. Приводятся результаты оптимизации рабочего колеса осевого компрессора и ступени турбины с использованием ПК Fine/Turbo и ПО IOSO с соответствующей им валидацией расчетов, представлена оптимизация осевой турбины с низкими резервами повышения эффективности.