

Д. В. Ворошин, О. В. Маракуева, А. С. Муравейко

ООО «НУМЕКА», Санкт-Петербург

contact@numeca-ru.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ОСЕВОМ ЧЕТЫРЕХСТУПЕНЧАТОМ КОМПРЕССОРЕ

Аннотация. Выполнено моделирование течения в четырехступенчатом осевом компрессоре с использованием нескольких нестационарных подходов: в полной нестационарной постановке (URANS) и нелинейным гармоническим методом (NLH) с различным количеством гармоник. Проведено сопоставление осредненных, нестационарных интегральных параметров и характеристик компрессора, проанализированы пульсации локальных параметров.

Для повышения качества проектирования турбомашин необходимо использовать современные инструменты при анализе течения в проточной части, в том числе учитывающие нестационарные эффекты, которые могут значительно влиять на характер течения и интегральные параметры. Решение задач с использованием полной нестационарной постановки URANS занимает значительное время и требует больших вычислительных ресурсов. Применение упрощенных подходов, таких как нелинейный гармонический метод (NLH), может существенно упростить процесс оценки нестационарных явлений в тракте турбомашин.

В процессе моделирования течений в ряде многоступенчатых осевых компрессоров с помощью метода NLH наблюдалось завышение КПД и занижение степени повышения полного давления относительно результатов стационарного подхода, в котором применялось граничное условие поверхности смешения (Mixing Plane). Поэтому целью данной работы является сравнение результатов полной нестационарной постановки и нелинейного гармонического метода, реализованного в ПО *NUMECA FINE/Turbo*, для оценки эффективности использования метода NLH.

Рассматриваемый объект — первые четыре ступени, выделенные из двенадцатиступенчатого осевого компрессора. Количество лопаток скорректировано для обеспечения совпадения периодичности сеточных секторов межлопаточных каналов в каждом венце, что позволяет сократить количество моделируемых межлопаточных каналов при использовании URANS подхода (рис. 1).



Рис. 1. Четырехступенчатый осевой компрессор

Применялись следующие методы:

- URANS;
- NLH basic, в котором учитываются возмущения только от соседних венцов. Проведено три расчета данным подходом: каждое возмущение описывалось 3, 5 и 7 гармониками;
- NLH multi-rank 2, где учитываются возмущения от соседних венцов и венцов, расположенных через один, 3 гармоники на каждое возмущение.

Расчеты выполнены в ПО NUMECA FINE/Turbo v.11.1, которое включает в себя:

- блочно-структурированный автоматический сеточный генератор *AutoGrid5*;
- препроцессор *Fine/Turbo*, 3D структурированный решатель *Euranus*;
- постпроцессор *CFView*.

Решались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье — Стокса методом конечных объемов, для замыкания системы уравнений использовалась модель турбулентности $k-\epsilon$ с подключением расширенного пристеночного моделирования.

В качестве модели рабочего тела выбран термически совершенный газ.

Ротор-статор взаимодействие моделировалось с помощью поверхности смешения (Mixing Plane) в стационарной постановке, Non Reflecting Mixing Plane в случае расчетов NLH методом и Domain Scaling Method в нестационарной постановке.

Расчетные сетки — блочно-структурированные гексагональные с тремя уровнями вложенности. Количество ячеек, количество моделируемых межлопаточных каналов и время счета представлено в таблице 1.

Сведения о количестве моделируемых межлопаточных каналов, сетке и времени счета

	ВНА	ПК1	НА1	ПК2	НА2	ПК3	НА3	ПК4	НА4	Сетка (млн)	Время счета (ч)
URANS	2	2	3	2	3	3	3	3	3	31.2	156
NLH	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11.7	15-30*

* Зависит от количества гармоник и метода (Basic или multi-rank 2).

Тенденции в различии интегральных параметров, полученных с применением NLH basic с тремя гармониками и в стационарной постановке, сохранилась и для четырехступенчатой модели (рис. 2.): увеличение расхода и КПД, уменьшение максимальной степени повышения полного давления. Однако интегральные параметры, полученные всеми методами, учитывающими нестационарные эффекты, отлично согласуются друг с другом (расчеты выполнены для расхода 9,65 кг/с) (рис. 3). На графиках также отображены диапазоны колебаний π^* и КПД компрессора для различных постановок. В таблице 2 приведены диапазоны колебаний интегральный параметров компрессора.

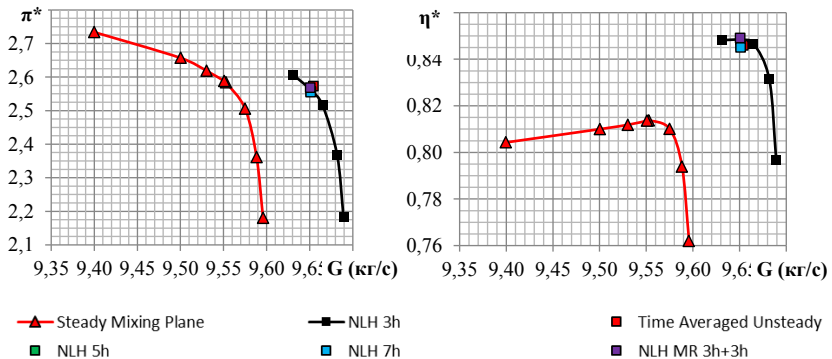


Рис. 2. Интегральные характеристики компрессора

Интегральные параметры компрессора

	Осредненные параметры		Диапазон колебаний	
	π^*	КПД (%)	π^*	КПД (%)
UNSTEADY	2,58	84,6	2,51–2,64 (5,1 %)	83,9–85,2 (1.3)
NLH 3h	2,56	84,8	2,54–2,59 (2 %)	84,8–84,9 (0.1)
NLH 5h	2,56	84,6	2,54–2,58 (1,9 %)	84,55–84,62 (0.07)
NLH 7h	2,56	84,5	2,53–2,58 (2 %)	84,45–84,54 (0.09)
NLH rank-2 3h	2,57	84,9	2,54–2,58 (1,5 %)	84,8–84,93 (0.13)
NLH rank-2 3h with interaction	2,57	84,9	2,54–2,58 (1,5 %)	84,6–84,71 (0.11)

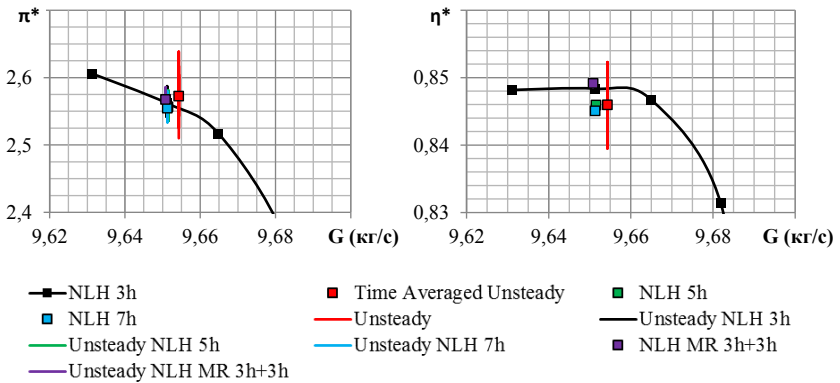


Рис. 3. Интегральные характеристики, полученные в нестационарных постановках

В периферийной области первого рабочего колеса реализуется большой пульсирующий отрыв потока на стороне сжатия, обусловленный избыточной закруткой потока в ВНА, он одинаково моделируется как с помощью URANS, так и с помощью NLH-метода (рис. 4). В целом течения в обеих постановках качественно схожи.

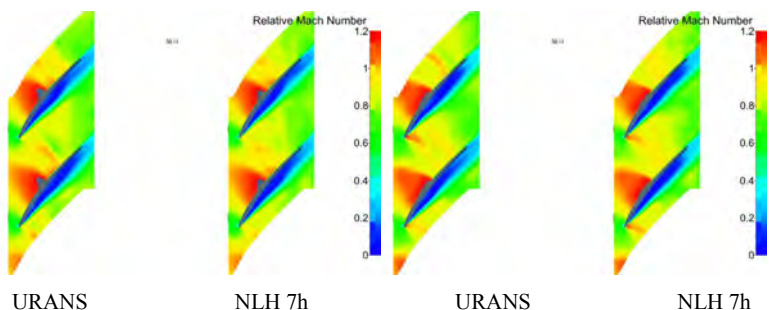


Рис. 4. Поле числа Маха в относительной системе отсчета в разные моменты времени

Проведено сравнение распределений статического давления на интерфейсах ротор-статор, полученных различными методами. Между входным направляющим аппаратом и рабочей лопаткой первой ступени поля отлично согласуются (рис. 5), так же незначительна разница и между направляющим аппаратом второй ступени и рабочей лопаткой третьей ступени.

На интерфейсе между направляющим аппаратом третьей ступени и рабочим колесом четвертой ступени разница существенна (рис. 6). В полной нестационарной постановке присутствует мгновенная окружная неравномерность, в то время как NLH метод в силу постановки не может смоделировать подобные явления, так как они являются следствием разного количества лопаток в первых двух ступенях.

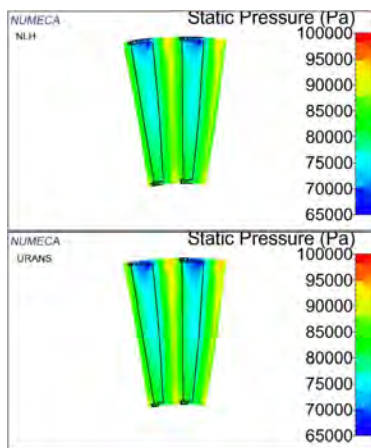


Рис. 5. Мгновенное поле статического давления между ВНА и РК1

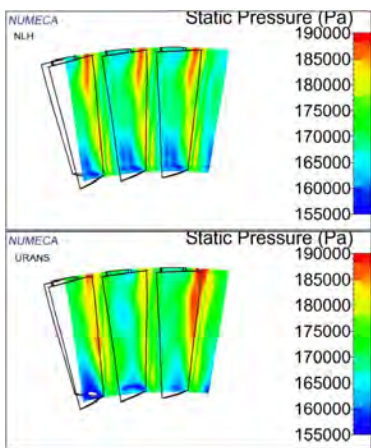


Рис. 6. Мгновенное поле статического давления между НА3 и РК4

Проведен анализ пульсаций давления в точках на передних кромках трех лопаток направляющего аппарата второй ступени (рис. 7). Замеры взяты за один период задачи, период = $1/20$ оборота = 0,000154 с. Если распределение давления в данных трех точках наложить друг на друга с учетом сдвига фаз, то в случае полной нестационарной постановки все кривые заметно раздвигаются (рис. 8), что подтверждает факт наличия окружной неравномерности. В случае же NLH multi rank 2 кривые практически совпадают (рис. 9), т. е. часть окружной неравномерности в этом подходе не отслеживается в силу постановки.

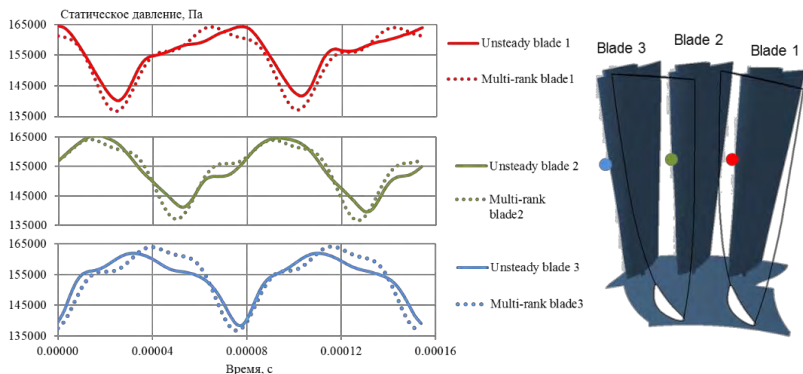


Рис. 7. Сопоставление изменения давления на лопатках HA2 вблизи передней кромки

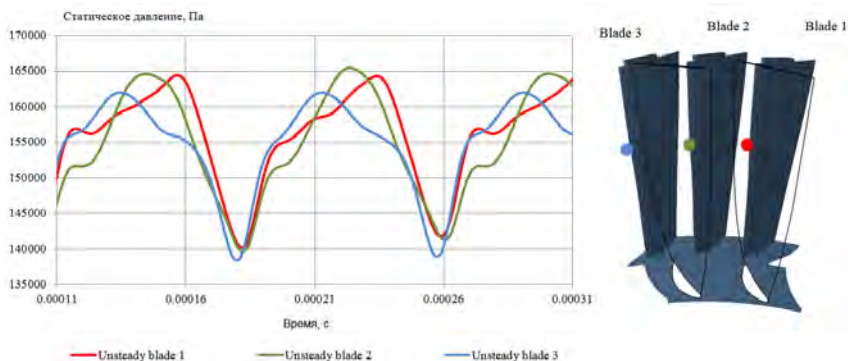


Рис. 8. Изменение давления на лопатках HA2 вблизи передней кромки, моделируемое в URANS

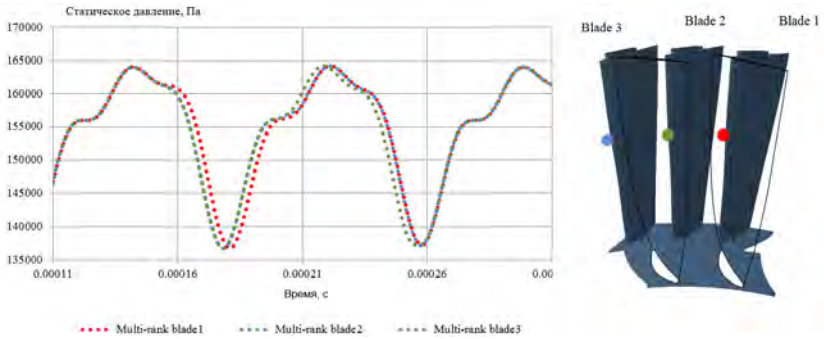


Рис. 9. Изменение давления на лопатках HA2 вблизи передней кромки, моделируемое в NLH

В процессе исследования показано, что интегральные параметры, полученные NLH-методом, совпадают с результатами URANS с большой точностью, занижение КПД в стационарной постановке является результатом математического осреднения, что ведет к появлению дополнительных ошибок при моделировании течения. NLH не позволяет моделировать окружную неравномерность, связанную с взаимодействием всех венцов, но во многих случаях данная неравномерность практически не играет роли, потому что, как правило, количество лопаток в венцах компрессора выбирается некратным, что препятствует сильному проникновению окружной неравномерности вглубь тракта многоступенчатого компрессора.

Литература

1. Камнсти Н. Аэродинамика компрессоров / перевод под ред. Ф. Ш. Гельмедова. — М.: Мир, 2000.
2. Hirsch C. Numerical Computation of Internal & External Flows: the Fundamentals of Computational Fluid Dynamics, 2nd ed. Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2007.
3. Japikse D. Nicholas C. Baines "Introduction to Turbomachinery", Concepts ETI, Inc., 1997.
4. NUMECA Int., "Flow Integrated Environment", User Manual, Numeca Int., Brussels, Belgium, 2014.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. 3-е издание. — М.: Наука, 1974.
6. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.-Л.: Гостехиздат, 1950.