

УДК 533.6

С.В. ЕРШОВ<sup>1</sup>, Д.А. КОЗЫРЕЦ<sup>2</sup><sup>1</sup>*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков*<sup>2</sup>*Национальный технический университет "ХПИ", Харьков, Украина*

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОГО ГАЗА В КОМПРЕССОРНЫХ РЕШЕТКАХ

*Предложено усовершенствование численного метода расчета трехмерных течений вязкого сжимаемого газа в проточных частях компрессоров. В новом газодинамическом решателе реализованы ограничения реализуемости для турбулентных напряжений и выполнено уточнение граничных условий на выходе. При этом существенно повысилась робастность решателя, что проявилось в возможности проведения расчетов для практически любого режима от достаточно произвольного начального приближения. Ложные отрывы в приторцевых пограничных слоях на выходе компрессора при этом не возникают. Построена расчетным путем характеристика двухступенчатого осевого компрессора. Исследована сложная вихревая структура течения в последнем спрямляющем аппарате.*

**Ключевые слова:** численный метод, ограничение реализуемости, характеристика компрессора, осевая скорость, решатель.

### Введение

Моделирование трехмерных течений вязкого сжимаемого газа в многоступенчатых компрессорах является важной задачей современной вычислительной аэродинамики, решение которой позволит улучшить аэродинамическое качество компрессорных проточных частей. Основные трудности решения этой задачи вызваны сложной структурой течения в лопаточных аппаратах компрессоров: большие положительные градиенты давления, массивные отрывные области, интенсивные вторичные течения. При моделировании потока с такими явлениями решающее значение приобретает адекватность численной модели.

В ИПМаш НАНУ разработан программный комплекс FlowER [1], который использовался в ряде организаций для расчета пространственных течений в компрессорах. К сожалению, численная модель течения, реализованная в этом комплексе программ, во многих случаях не позволяет рассчитывать течение в многоступенчатых компрессорах, так как сходимость численного решения достигается, преимущественно, при чрезмерно больших размерах ячеек у стенок, что противоречит правилам моделирования турбулентности и приводит к неверному расчету пограничных слоев.

В настоящей работе метод расчета пространственных течений в компрессорах усовершенствован и реализован в рамках нового программного комплекса F [2], который является развитием решателя FlowER. Проведено численное исследование трех-

мерного вязкого отрывного течения в многоступенчатом компрессоре. Анализ отрывных течений проводился с помощью идей, изложенных в монографии [3].

### 1. Модель течения

Рассматривается расчетная область, включающая в себя по одному межлопаточному каналу каждого лопаточного аппарата многоступенчатого компрессора. Турбулентное течение вязкого сжимаемого газа в этой области описывается уравнениями Навье-Стокса, осредненными по Рейнольдсу и записанными в криволинейной системе координат, вращающейся с постоянной угловой скоростью. Турбулентные напряжения в этих уравнениях и в формуле для производства турбулентности рассчитываются по гипотезе Буссинеска.

В настоящей работе используется модель турбулентности  $k-\omega$  SST.

### 2. Ограничения реализуемости

Серьезным недостатком формулы Буссинеска является то, что она может генерировать физически нереализуемые турбулентные напряжения [5]. В частности, тензор рейнольдсовых напряжений может не удовлетворять неравенству Коши-Буняковского и, кроме того, нормальные рейнольдсовы напряжения могут оказаться положительными. Вклад турбулентных напряжений в уравнения движения значителен и неправильный их расчет может приво-

дуть к ошибкам в решении. Так при наличии положительных градиентов давления в потоке модели турбулентности сталкиваются с трудностями правильного описания отрывных областей. Поэтому в настоящей работе предложено модель турбулентности дополнить ограничениями реализуемости [6], которые обеспечивают выполнение неравенства Коши-Буняковского для тензора турбулентных напряжений и не допускают положительных значений нормальных рейнольдсовых напряжений. Данная модификация, не реализованная в стандартном решателе FlowER, имеет принципиальное значение при расчете течений в компрессорах.

### 3. Граничные условия

Задание граничных условий на выходе расчетной области за последним лопаточным аппаратом компрессора вызывает определенные трудности. При дозвуковой осевой компоненте скорости требуется задать одно граничное условие и наиболее часто для этих целей использовали статическое давление. Однако такое условие не гарантирует существование или единственность решения, а значит и корректность постановки задачи, так как известно, что одному значению статического давления на выходе компрессора может соответствовать как отсутствие решения, так и несколько решений.

В стандартной версии решателя FlowER использовалось задание на выходе компрессора инварианта Римана, приходящего на границу извне расчетной области. В пограничном слое инвариант Римана существенно меняется, закон этого изменения определяется решением и заранее неизвестен. Поэтому такое граничное условие будет искажать развитие пограничных слоев на торцевых стенках. В этом смысле большинство расчетов течений в компрессорах, проведенных в работе [7], являются недостаточно точными. Более того, использование в пограничном слое характеристических соотношений (инвариантов), полученных для невязкого потока, весьма сомнительно. Исходя из этого, в настоящей работе в сечении выхода расчетной области задается распределение по радиусу осевой компоненты скорости, что согласуется с идеями ряда работ в этой области, в частности [8]. Так как значения осевой скорости в пограничном слое на торцевых поверхностях на выходе неизвестны, то необходимо применить специальную процедуру учета пограничного слоя. Рассматривалось задание профиля развитого пограничного слоя по степенному закону  $1/7$  и перенос характеристик профиля скорости в выходное сечение из ближайшего поперечного слоя ячеек. Во втором случае решение получалось более устойчивым и точным, особенно, если профиль скорости вблизи выходного сечения характеризовался знако-

переменной кривизной. Чтобы избежать сложностей определения вблизи выходной границы толщины пограничного слоя по профилю скорости в настоящей работе для этих целей использовались смешивающие функции модели турбулентности  $k-\omega$  SST [4]. Для определения неизвестных величин на границе выхода в ядре потока и во внешней области пограничного слоя использовались соотношения на характеристиках, а во внутренней области пограничного слоя, где вязкие и турбулентные эффекты доминируют, применялась экстраполяция параметров на границу выхода. Разделение пограничного слоя на внешнюю и внутреннюю части также оценивалось с помощью смешивающих функций Ментера [4].

На входе в расчетную область перед первым лопаточным аппаратом компрессора при дозвуковой осевой скорости потока задаются распределения по радиусу полного давления, полной температуры и двух углов – меридионального и тангенциального, – задающих направление вектора скорости. Для уравнений модели турбулентности на входе фиксируется степень турбулентности потока, по которой рассчитывается кинетическая энергия турбулентности. Удельная скорость диссипации при этом определяется исходя из геометрических масштабов проточной части. Если во входном сечении имеются турбулентные пограничные слои, то в них кинетическая энергия турбулентности и удельная скорость диссипации определяются на основе известных закономерностей для пограничного слоя в соответствии с алгоритмом, предложенным в работе [9]. В стандартной версии решателя FlowER изменение турбулентных величин у стенок на входе не учитывалось и это приводило к существенным погрешностям расчета пограничного слоя [10]. Остальные параметры на входе определяются по соотношениям на характеристиках и экстраполяционным формулами, подобно тому, как это сделано на выходе.

На твердых стенках задаются условия прилипания и отсутствия теплообмена. Давление рассчитывается исходя из проекции уравнения импульса на сеточное направление. На проницаемых поверхностях, отделяющих текущий межлопаточный канал, от соседних каналов того же лопаточного аппарата (поверхности периодичности) и от каналов соседней решетки (поверхности скольжения), выставляются условия периодичности и скольжения соответственно. В последнем случае осуществляется осреднение параметров течения в окружном направлении и переход из абсолютной системы координат во вращающуюся или наоборот.

### 4. Численные результаты

Для численного интегрирования систем уравнений Навье-Стокса и модели турбулентности ис-

пользуется неявная разностная схема Годунова второго порядка аппроксимации [11]. Для ускорения сходимости применялся локальный временной шаг.

В качестве объекта исследования рассматривался двухступенчатый компрессор. На рис. 1 приведена характеристика компрессора, полученная в результате расчетов трехмерного течения, которые проводились от достаточно произвольно заданного начального приближения при различных значениях осевой скорости потока на выходе.

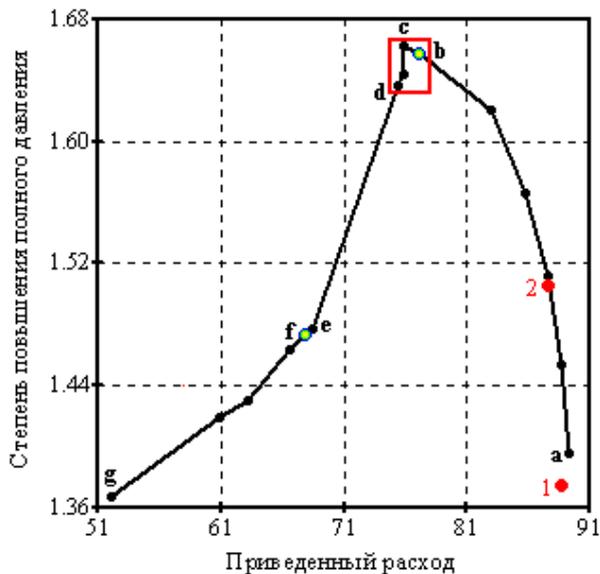


Рис. 1. Зависимость степени повышения полного давления от приведенного расхода

Правая (рабочая) ветвь характеристики располагается между точками **a** (режим запираения) и **c** (граница устойчивости). Левая (срывная) ветвь характеристики ограничена точками **e** и **g**. Переход с рабочей ветви на срывную происходит между точками **c** и **e**. Численное решение для режимов на участке характеристики между точками **b** и **d** оказалось существенно нестационарным. В настоящей работе режимы, соответствующие точкам **b** (окрестность максимальной степени повышения полного давления) и **f**, выбраны для анализа в качестве характерных. Необходимо отметить, что при использовании стандартной версии решателя FlowER удалось получить решение только вблизи запираения для режимов, соответствующих точкам **1** и **2**.

На рис. 2 приведены изолинии давления на поверхности лопатки (В) и на втулочной поверхности (Н), а также линии тока в отрыве в прикорневой области на режиме **b**. Наблюдаемые в потоке вихри обозначены цифрами 1-7. Так как в прикорневой области наблюдается существенно нерасчетный положительный угол атаки, то образуется большая отрывная зона на стороне разрежения. В этой области располагаются вихри 1-5, закрученные против

часовой стрелки, и вихрь 6, вращающийся по часовой стрелке. Вихри 1,2,3 и 4 возникают на втулочной поверхности на границе зон повышенного и пониженного статического давления и подходят к поверхности разрежения в областях повышенного давления. Отрывная зона замыкается седловой точкой S2.

Перед входной кромкой лопатки образуется седловая точка S1, из которой выходят линии отрыва, отделяющие область подковообразного вихря 7 от основного потока. Ветви подковообразного вихря не затекают на поверхность разрежения лопатки из-за существования упомянутой выше большой отрывной зоны. Ось вихря расположена достаточно далеко от линии отрыва. Положение седловой точки, оси подковообразного вихря и его ветвей существенно зависит от режима работы компрессора.

На режиме **f** в канале CA2 наблюдается существенно иная картина течения, что можно увидеть на рис. 3, где показаны линии тока вблизи поверхности разрежения лопатки. Здесь буквой T обозначен периферийный меридиональный обвод. Отрыв потока на стороне разрежения у корня небольшой, в то время как на периферии образовалась большая протяженная зона. Сравнение вихревой структуры течения на режимах **b** и **f** показывает, что переход с рабочей ветви характеристики на ее срывную ветвь в CA2 сопровождается перемещением отрыва из прикорневой области в периферийную при изменении осевой скорости на выходе компрессора на незначительную величину.

## Заключение

Предлагаемая модификация метода расчета течений в компрессорах при больших положительных градиентах давления, состоящая в учете ограничений реализуемости для турбулентных напряжений и в модификации граничных условий на выходе, позволяет одинаково легко проводить численное моделирование потока как на рабочей, так и на срывной ветвях характеристики.

Анализ течения в многовенцовом компрессоре показал сложную структуру отрывных течений.

В дальнейшем целесообразно выполнить численное моделирование:

- переходных режимов в компрессорах, вызванных последовательным уменьшением (увеличением) расхода, с целью выявления гистерезисных явлений;
- устойчивости компрессора к возмущениям полного давления на входе;

Данные исследования проводились в работе [12] в постановке течения невязкого газа и, естественно, интересно повторить такие же исследования

для вязкого потока. Следует отметить, что такое моделирование следует выполнять в нестационарной постановке (локальный шаг по времени недо-

пустим). Также необходимо провести сопоставление с экспериментальными данными, например, для компрессора работы [13].

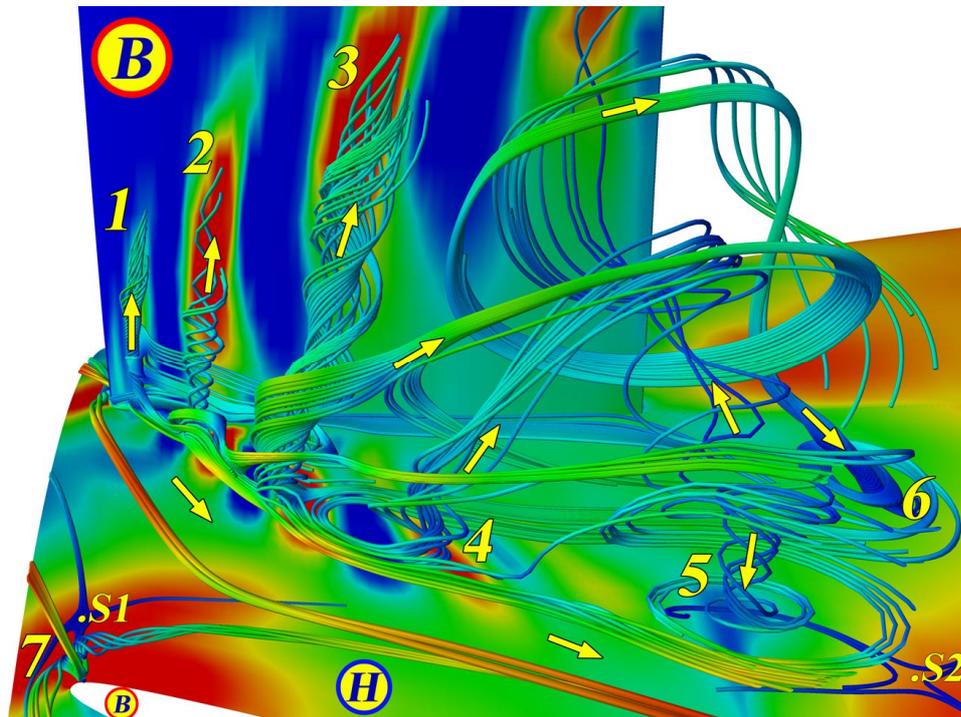


Рис. 2. Вихревая структура в СА2 на режиме b

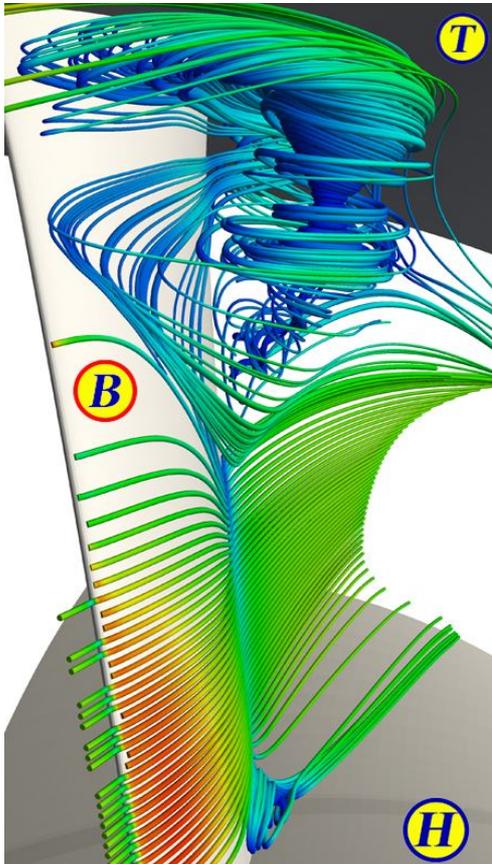


Рис. 3. Вихревая структура в СА2 на режиме f

## Литература

1. Єршов, С.В. Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовісцевих турбомашинах "FlowER" [Текст] / С.В. Єршов, А.В. Русанов // Свідчення про державну реєстрацію прав автора на твір, ПА № 77. Державне агентство України з авторських та суміжних прав, 19.02.1996.
2. Развитие комплекса программ расчета трехмерных течений вязкого сжимаемого газа в лопаточных аппаратах турбомашин [Текст] / С.В. Єршов, В.А. Яковлев, А.И. Деревянко, М.Н. Гризун // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование: Вестник национального технического университета «ХПИ», 2011. – № 5. – С. 25–32.
3. Чжен П. Отрывные течения [Текст]: пер. с англ. / П. Чжен. – М.: Наука, 1972. – Т. 1. – 299 с.
4. Menter, F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications [Text] / F.R. Menter // AIAA J. – 1994. – V. 32, No 8. – P. 1598–1605.
5. Lumley, J.L. Computational modeling of Turbulent Flows [Text] / J.L. Lumley // Adv. Appl. Mech. – 1978. – V. 18. – P. 123–176.
6. Єршов, С.В. Ограничение реализуемости для модели турбулентности SST k- $\omega$  [Текст] / С.В. Єршов // Проблемы машиностроения. – 2008. – Т. 11, № 2. – С. 14–23.

7. Русанов, А.В. Математичне моделювання нестационарних в'язких просторових течій у проточних частинах турбомашин [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.16 / Русанов Андрій Вікторович; НАН України. Ін-т пробл. машинобуд. ім. А.Н. Підгорного. – Х., 2005. – 362 с.

8. Кампти, Н. Аэродинамика компрессоров [Текст]: пер. с англ. / Н. Кампти. – М.: Мир, 2000. – 688 с.

9. Ершов, С.В. Граничные условия во входном пограничном слое для  $k-\omega$  моделей турбулентности [Текст] / С.В. Ершов // Проблемы машиностроения. – 2008. – Т. 11, № 3. – С. 24 – 29.

10. *Unsteady Effects of Shock Wave Induced Separation [Text]: Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design / P. Doerffer et al. (Eds.).* – С.: Springer, 2010. – V.114. – 350 p.

11. Ершов, С.В. Квазимонотонная схема повышенной точности для интегрирования уравнений Эйлера и Навье–Стокса [Текст] / С.В. Ершов, // Математическое моделирование. – 1994. – Т. 6, № 11. – С. 63 – 75.

12. Yershov, S.V. Numerical simulation of 3D separated flow through multistage turbomachine [Text] / S.V. Yershov // ICFM5/95, Proc. 5th Int. Conf. Fluid Mechanics, Cairo, Egypt, 2 – 5 Jan. 1995, Cairo, Cairo University Publication, 1995, V.2. – P. 1 – 10.

13. Аэродинамические исследования модельной компрессорной ступени с малым относительным диаметром втулки [Текст] / Научный отчет ХАИ: 1-29; Нац. аэрокосм. ун-т ім. Н.Е. Жуковського; рук. Ершов Г.В.; исполн. Павленко В.Н. [и др.]. – Х., 1975. – 29 с. – № ГР 74010320 – Инв. № 6507722.

Поступила в редакцию 25.05.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.И. Гнесин, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.

#### ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ТЕЧІЙ В'ЯЗКОГО ГАЗУ У КОМПРЕСОРНИХ РЕШІТКАХ

*С.В. Ершов, Д.О. Козирець*

Запропоновано вдосконалення числового методу розрахунку тривимірних течій в'язкого стисливого газу в проточних частинах компресорів. У новому газодинамічному розв'язувачі реалізовано обмеження реалізованості для турбулентних напружень та виконано уточнення граничних умов на виході. При цьому істотно підвищилась робастність розв'язувача, що проявилось у можливості проведення розрахунків для практично будь-якого режиму від досить довільного початкового наближення. Помилкові відриви в приторцевих примежевих шарах на виході компресора при цьому не виникають. Побудована розрахунковим шляхом характеристика двоступінчатого осевого компресора. Досліджена складна вихрова структура течії в останньому спрямляючому апараті.

**Ключові слова:** чисельний метод, обмеження реалізованості, характеристика компресора, осьова швидкість, розв'язувач.

#### DEVELOPMENT OF SOFTWARE SYSTEM FOR COMPUTATIONS OF 3D VISCOUS COMPRESSIBLE FLOW IN TURBOMACHINERY BLADE ROWS

*S.V. Yershov, D.A. Kozyrets*

The modification of numerical method for computations of 3D viscous compressible flows through compressors is suggested. Realisability constraints for turbulent Reynolds stresses and modification of exit boundary conditions is implemented in the new CFD solver. The robustness of the solver is significantly increased, which was manifested in the possibility to carry out the calculations for any flow conditions using sufficiently arbitrary initial flow-field. In this case spurious separations in endwall boundary layers at the exit of the compressor does not appear. We calculated two-stage axial compressor performance. We studied complex vortex flow structure in the last straightening cascade.

**Key words:** numerical method, realisability constraints, characteristics of the compressor, the axial velocity, solver.

**Ершов Сергей Владимирович** — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины, Харьков, e-mail: yershov@ipmach.kharkov.ua.

**Козырец Дмитрий Александрович** — аспирант, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина, e-mail: trancefer17@rambler.ru.