

УДК 621.165:51.380

А.В. РУСАНОВ, С.В. ЕРШОВ

ООО «FlowER», Украина

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАНУ, Украина

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ТРЕХМЕРНЫХ ВЯЗКИХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ЛОПАТОЧНЫХ АППАРАТАХ

Рассматриваются трехмерные вязкие нестационарные течения газа в лопаточных аппаратах турбомашин. Моделирование потока осуществляется решением осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Исследуется тонкая структура пространственного течения, в том числе и при нестационарном взаимодействии решеток направляющего аппарата и рабочего колеса.

численное моделирование, уравнения Навье-Стокса, лопаточный аппарат, трехмерное вязкое течение, периодически нестационарное взаимодействие, вторичные течения

Введение

В настоящее время достаточно широко распространена практика моделирования течений на основе численного интегрирования уравнений Рейнольдса, что дает возможность проводить укрупненный анализ течения – на уровне выделения отрывов, скачков уплотнения, зон ускорения или торможения потока и т.д. Однако, возможности современной вычислительной газодинамики значительно шире и уже позволяют выполнять детальный анализ сложной структуры трехмерного течения для понимания физики процессов, получать не только качественно, но и количественно точный результат.

При движении лопаточных аппаратов относительно друг друга происходит их аэродинамическое взаимодействие, проявляющееся, в частности, в возникновении периодической нестационарности течения. Такое взаимодействие влияет на осредненные по времени характеристики отдельных решеток и проточной части в целом, вызывает переменные аэродинамические нагрузки, действующие на лопатки, а в охлаждаемых ступенях турбин приводит к температурной сегрегации потока. Рассматриваемому вопросу посвящен ряд экспериментальных работ [1 – 3] и др., однако проведение физического экспе-

римента для исследования такого тонкого и сложного явления, как нестационарное аэродинамическое взаимодействие лопаточных венцов, сопряжено с рядом технических трудностей. Поэтому в последнее время для его изучения все чаще используется численное моделирование на основе интегрирования уравнений течения вязкого газа [4, 5] и др. Нестационарность течения, возникающая при аэродинамическом взаимодействии, обусловлена, главным образом, тремя факторами [6]:

- 1) потенциальной неравномерностью;
- 2) вязкими кромочными следами;
- 3) ударными волнами (при трансзвуковых скоростях течениях в осевых зазорах).

В работе наибольшее внимание уделено исследованию вязких следов, так как их непосредственное влияние, по сравнению с потенциальной неравномерностью и ударными волнами, наблюдается на достаточно больших расстояниях от источника их генерации.

Неотъемлемой частью пространственных течений в межлопаточных каналах турбомашин являются вторичные течения. Прежде всего, они вносят существенный вклад в потери кинетической энергии, однако, этим их влияние на поток не ограничи-

вается. При попадании кромочных следов в область вторичных течений происходит значительное изменение структуры последних, что сказывается как на нестационарных нагрузках, так и на температурных пульсациях. В работе приведен анализ структуры вторичных течений и рассмотрен вопрос влияния кромочных следов при их прохождении через решетки, стоящие ниже по потоку, что помогает понимать физику течения и оценивать качество обтекания лопаточных аппаратов.

1. Численная модель

Для выполнения газодинамических расчетов вязкого трехмерного нестационарного потока в проточных частях турбомашин использовался разработанный авторами программный комплекс *FlowER-U* [7]. Течение газа описывается осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса. Моделирование турбулентности осуществляется с помощью дифференциальной двухпараметрической модели Ментера (SST) [8]. Исходные уравнения решаются численно неявной ENO схемой второго порядка аппроксимации [9]. Комплекс позволяет учитывать выдувы охлаждающего воздуха с поверхностей меридиональных обводов и лопаток, надбандажные, диафрагменные протечки и течение в радиальном зазоре. Для строгого учета нестационарного аэродинамического взаимодействия лопаточных аппаратов необходимо проводить расчет во всех межлопаточных каналах каждого венца с учетом изменения взаимного положения решеток во времени. Такой подход требует больших вычислительных затрат, и расчеты, выполняемые на его основе, пока нельзя широко использовать в практике проектирования. В работе применен альтернативный подход, использующий обобщенное условие пространственно-временной периодичности течения [10, 11], что дает возможность включать в расчетную область только по одному межлопаточному каналу каждого венца.

2. Численные результаты

2.1. Структура вторичных течений в прямой турбинной решетке

Геометрические характеристики решетки и результаты ее экспериментального исследования подробно описаны в работах [12, 13]. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по интегральным характеристикам приведено в работе [14].

На рис. 1 показано сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными по изолиниям потерь полного давления в поперечном сечении на расстоянии 42% ширины решетки за выходными кромками для двух режимов обтекания.

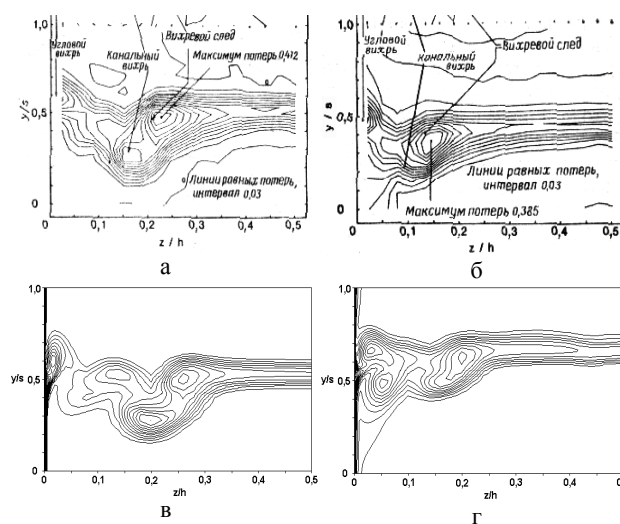


Рис. 1. Потери полного давления: а, б – эксперимент; в, г – расчет; а, в – номинальный режим; б, г – режим угол атаки – 23°

Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными, прослеживается положение основных вихревых образований, вызванных вторичными течениями.

На рис. 2 показана визуализация структуры вторичных течений, полученная по результатам расчета и в эксперименте, а также эскизная интерпретация экспериментальных данных. Перед входной кромкой вблизи торцевой поверхности видно положение седловой точки, от которой отходит две ветви подковообразного вихря. Ветвь подковообразного вихря, приходящая со стороны разрежения, затекает на

сторону разрежения несколько раньше, чем ветвь, приходящая со стороны давления. Этот факт отмечен также и на эскизе анализа эксперимента. Таким образом, численные результаты качественно правильно описывают этот вихрь. В подковообразный вихрь сворачивается поток, приходящий с пограничным слоем по всей ширине решетки. За подковообразным вихрем наблюдается перетекание от стороны давления на сторону разрежения, образующее канальный вихрь. Сложно точно выделить линию раздела, где заканчивается подковообразный вихрь и начинается канальный. Тем не менее, очевидно, что канальный вихрь следует за подковообразным, а пограничный слой в канальном вихре – это вновь образовавшийся пограничный слой, «старый» же свернулся вокруг подковообразного вихря. Необходимо отметить согласование результатов расчета и эксперимента. Также наблюдается угловой вихрь, который начинает формироваться после затекания подковообразного вихря на сторону разрежения. Таким образом, можно сделать вывод, что численный эксперимент с использованием CFD позволяет изучать тонкую структуру течения в межлопаточных каналах турбомашин.

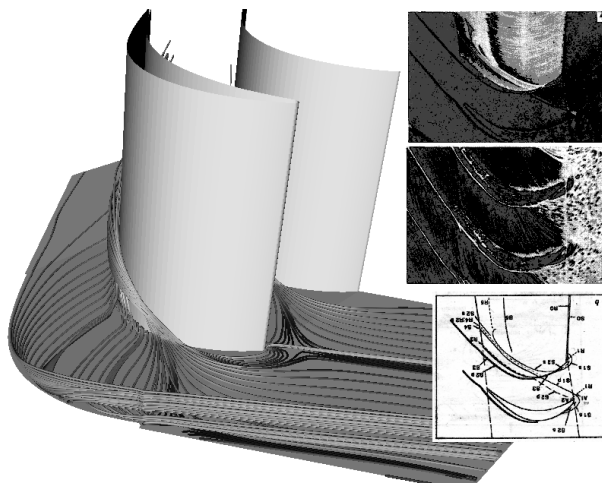


Рис. 2. Структура вторичных течений

2.2. Периодически нестационарное обтекание турбинной ступени

Выполнено численное исследование периодически нестационарного обтекания турбинной ступени

с охлаждаемыми лопатками статора, геометрические и газодинамические характеристики которой приведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические и газодинамические характеристики турбинной ступени

Параметр	Статор	Ротор
Количество лопаток	68	94
Относительная высота лопатки (по среднему сечению)	1,55	2,36
Относительный шаг решетки (по среднему сечению)	0,98	0,87
Высота лопатки [мм]	101	126
Корневой диаметр [мм]	633	629
Частота вращения [об/мин]	–	5150
Осевой зазор [мм] (по среднему сечению)	21,4	
Полное давление на входе [МПа]	0,63726	
Полная температура на входе [К]	1213	
Статическое давление на выходе [МПа]	0,2225	
Массовый расход охлаждающего воздуха, % от общего расхода	2,7	
Температура охлаждающего воздуха [К]	723	

На рис. 3 изображены изолинии энтропийной функции в среднем сечении РК для четырех моментов времени на периоде.

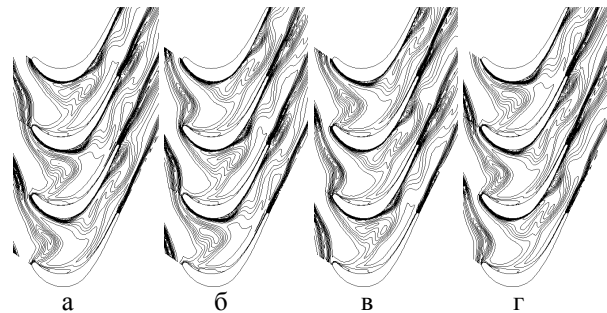


Рис. 3. Энтропийная функция. Прохождение следов: а – $t = 0$; б – $t = 0,25T$; в – $t = 0,5T$; г – $t = 0,75T$

Представленная картина визуализирует процесс прохождения охлажденных кромочных следов через межлопаточный канал РК. После попадания следа в межлопаточный канал РК он перерезается лопаткой и прижимается к стороне разрежения. Вблизи стороны разрежения, где скорость выше, чем в ядре потока, и у стороны давления, происходит смыкание следов.

На рис. 4 представлены отклонения векторов

скорости от значений, осредненных по времени в среднем сечении РК для четырех моментов времени на периоде.

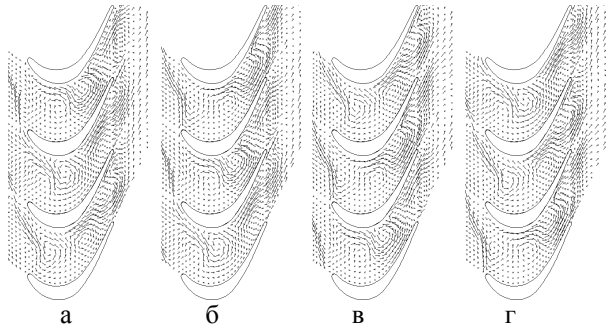


Рис. 4. Отклонения векторов скорости от среднего значения: а – $t=0$; б – $t=0,25T$; в – $t=0,5T$; г – $t=0,75T$

Из представленного рисунка хорошо видно, что в областях прохождения следа возникают «обратные» течения, которые инициируют образование вихревых зон. Наличие кромочных следов вызывает дополнительное перетекание потока в радиальном направлении. Так при попадании на поверхность лопатки РК кромочный след от НА за счет центробежных сил отбрасывается к периферии. Кроме того, в самом следе в случае не осевого направления потока, имеет место перетекание к корневым сечениям (рис. 5). Это связано с локальным нарушением условия радиального равновесия в следе.

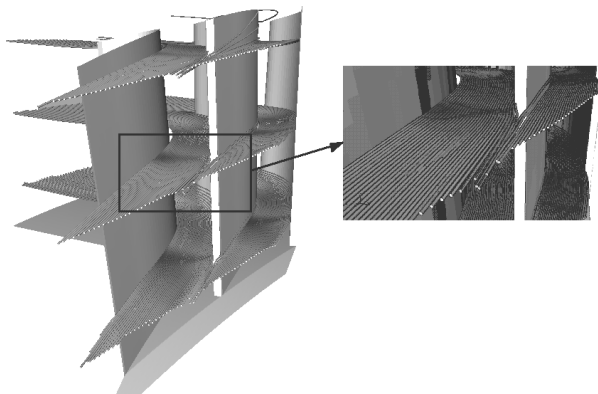


Рис. 5. Линии тока. Статор

На рис. 6 показана картина изменения структуры вторичных течений в роторе в зависимости от момента времени на периоде. Видно, что картина течения меняется существенным образом, причем при попадании в зону вторичных течений охлажденного кромочного следа последний сносится на

сторону разрежения лопатки, что приводит к усилению температурных пульсаций на поверхности лопатки ротора.

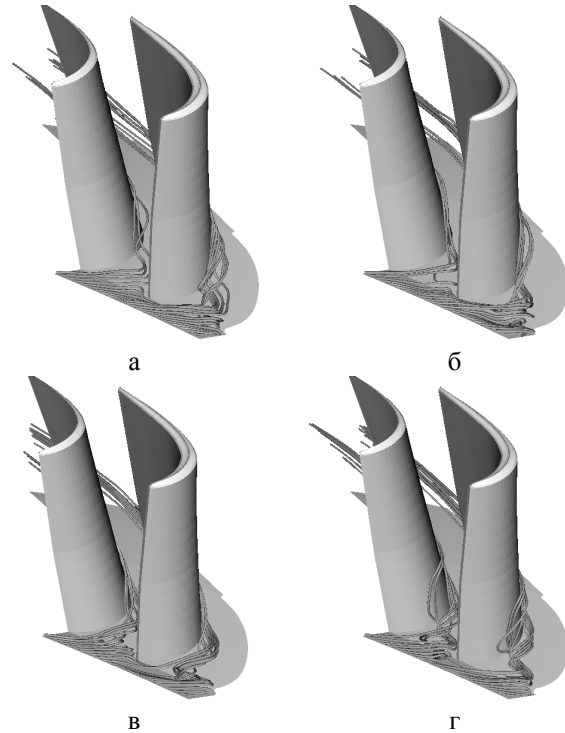


Рис. 6. Линии тока. Ротор
а – $t=0$; б – $t=0,25T$; в – $t=0,5T$; г – $t=0,75T$

На поверхности лопатки возникают существенные пульсации статической температуры по времени, что и продемонстрировано на рис. 7. Здесь видно, что пульсация температуры на стороне разрежения достигает 90 градусов, а разность температур между сторонами лопатки доходит до 100 градусов.

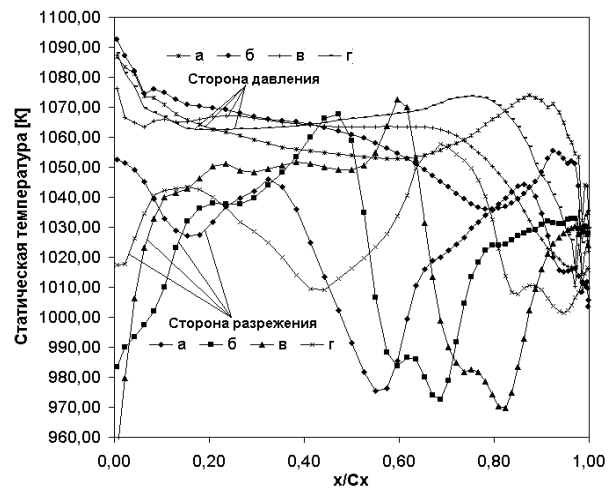


Рис. 7. Статическая температура:
а – $t=0$; б – $t=0,25T$; в – $t=0,5T$; г – $t=0,75T$

Минимум температуры находится на стороне разрежения в вихревой зоне расположенной «между» двумя следами. Как показал анализ течения, в эту зону приходит охлажденный след, расположенный на меньшем радиусе.

Заключение

Выполнены расчеты прямой решетки и турбинной ступени с учетом периодически нестационарного взаимодействия лопаточных венцов. Используемая математическая модель позволяет исследовать тонкие газодинамические эффекты течения в межлопаточных каналах турбомашин. Вязкие кромочные следы вызывают существенное «усиление» трехмерности течения.

Литература

1. Dunn M.G. Convective Heat Transfer and Aerodynamics in Axial Flow Turbines // Proc. ASME TURBO EXPO 2001, June 4 – 7, New Orleans, Louisiana, USA (ASME Paper 2001-GT-0506). – 2001. – 63 p.
2. Kerrebrock J.L., Mikolajczak A.A. Intra-Stator Transport of Rotor Wakes and Its Effect on Compressor Performance // ASME J. Eng. for Power. – 1970. – 92, № 2. – P. 359 – 369.
3. Saren V.E., Savin N.M., Dorney D.J., Sondak D.L. Experimental and Numerical Investigation of Airfoil Clocking and Inter-Blade-row Effects on Axial Compressor Stage Performance. – AIAA 98-3413. – 1998. – 13 p.
4. Rusanov A.V., Yershov S.V. Numerical method for calculation of 3d viscous turbomachine flow taking into account stator / rotor unsteady interaction // The 4th Colloq. Process Simulation, ed. A. Jokilaakso, 11 – 13 June 1997. – Espoo, Finland. – 1997. – P. 179 – 197.
5. Самойлович Г.С. Возбуждение колебаний лопаток турбомашин. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
6. Jung A.R., Mayer J.F., Stetter H. Simulation of 3D-Unsteady Stator/Rotor Interaction in Turbomachinery Stages of Arbitrary pitch ratio. – ASME Paper 96-GT-069. – 1996. – 12 p.
7. Русанов А.В., Ершов С.В. Метод расчета трехмерных турбулентных течений в проточных частях произвольной формы // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Сб. научн. тр. ИПМаш НАН Украины. – 2003. – Т. 1. – С. 132 – 136.
8. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA J. – 1994. – 32, № 8. – P. 1598 – 1605.
9. Ершов С.В. Квазилинейная ENO схема повышенной точности для интегрирования уравнений Эйлера и Навье-Стокса // Мат. моделирование. – 1994. – 6, № 11. – С. 58 – 64.
10. Erdos J., Alzner E. Computation of Unsteady Transonic Flows through Rotating and Stationary Cascades. Vol. 1. Method of Analyses. – NASA CR 2900, 1977. – 120 p.
11. Соколовский Г.А., Гнесин В.И. Нестационарные трансзвуковые и вязкие течения в турбомашинах. – К.: Наук. думка, 1986. – 264 с.
12. Ходсон Х.П., Домини Р.Дж. Пространственное течение в решетке профилей турбины низкого давления на расчетном режиме // Тр. амер. об-ва инж.-мех. Энергет. машины и установки. – 1988. – № 2. – С. 116 – 126.
13. Ходсон Х.П., Домини Р.Дж. Характеристики турбинной решетки при низких давлениях на нерасчетном режиме // Тр. амер. об-ва инж.-мех. Энергет. машины и установки. – 1988. – № 2. – С. 127 – 137.
14. Русанов А.В. Апробація чисельної моделі в'язкої турбулентної течії газу в широкому діапазоні режимних параметрів // Зб. наук. праць ХІ ВПС. – 2004. – Вип. 2 (11). – С. 3 – 9.

Поступила в редакцию 2.06.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Л. Шубенко, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.