

¹ С. В. Папазов² В. А. Яковлев, канд. техн. наук² С. В. Ершов, д-р техн. наук¹ Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,

г. Харьков, e-mail: papazovsv@mail.ru

² Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков,e-mail: yava@ipmach.kharkov.ua;
yershov@ipmach.kharkov.ua

УДК 621.165+533.6

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕЧЕНИЯ В КОМПРЕССОРНОЙ
РЕШЕТКЕ В ШИРОКОМ
ДИАПАЗОНЕ РЕЖИМОВ
ОБТЕКАНИЯ**

Наведено результати чисельного моделювання двовимірної в'язкої турбулентної течії робочого тіла в трансзвуковій компресорній решітці у широкому діапазоні режимів обтікання. Подано докладний аналіз фізики течії на робочій та зривній гілках характеристики компресора, проведений із використанням візуалізації розрахункових даних, яка виконувалась за допомогою ізоліній чисел Маха та «чисельного шлірен-методу».

Ключові слова: осьовий компресор, решітка профілів, в'язкий потік, чисельне моделювання, чисельний шлірен-метод.

Введение

Численное моделирование течения вязкого сжимаемого рабочего тела в проточных частях трансзвуковых осевых компрессоров является сложной задачей вычислительной аэродинамики. Проведение численных исследований необходимо для глубокого понимания газодинамических процессов, которые происходят в проточных частях компрессоров, а также для улучшения их аэродинамических характеристик.

Для большинства реальных осевых компрессоров существует большой диапазон граничных условий, для которых можно получить несколько решений, относящихся к рабочей или срывной характеристикам. Одними из наиболее сложных для численных исследований являются неустойчивые, склонные к отрывам течения в современных высоконагруженных компрессорах. Для структуры таких течений характерны наличие больших положительных градиентов давления, массивных областей отрыва потока, интенсивных вторичных течений.

Численные исследования, представленные в настоящей работе, проведены с помощью программного комплекса F [1], построение которого основано на технологии решателя FlowER и является его дальнейшим развитием. В комплексе F выполнена существенная модификация численного метода, заключающаяся в учете ограничений реализуемости для турбулентных напряжений [2] и в модификации численной реализации граничных условий на выходе [3] и на твердых границах. Благодаря этому стало возможным проведение расчетов течений в компрессорах при больших градиентах давления, что позволило проводить численное моделирование обтекания лопаточных аппаратов не только на рабочей, но и на срывной ветвях характеристики.

1. Постановка задачи численного исследования

Объектом исследования является прямая решетка профилей рабочего колеса трансзвукового компрессора. Геометрические характеристики компрессорной решетки приведены ниже. Задача состоит в проведении численного моделирования и анализе двухмерного вязкого турбулентного течения в компрессорной решетке профилей в широком диапазоне режимов обтекания.

Основные геометрические характеристики компрессорной решетки

Параметр	Значение, м
Шаг решетки	0,06
Хорда лопатки	0,0994
Осевая хорда лопатки	0,0713

© С. В. Папазов, В. А. Яковлев, С. В. Ершов, 2014

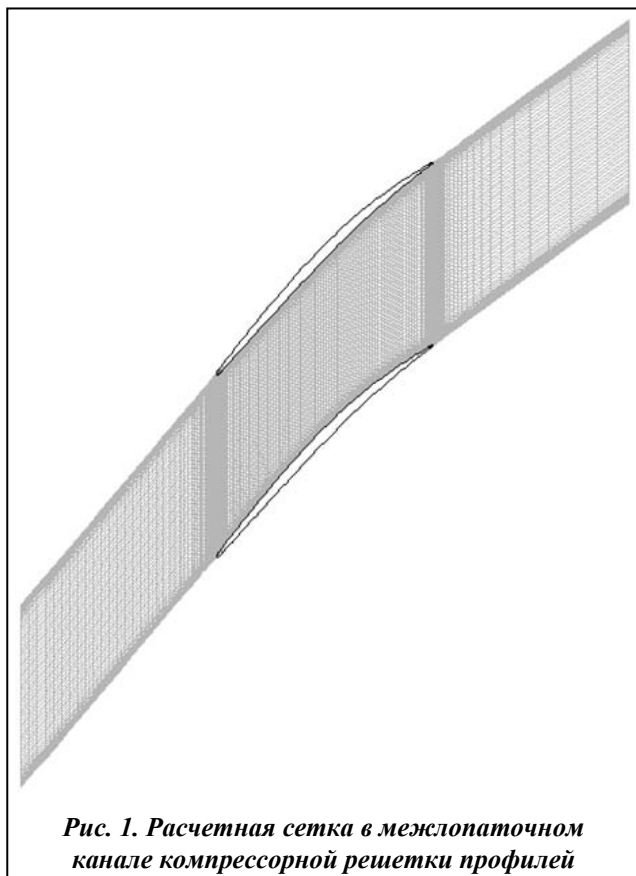


Рис. 1. Расчетная сетка в межлопаточном канале компрессорной решетки профилей

Вид профилей лопаток решетки и расчетная сетка показаны на рис. 1. Для двухмерного течения рассматривались грубая, промежуточная и мелкая H-сетки с размерностями 24 000 ячеек (100×240), 57 600 (160×360) и 180 000 (300×600) соответственно. Следует отметить, что размерности сетки выбирались таким образом, чтобы на следующем этапе исследований было возможно проводить расчеты трехмерного течения с использованием таких же сеток в тангенциальных сечениях проточной части.

В качестве математической модели для решения поставленной задачи используется система уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу. Моделирование турбулентности осуществляется с помощью дифференциальной двухпараметрической модели переноса сдвиговых напряжений $k-\omega$ SST Ментера [4].

Режим обтекания определяется варьированием значения осевой скорости на границе выхода расчетной области. На границе входа расчетной области задаются значения полного давления, статического давления и полной температуры. На твердых стенках используется условие прилипания и адиабатичности.

Исходные уравнения решаются численно неявной ENO схемой второго порядка аппроксимации. Для стационарных режимов использовалась технология локального шага по времени, для нестационарных – временной шаг выбирался постоянным.

2. Анализ численных результатов

На рис. 2 представлен график зависимости числа Маха на входе расчетной области от осевой скорости на границе выхода расчетной области. Видно, что при осевой скорости потока на выходе,

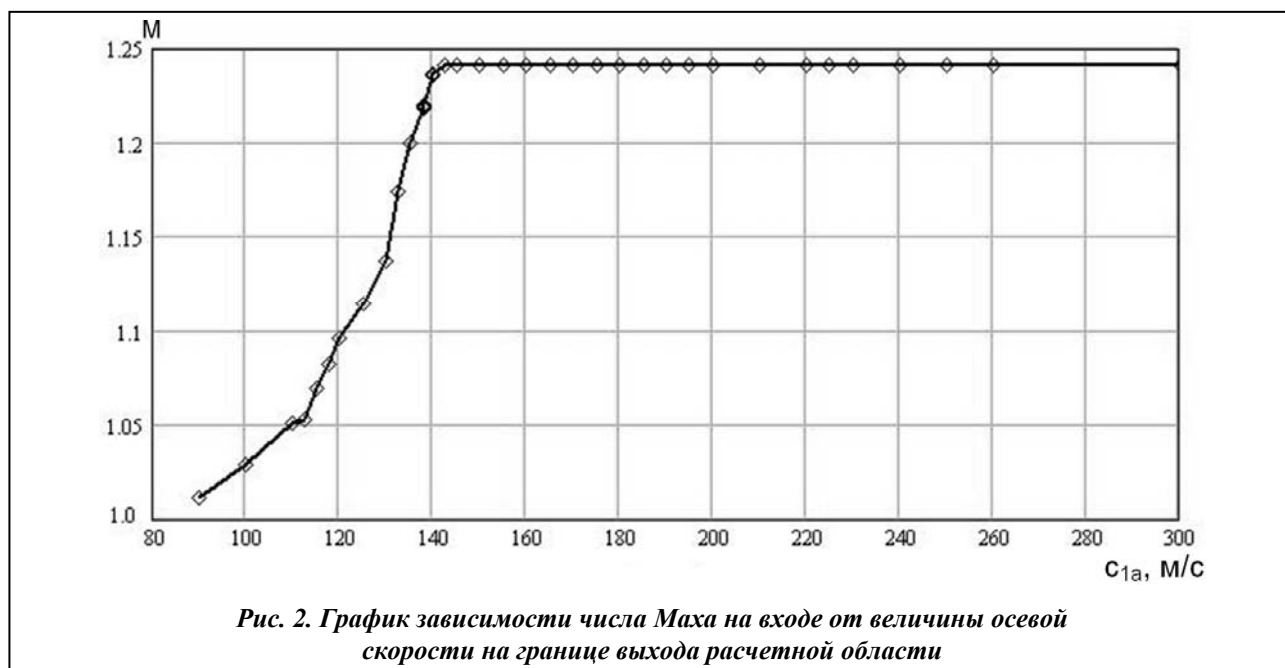


Рис. 2. График зависимости числа Маха на входе от величины осевой скорости на границе выхода расчетной области

большей 142 м/с, течение на входе не меняется в силу «запираания» межлопаточного канала.

На рис. 3 представлена «численная шлирен-визуализация» [5] течения в компрессорной решетке профилей при изменении осевой скорости на выходе. Рабочий режим обтекания соответствует рис. 3, и. В этом случае поток на входе характеризуется сверхзвуковой скоростью с числом Маха приблизительно 1,24. Перед входной кромкой наблюдается отсоединенный скачок уплотнения, одна из ветвей которого в виде внутреннего прямого скачка перегораживает межлопаточный канал и создает условия для отрыва потока на стороне разрежения соседней лопатки. В окрестности входной кромки за отсоединенным скачком скорость снижается до дозвуковой. Непосредственно на входной кромке со стороны разрежения образуются волны разрежения, в которых поток разгоняется до сверхзвуковой скорости и затем замедляется в слабом присоединенном косом скачке (аналогичная картина наблюдается на входной кромке и со стороны давления). Далее поток разгоняется вдоль стороны разрежения и тормозится во внутреннем почти прямом скачке, перегораживающем межлопаточный канал. За прямым скачком на стороне разрежения образуется отсоединенный отрыв потока небольшой интенсивности.

При уменьшении осевой скорости на границе выхода расчетной области отсоединенный скачок уплотнения смещается в направлении входной границы (рис. 3, е), течение становится неустойчивым, что характерно для срывной ветви характеристики, и в следе наблюдаются сходящиеся вихри (рис. 3, д). При этом область отрыва пограничного слоя на стороне разрежения и толщина следа существенно увеличиваются (рис. 3, г), точка отрыва смещается к входной кромке (рис. 3, в). Затем отсоединенный скачок приобретает характер λ -скачка (рис. 3, б), а при дальнейшем загромождении канала отрывом – ослабевает (рис. 3, а), что связано с уменьшением скорости потока на входе (см. рис. 2).

При увеличении осевой скорости на выходе по сравнению с расчетным режимом обтекания внутренний прямой скачок смещается по потоку, причем на стороне давления за счет его взаимодействия с отсоединенным скачком образуется λ -конфигурация (рис. 3, л). Интенсивность отрыва пограничного слоя на стороне разрежения увеличивается по сравнению с расчетным режимом обтекания (рис. 3, к, л), но не так сильно, как на срывной ветви характеристики.

В области падения отсоединенного скачка на сторону разрежения образуется косой отраженный скачок (рис. 3, м), а внутренний скачок при дальнейшем увеличении скорости потока на выходе продолжает смещаться вниз по потоку (рис. 3, н). При этом на стороне давления также возникает отрыв потока, и на обеих сторонах лопатки скачки приобретают λ -образную форму (рис. 3, л, м, н).

При последующем увеличении осевой скорости на выходе можно наблюдать три ветви λ -скачка на стороне разрежения выходной кромки (рис. 3, о), вторичные λ -скачки на ветвях λ -скачка на стороне разрежения выходной кромки (рис. 3, п), предельное положение внутреннего скачка на выходном срезе решетки и отражение от стороны давления отраженного от стороны разрежения косого скачка (рис. 3, п), полностью сверхзвуковое (в ядре потока) обтекание компрессорной решетки (рис. 3, р).

На рис. 3, кроме скачков уплотнения, отрывов, отчетливо видны контактные разрывы, распространяющиеся вдоль потока от тройных точек λ -скачков, и вязкие кромочные следы.

На рис. 4 в увеличенном масштабе представлена визуализация чисел Маха для режима обтекания, при котором осевая скорость на границе выхода составляет 155 м/с.

В потоке наблюдается криволинейный отсоединенный головной скачок с дозвуковой областью перед входной кромкой. Видны волны разрежения на входной кромке, в которых происходит разгон потока до сверхзвуковой скорости. Присоединенные скачки уплотнения на входной кромке трудноразличимы, особенно на стороне давления.

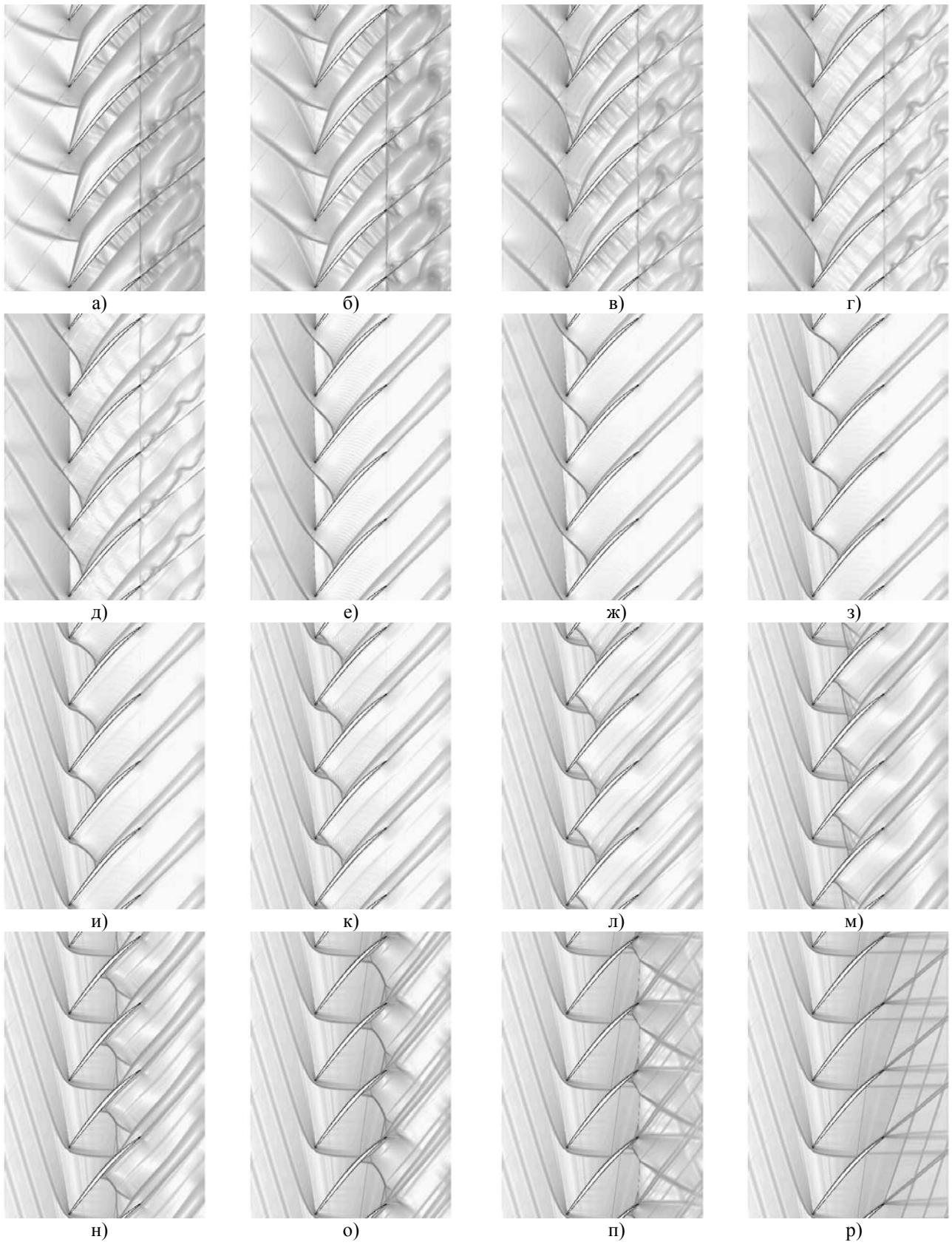


Рис. 3. Визуализация течения в решетке компрессора

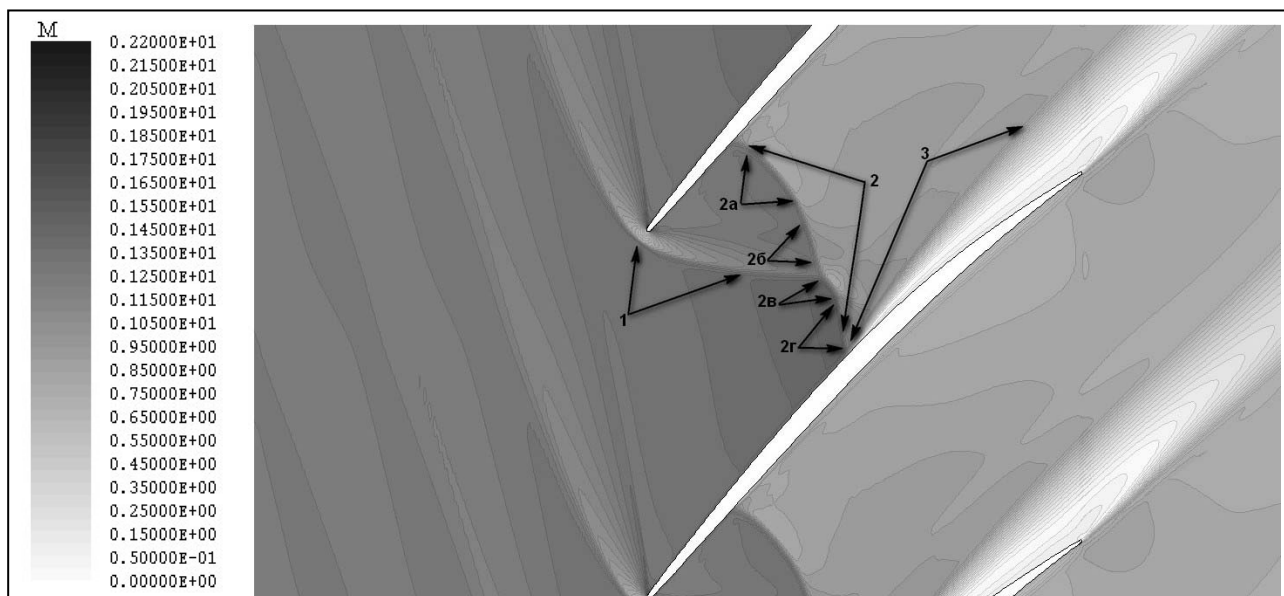


Рис. 4. Режим обтекания при осевой скорости на выходе 155 м/с. Изолинии чисел Маха:
 1 – головной отсоединенный скачок уплотнения; 2 – скачок уплотнения со сложной криволинейной структурой; 3 – область отрыва пограничного слоя

Во внутреннем скачке уплотнения 2, конфигурация которого имеет сложную криволинейную форму, можно выделить 4 области:

- область 2а – в этой области скачок уплотнения близок к прямому;
- область 2б – в этой области скачок уплотнения по своему характеру скорее косой, и за ним наблюдается небольшая сверхзвуковая скорость;
- область 2в – участок прямого скачка уплотнения, за которым поток тормозится до дозвуковой скорости;
- область 2г – косой скачок, представляющий собой одну из ветвей λ-конфигурации.

Области отсоединенного отрыва на стороне разрежения и кромочного следа отчетливо различимы, но при этом отрыв на стороне давления не выявляется.

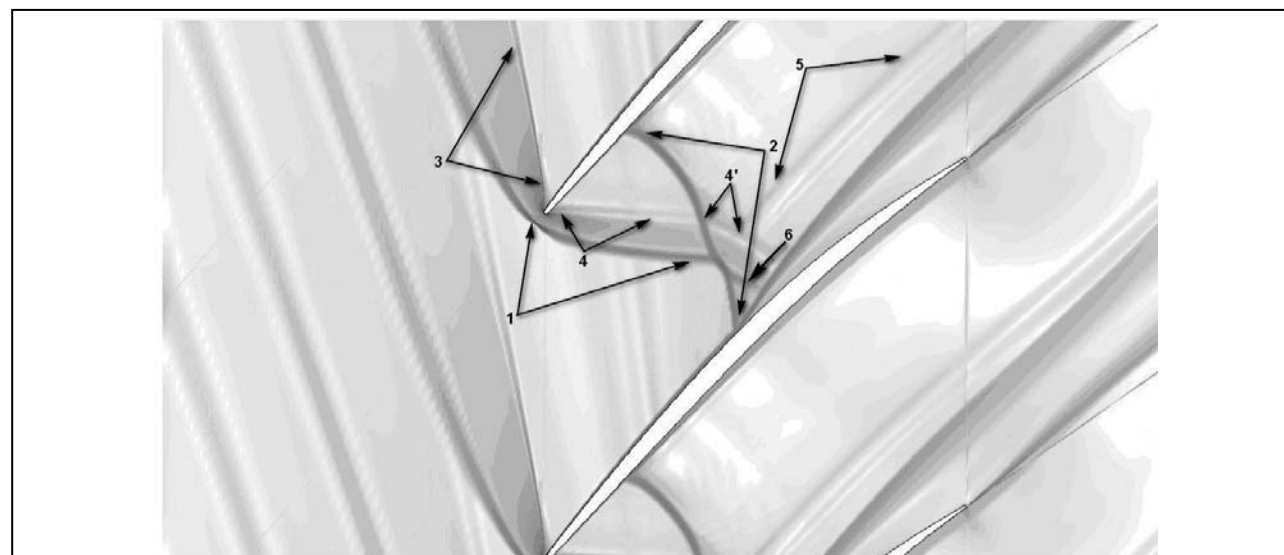


Рис. 5. «Численная шилрен-визуализация» течения (режим обтекания при осевой скорости на выходе 155 м/с):
 1 – головной отсоединенный скачок уплотнения; 2 – внутренний канальный скачок уплотнения; 3 и 4 (4') – присоединенные скачки уплотнения на сторонах разрежения и давления входной кромки; 5 – контактный разрыв; 6 – λ-скачок

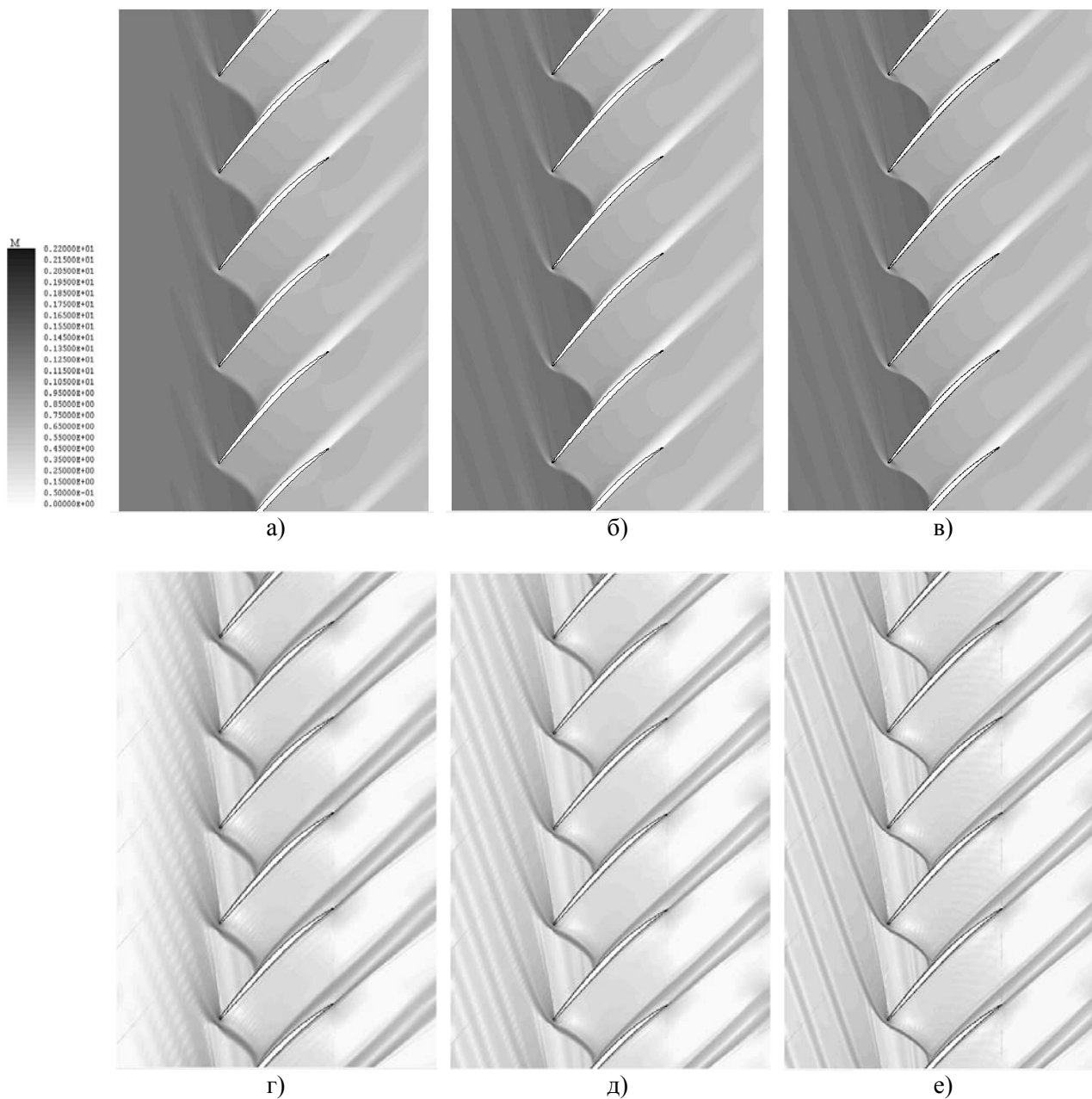


Рис. 6 – Влияние сеточного разрешения на результаты численного моделирования течения в компрессорной решетке:

а), б), в) – изолинии числа Маха; г), д), е) – изолинии градиента плотности; а), г) – сеточное разрешение 100×240; б), д) – сеточное разрешение 160×360; в), е) – сеточное разрешение 300×600

На рис. 5 представлена «численная шлирен-визуализация» этого же течения. По сравнению с визуализацией изолиниями чисел Маха в данном случае можно увидеть некоторые дополнительные особенности, характерные для данного режима обтекания. В частности, наблюдаются контактные разрывы, распространяющиеся от тройных точек внутреннего канального скачка, и присоединенный отрыв на стороне давления за область взаимодействия внутреннего канального скачка с пограничным слоем.

Присоединенные скачки на входной кромке не только четко видны, но и можно проследить взаимодействие внутреннего присоединенного скачка с внутренним канальным.

Приведенные выше результаты получены на мелкой сетке. Также было выполнено исследование влияния сеточного разрешения на численное решение. На рис. 6 показаны изолинии числа Маха (рис. 6, а–в) и градиента плотности (рис. 6, г–е) для трех рассмотренных сеток на рабочем режиме обтекания компрессорной решетки (осевая скорость на выходе 142,5 м/с). Изолинии чисел Маха в целом показывают качественно одинаковую картину течения. На промежуточной и особенно на мелкой сетке скачки получаются несколько тоньше. Отсоединенный отрыв потока на стороне разрежения на мелкой сетке более прижат к поверхности лопатки.

«Численная шлирен-визуализация» показывает во многом подобные результаты по улучшению разрешения скачков и отрыва потока при измельчении сетки. Но, кроме того, на мелкой сетке можно четко видеть λ -образный скачок уплотнения на стороне разрежения и контактный разрыв, исходящий из тройной точки скачка, в то время как на грубой и промежуточной сетках можно только догадываться о такой конфигурации. Исходя из этого, для расчетов сверхзвуковых течений в компрессорных решетках следует рекомендовать сетки с размерностями порядка 100 000 ячеек и более в тангенциальном сечении.

Заключение

Представлены результаты расчетов сверхзвукового течения в компрессорной решетке профилей в широком диапазоне изменения осевой скорости на выходе. Полученные результаты численного моделирования согласуются с известными теоретическими представлениями о сверхзвуковых течениях в компрессорах. Показано, что для расчета сверхзвуковых течений в компрессорных решетках целесообразно использовать разностные сетки с разрешением порядка 100 000 и более ячеек в плоском сечении. Анализ полученных численных результатов проведен с использованием изолиний чисел Маха и «численного шлирен-метода». Сделан вывод, что «численная шлирен-визуализация» является эффективным средством для проведения анализа сверхзвукового течения, поскольку дает точное представление о конфигурации сверхзвукового течения и сложной волновой структуре, характерной для данного вида течений.

Литература

1. Развитие комплекса программ расчета трехмерных течений вязкого сжимаемого газа в лопаточных аппаратах турбомашин / С. В. Ершов, В. А. Яковлев, А. И. Деревянко и др. // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестн. НТУ «ХПИ»: Сб. науч. тр. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2011. – № 5. – С. 25–32.
2. Ершов, С. В. Ограничение реализуемости для модели турбулентности SST $k-\omega$ / С. В. Ершов // Пробл. машиностроения. – 2008. – Т. 11, № 2. – С. 14–23.
3. Ершов, С. В. Численная реализация граничных условий на проницаемых границах для уравнений газовой динамики // Пробл. машиностроения. – 2011. – Т. 14, № 4. – С. 25–37.
4. Menter, F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA J. – 1994. – Vol. 32, № 8. – P. 1598–1605.
5. Пилипенко, А. А. Численное моделирование влияния числа Маха и угла атаки на режимы трансзвукового турбулентного обтекания аэродинамических профилей / А. А. Пилипенко, О. Б. Полевой, А. А. Приходько // Уч. зап. Центр. аэрогидродинам. ин-та. – 2012. – Т. 43, вып. № 1. – С. 3–31.

Поступила в редакцию 11.11.14