

УДК 621.165+621.438

С.В. ЕРШОВ, В.А. ЯКОВЛЕВ

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина

О ВЫБОРЕ СТЕПЕНИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СЕТКИ ПРИ РАСЧЕТАХ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОГО ГАЗА В ТУРБОМАШИНАХ

Рассматривается вопрос выбора степени измельчения разностной сетки при расчетах трехмерных течений вязкого газа в турбомашинных с использованием моделей течения RANS и численных методов второго порядка. Выполнены расчеты течений через турбинные и компрессорные решетки на последовательно измельчающихся сетках. Проведено сопоставление полученных результатов, как по качественному разрешению сложной структуры трансзвуковых потоков, так и по количественной оценке потерь. Показано, что для научных исследований трехмерных течений имеет смысл использовать разностные сетки с количеством ячеек от 10^6 до 10^8 в одном межлопаточном канале, в то время как для инженерных расчетов при выполнении некоторых условий достаточно сетки с количеством ячеек меньше 10^6 в одном межлопаточном канале.

Ключевые слова: решетка турбомашин, CFD моделирование, вязкий поток, сеточное разрешение, скачок уплотнения, след, отрыв, тангенциальный разрыв, потери.

Введение

Вычислительная аэродинамика (CFD) на сегодняшний день является неотъемлемым инструментом исследования течений в лопаточных аппаратах турбомашин и их проектирования. С каждым годом становится все больше программных комплексов для решения уравнений газовой динамики, а в создание и развитие CFD решателей вовлекаются новые научные и инженерные коллективы. Наиболее распространенный в настоящее время подход — это численное моделирование турбулентных течений вязкого газа с использованием осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS). Считается, что постановка такой задачи, численные методы и алгоритмы уже достаточно подробно проработаны, а соответствующие CFD решатели — тщательно протестированы и доведены [1].

Тем не менее, качество результатов (их точность и воспроизводимость) во многих случаях оставляют желать лучшего. В частности, результаты численного моделирования течений в решетках турбин и компрессоров продолжают существенно зависеть от выбора разностной сетки. На количественную и качественную точность решений влияют форма ячеек, размер ближайших к стенкам ячеек y^+ , количество ячеек в пограничном слое и в других сдвиговых слоях, величина неравномерности сгущений, степень изломов сеточных линий и т.д.

Весьма актуален вопрос — какая размерность сетки является достаточной для чис-

ленного моделирования течений вязкого газа в межлопаточных каналах турбомашин при использовании модели RANS. За последние двадцать лет рекомендации о достаточном количестве ячеек в межлопаточном канале несколько раз претерпели изменения: от 100–200 тыс. ячеек в 90-е годы прошлого столетия до 0,5–1,0 млн ячеек в настоящее время [1–3]. Обычно математическое обоснование таких рекомендаций не приводится, и вопрос сходимости решения остается открытым. Кроме того, существуют различные требования к выбору сетки, как строгие (например, выбор y^+), так и не вполне обоснованные [3].

Рассмотрению вопроса по выбору размера разностной сетки при расчетах трехмерных течений вязкого газа в турбомашинных и посвящены исследования авторов, представленные в данной статье.

1. Постановка задач исследования

Авторами рассмотрены несколько решеток и ступеней турбомашин, для каждой из которых проведены расчеты трехмерного осредненного турбулентного течения вязкого газа на основе модели течения RANS с использованием модели турбулентности $k-\omega$ SST [4].

Расчеты проводились с помощью CFD решателя F [5, 6] с использованием неявной ENO схемы второго порядка [7], локального шага по времени, упрощенного многосеточного алгоритма. На начальных этапах расчетов число Куранта выбиралось в пределах от 30 до 50 и только при достижении установления снижа-

лось до 5–10 с целью повышения точности вычислений. При этом на протяжении всего расчета для чрезмерно вытянутых ячеек шаг по времени несколько уменьшался по специальному алгоритму.

Критерием установления считалось постоянство по времени (с заданной точностью) значения коэффициента потерь (коэффициента полезного действия). При использовании в качестве критерия установления неизменности сил, действующих на решетку, погрешность определения КПД, как, оказалось, может составлять 1–2%. Следует также отметить, что дефекты установления решения, допущенные на более грубых сетках, очень медленно устраняются на более мелких сетках, особенно в областях сильно вытянутых ячеек. Поэтому для упрощенного многосеточного процесса расчета крайне важно обеспечивать установившиеся решения на всех уровнях измельченности сетки.

Рассматривались сетки типа H с приближенной ортогонализацией ячеек в пограничном слое. Используемые сетки условно были разделены на следующие группы (по количеству ячеек в одном межлопаточном канале):

- чрезвычайно грубые сетки – 10^4 – 10^5 ячеек;
- грубые сетки – 10^5 – 10^6 ячеек;
- промежуточные сетки – 10^6 – 10^7 ячеек;
- мелкие сетки – 10^7 – 10^8 ячеек;
- чрезвычайно мелкие сетки – 10^8 – 10^9 ячеек.

На этапах измельчения сетки, при проведении серии расчетов, размерность по каждому сеточному направлению увеличивалась примерно вдвое. Для сеток всех групп величина u^+ выдерживалась близкой к единице в радиальном и окружном направлениях.

Следует отметить, что проведение расчетов на сетках групп 3–5 с использованием программного комплекса FlowER (предшественника F) было невозможно по нескольким причинам. Во-первых, компоненты FlowER (препроцессор, постпроцессор и решатель) не позволяли проводить расчеты с использованием оперативной памяти более 3 Гб. Во-вторых, при разработке решателя были допущены некоторые просчеты в реализации разностной схемы, модели турбулентности и граничных условий на стенках, которые приводили к неустойчивости при измельчении сетки. И, в-третьих, расчеты на сетках более миллиона ячеек требуют значительного времени и были бы практически невозможны без использования механизмов ускорения сходимости [7], реализованных в новом решателе F.

2. Течение в дозвуковой решетке VKI-Genoa

Рассматривалось дозвуковое течение в турбинной решетке, исходные данные для которой приведены в работе [8]. Расчеты для режима течения с адиабатическим числом Маха на выходе $M_{2is} = 0,24$ проводились на сетках 65 тыс., 524 тыс., и 4,2 млн ячеек.

На рис. 1 приведены изолинии числа Маха в среднем сечении межлопаточного канала для сеток 520 тыс. и 4,2 млн ячеек. Видно, что решения для дозвукового течения достаточно близки, хотя стоит отметить, что на более мелкой сетке вблизи точки торможения форма концентрических изолиний ближе к окружностям, что соответствует физике обтекания затупленных тел.

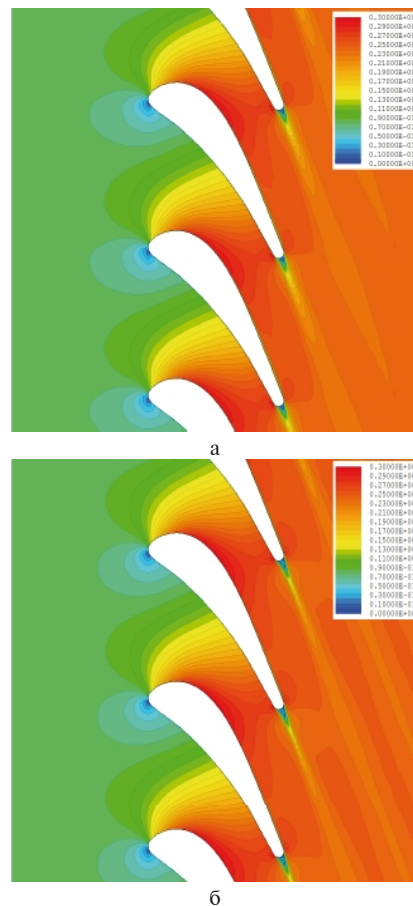


Рис. 1. Изолинии чисел Маха течения в решетке VKI-Genoa:
а – $5,2 \cdot 10^5$ ячеек; б – $4,2 \cdot 10^6$ ячеек

В табл. 1 приведены значения коэффициента потерь кинетической энергии в данной решетке. Наблюдается тенденция сходимости результатов при измельчении сетки. Видно, что использование сеток группы 2 может привести

к абсолютной погрешности по потерям около половины процента, по сравнению с результатами расчетов на сетках группы 3.

Таблица 1
Потери кинетической энергии в решетке VKI-Genoa

Количество ячеек	$6,5 \cdot 10^4$	$5,2 \cdot 10^5$	$4,2 \cdot 10^6$
Потери	0,188	0,127	0,123

3. Течение в ступени турбины ABB-Saturn

Рассматривалось трансзвуковое течение в турбинной ступени фирмы ABB-Saturn, геометрия и условия обтекания которой были представлены одному из авторов данной статьи А.В. Грановским [9] для тестовых расчетов. Расчеты проводились на сетках 30 тыс., 240 тыс., 1,9 млн и 15,3 млн ячеек для межлопаточных каналов решеток статора и ротора.

На рис. 2, 3 представлены результаты расчета течения в среднем сечении направляющей и рабочей решеток соответственно. «Численная ширен-визуализация» приведена для различных сеток, а изолинии числа Маха даны только для наиболее мелкой из рассмотренных сеток.

Из рисунков видно, что на сетках группы 2 скачки уплотнения плохо различимы и их положение определено неточно. На сетке группы 3 скачки выделены лучше, а на сетке группы 4 получена четкая структура скачков уплотнения. Аналогичные выводы можно сделать и о разрешении отрыва и следа.

Следует заметить, что здесь и далее при численной ширен-визуализации на рисунках видны вычислительные артефакты в виде горизонтальных и вертикальных линий вблизи входных и выходных кромок. Данные явления имеют место в областях существенного изменения шагов сетки и свидетельствуют о потере точности, проявляющейся в большой погрешности определения производных параметров течения.

В табл. 2 приведены потери кинетической энергии в ступени для различных сеток. Наблюдается тенденция сходимости результатов при измельчении сетки. Абсолютная погрешность определения потерь для сеток групп 2 и 3 по сравнению с сеткой группы 4 составляет 1,4 и 0,5%.

Таблица 2
Потери кинетической энергии в ступени ABB-Saturn

Количество ячеек	$2 \times 3,0 \cdot 10^4$	$2 \times 2,4 \cdot 10^5$	$2 \times 1,9 \cdot 10^6$	$2 \times 1,5 \cdot 10^7$
Потери в ступени	0,129	0,112	0,103	0,098

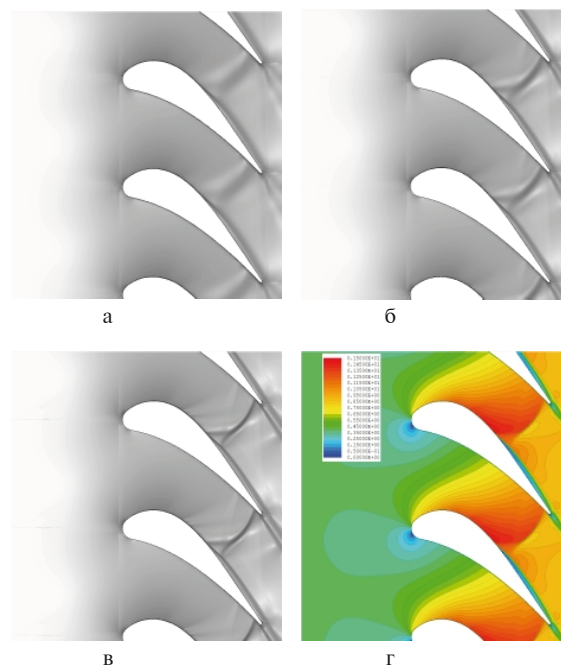


Рис. 2. Течение в среднем сечении направляющей решетки турбинной ступени. Численная ширен-визуализация (а, б, в) и изолинии числа Маха (г): а – $2,4 \cdot 10^5$ ячеек; б – $1,9 \cdot 10^6$ ячеек; в, г – $1,5 \cdot 10^7$ ячеек

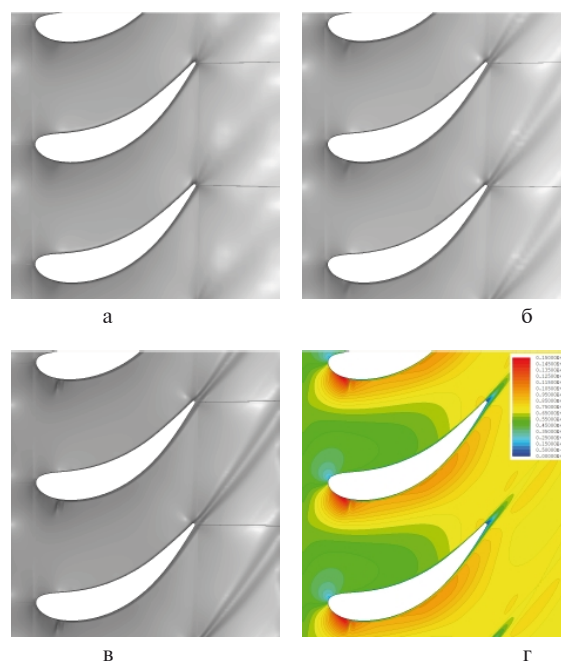


Рис. 3. Течение в среднем сечении рабочей решетки турбинной ступени. Численная ширен-визуализация (а, б, в) и изолинии числа Маха (г): а – $2,4 \cdot 10^5$ ячеек; б – $1,9 \cdot 10^6$ ячеек; в, г – $1,5 \cdot 10^7$ ячеек

4. Течение в компрессорной решетке TFAST

Рассматривалось течение в сверхзвуковой компрессорной решетке, расчетно-экспериментальное исследование которой проводится в проекте TFAST программы FP7

[10]. По условиям эксперимента на торцевых поверхностях осуществлялся отбор пограничного слоя для уменьшения вторичных течений и отрывов. Расчеты проводились для режимов $\pi_k = 1,22$ и $\pi_k = 1,87$ с относительным числом Маха на входе $M_{1w} = 1,2$ на сетках 2,4 млн, 9,2 млн, 54 млн и 250 млн ячеек, первые три из которых по размерностям тангенциальных сеточных поверхностей соответствуют двухмерным сеткам работы [11].

На рис. 4 показана «численная шлирен-визуализация» течения в среднем сечении межлопаточного канала на режиме $\pi_k = 1,22$ для сеток четырех размерностей.

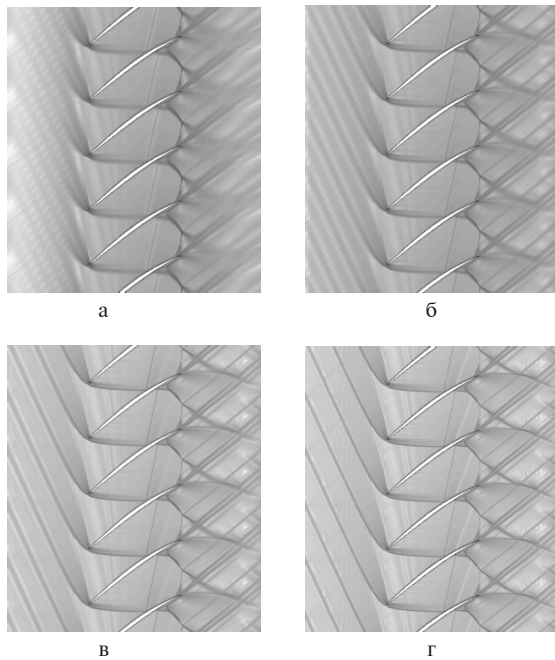


Рис. 4. Течение в среднем сечении компрессорной решетки TFAST на режиме $\pi_k = 1,22$. Численная шлирен-визуализация (изолинии градиента плотности): а – $2,4 \cdot 10^6$ ячеек; б – $9,2 \cdot 10^6$ ячеек; в – $5,4 \cdot 10^7$ ячеек; г – $2,5 \cdot 10^8$ ячеек

Видно, что на сетках группы 3 все скачки «размазанные», а отсоединенная ударная волна, косые скачки на входной кромке и структура скачков за выходной кромкой разрешены плохо. На сетке группы 4 улучшено разрешение головных скачков уплотнения, однако, отражение от поверхности лопатки косого скачка, сходящего с входной кромки, и «неразмазанная» структура скачков за выходной кромкой четко видны только на решении, полученном на сетке группы 5. Разрешение отрывов, следов и, особенно тангенциальных разрывов за тройственными точками скачков уплотнения также существенно улучшается по мере измельчения сетки и для сетки группы 5

является наилучшим. Аналогичное поведение численного решения наблюдается и для режима течения $\pi_k = 1,87$. В этом случае погрешность по положению канального скачка на сетках группы 3 может достигать почти 0,1 хорды.

В табл. 3 приведены потери кинетической энергии в данной решетке для различных сеток. Наблюдается тенденция сходимости результатов при измельчении сетки. Видно, что абсолютная погрешность потерь для сеток группы 3 может быть выше на 0,5% по сравнению с сеткой группы 5.

Таблица 3

Потери кинетической энергии в компрессорной решетке TFAST на режиме $\pi_k = 1,87$

Количество ячеек	$2,4 \cdot 10^6$	$9,2 \cdot 10^6$	$5,4 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^8$
Потери	0,1396	0,1373	0,1342	0,1340

5. Течение в турбинной решетке TFAST

Рассматривалось трансзвуковое течение в турбинной решетке, расчетно-экспериментальное исследование которой проводится в проекте TFAST программы FP7 [10]. Расчеты проводились для режимов обтекания при $M_{2is} = 1,05$ с пленочным охлаждением и без него на сетках 85 тыс., 680 тыс., 5,4 млн и 43,5 млн ячеек. Пленочное охлаждение осуществлялось выдуванием воздуха через два ряда равномерно расположенных в ядре потока отверстий (в каждом ряду 46 отверстий), каждое площадью около $0,5 \text{ мм}^2$ при длине лопатки 125 мм и ее хорде 76 мм. В расчетах на одно отверстие приходилось от 1 до 4 ячеек на сетке группы 3 и от 6 до 16 ячеек на сетке группы 4.

На рис. 5 показаны изолинии числа Маха в среднем сечении межлопаточного канала для различных сеток без пленочного охлаждения и с ним (фрагмент вблизи входной кромки).

Приведенные рисунки позволяют сделать вывод, что разрешение скачков и следа существенно улучшается при измельчении сетки. Так, на сетках групп 2 и 3 разрешение первого скачка уплотнения на стороне разрежения сразу за горлом решетки неудовлетворительное, и только на сетке группы 4 данный скачок можно однозначно интерпретировать как разрыв.

Струи охлаждающего газа также лучше разрешаются на более мелких сетках. Расчет с использованием сеток групп 1 и 2 не проводился, так как в этом случае размеры боковых поверхностей пристеночных ячеек превышали размеры отверстий. Из рис. 5 видно, что для сетки группы 3 струи охлаждающего воздуха прижимаются к поверхности разрежения лопатки, в то время как для сетки группы 4 они проникают значительно дальше в основной поток.

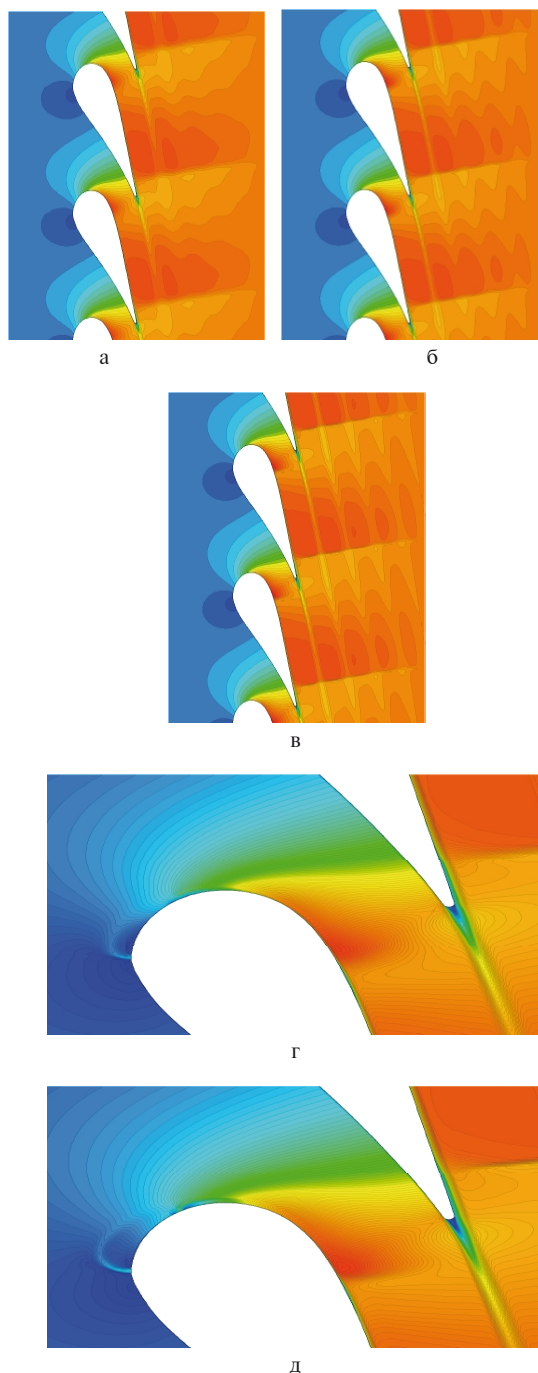


Рис. 5. Течение в тангенциальном сечении турбинной решетки TFAST без пленочного охлаждения (а, б, в) и с пленочным охлаждением (г, д). Изолинии чисел Маха: а – $6,8 \cdot 10^5$ ячеек; б, г – $5,4 \cdot 10^6$ ячеек; в, д – $4,3 \cdot 10^7$ ячеек

В табл. 4 приведены значения коэффициента потерь кинетической энергии в данной решетке для различных сеток. Для расчетов без пленочного охлаждения наблюдается тенденция сходимости результатов при измельчении сетки. Абсолютная погрешность потерь для

сеток группы 3 может составлять около 0,1% по сравнению с сеткой группы 4. Для расчетов с пленочным охлаждением, по-видимому, сходимости еще нет. На более грубых сетках, где охлаждающие струи располагаются ближе к пограничному слою поверхности разрезания, потери близки к потерям в потоке без охлаждения. На более мелкой сетке имеет место рост потерь, что можно объяснить существенным проникновением струй в основной поток.

Таблица 4
Потери кинетической энергии в турбинной ступени TFAST

Сетка	$8,5 \cdot 10^4$	$6,8 \cdot 10^5$	$5,4 \cdot 10^6$	$4,3 \cdot 10^7$
Без пленочного охлаждения	0,0653	0,0575	0,0524	0,0512
С пленочным охлаждением	–	–	0,0567	0,0577

Заключение

Проведенное исследование подтверждает известный факт, что масштабы сетки должны соответствовать масштабам рассчитываемого течения, т.е., характерным размерам областей потока с существенными градиентами термодинамических, кинематических и турбулентных параметров течения. С другой стороны, полученные результаты показывают, что для сходимости при измельчении сетки таких величин, как потери кинетической энергии, требуются достаточно мелкие сетки с количеством ячеек порядка 10^7 – 10^8 в одном межлопаточном канале для трехмерного течения при использовании разностного метода второго порядка. Такие же сетки необходимы для хорошего разрешения скачков уплотнения, отрывов, следов, тангенциальных разрывов. Следует еще раз подчеркнуть, что все вышесказанное относится к решениям уравнений RANS, для более полных моделей турбулентного течения, таких как LES и DNS необходимы отдельные исследования.

Эти результаты во многом будут справедливы и для методов более высокого порядка аппроксимации, так как для расчетов с их помощью вряд ли удастся использовать существенно более грубые сетки. Во-первых, минимальный шаг ячейки у стенки независимо от свойств численного метода будет определяться величиной y^+ . Во-вторых, методы высокого порядка обычно более чувствительны к неравномерности шагов сетки, скошенности и вытянутости ячеек. Определенный выигрыш такие методы могут дать при разрешении скачков уплотнения. Однако следует помнить, что в этом случае скорее важен не порядок аппроксимации сам по себе, а способность подсеточного разре-

ния метода, которая может быть высокой и для методов второго-третьего порядка.

Дополнительные требования измельчения сетки могут быть вызваны различными особенностями геометрии проточной части и течения, как например пленочное охлаждение, генераторы вихрей и пр. В этих случаях необходимы дополнительные исследования о достаточности сеточного разрешения.

Также следует отметить, что при расчетах на мелких сетках порядка 10^7 – 10^8 ячеек при высоких числах Куранта наблюдаются большие погрешности по величине потерь, а при малых числах Куранта – осцилляции в чрезмерно вытянутых ячейках при локальном шаге по времени. Данная проблема требует особого изучения.

Исходя из вышесказанного, можно сделать следующий вывод: для научных исследований, требующих высокой точности и детального разрешения структуры течения, в основном, следует использовать мелкие или чрезвычайно мелкие сетки (группы 4 и 5), в то время как для инженерных поверочных и оптимизационных расчетов вполне может оказаться достаточно промежуточных (группа 3) или даже более грубых сеток. Проведение оптимизации решеток турбомашин с использованием сеток групп 1 и 2 возможно, как это уже отмечалось авторами в работе [12], при соблюдении определенных условий. Во-первых, это подразумевает поиск пологого экстремума. Во-вторых, степень измельчения сетки на первых этапах оптимизации должна позволять попасть в окрестность предполагаемого оптимума. В-третьих, во всех сравнительных расчетах необходимо использовать одинаковые способы построения сетки и добиваться одинаковой степени установления решения. В-четвертых, результат оптимизации, полученный на грубых сетках, должен быть проверен и может быть уточнен, на более мелких сетках.

Литература

1. Hirsch C. Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics, 2nd Edition / C. Hirsch. – Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2007. – 680 p.

2. ERCOFTAC – European research Community on Flow, Turbulence and Combustion

[Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ercoftac.org>. – 30.05.2015 г.

3. CFD Online [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.cfd-online.com>. – 30.05.2015 г.

4. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications / F.R. Menter // AIAA J. – 1994. – Vol. 32, No. 8. – P. 1598–1605.

5. Ершов С.В. Бесплатная CFD программа [Электронный ресурс] / С.В. Ершов – Режим доступа: <http://sergiyvershov.com>. – 1.06.2015 г.

6. Ершов С.В. Развитие комплекса программ для расчета трехмерных течений вязкого газа / С.В. Ершов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 5(92). – С. 89–94.

7. Гризун М.Н. Численное моделирование многомерных сжимаемых течений с помощью метода Ньютона / М.Н. Гризун, С.В. Ершов // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. тр. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. – № 13. – С. 38–46.

8. Ciccotelli G. The effect of vortex shedding on the unsteady pressure distribution around the trailing edge of a turbine blade / G. Ciccotelli, C.H. Sieverding // J. Turbomachinery/ – 1997. – Vol. 119, No. 4. – P. 810-819.

9. Грановский А.В. Разработка методов повышения газодинамической эффективности высоконагруженных ступеней охлаждаемых газовых турбин : дис. ... д-ра техн. наук : 05.04.12 / Грановский Андрей Владимирович. – М., 2011. – 217 с.

10. TFAST Project – Transition Location Effect on Shock Wave Boundary Layer Interaction [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://tfast.eu>. – 30.05.2015 г.

11. Папазов С.В. Численное моделирование течения в компрессорной решетке в широком диапазоне режимов обтекания / С.В. Папазов, В.А. Яковлев, С.В. Ершов // Пробл. машиностроения. – 2014. – Т. 17, № 4. – С. 3–9.

12. Ершов С.В. Аэродинамическая оптимизация лопаточных аппаратов турбин: подходы, методы, результаты / С.В. Ершов, В.А. Яковлев // Пробл. машиностроения. – 2012. – Т. 15, № 2. – С. 3–13.

Поступила в редакцию 30.05.2015

С.В. Ершов, В.А. Яковлев. Про вибір ступеня подрібнення сітки при розрахунках тривимірних течій в'язкого газу в турбомашинах

Розглядається питання вибору ступеня подрібнення різницевої сітки при розрахунках тривимірних течій в'язкого газу в турбомашинах з використанням моделей течії RANS і чисельних методів другого порядку. Виконано розрахунки течій через турбінні й компресорні решітки на послідовно подрібнюваних сітках. Проведене зіставлення отриманих результатів як за якісним розділенням складної структури трансзвукових потоків, так і за кількісною оцінкою втрат. Показано, що для наукових досліджень тривимірних течій є сенс використовувати різницеві сітки з кількістю комірок від 10^6 до 10^8 в одному міжлопатковому каналі, тоді як для інженерних розрахунків при виконанні деяких умов достатньо сітки з кількістю комірок менше 10^6 в одному міжлопатковому каналі.

Ключові слова: решітка турбомашин, CFD моделювання, в'язкий потік, сіткове розділення, стрибок ущільнення, слід, відрив, тангенціальний розрив, втрати

S.V. Yerшов, V.A. Yakovlev. About the choice of the grid resolution at calculations three-dimensional viscous gas flow in turbomachines

The question of a choice of mesh resolution degree is considered for calculations of three-dimensional viscous flows in turbomachinery using the RANS flow models and the second order accurate numerical methods. The calculations of flows through the turbine and compressor cascades are performed using successively refined meshes. The results obtained are compared in their possibility both to resolve qualitatively the transonic flow pattern and to estimate quantitatively the losses. It is shown that for scientific researches of 3D turbomachinery flows it makes sense to use the difference meshes with number of cells from 10^6 to 10^8 in the single blade-to-blade passage, while for engineering calculations a mesh with number of cells less than 10^6 in the single blade-to-blade passage could be sufficient under certain conditions.

Key words: turbomachine cascade, CFD modeling, viscous flow, grid resolution, shock wave, a trace, separation, tangential break, losses.