

УДК 533.6:621.165

С.В. ЕРШОВ*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины*

РАЗВИТИЕ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ ДЛЯ РАСЧЕТА ТРЕХМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОГО ГАЗА

Рассмотрена концепция построения нового CFD решателя для системы уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу применительно к трехмерным течениям вязкого сжимаемого газа в турбомашинах. Обоснован выбор моделей турбулентного течения, моделей турбулентности и численных методов решения уравнений газовой динамики. Показана важность применения ограничений реализуемости и адекватных граничных условий для моделирования течений с высокими положительными градиентами давления. Кратко представлен вид пользовательского интерфейса нового комплекса программ. Приведены результаты тестовых и прикладных расчетов течений вязкого газа.

Ключевые слова: течение вязкого сжимаемого газа, решетки турбомашин, уравнения Навье-Стокса, пакет прикладных программ.

Введение

В настоящее время для расчетов пространственных течений вязкого газа в турбомашинах используются различные CFD решатели уравнений газовой динамики, наиболее известными из которых являются ANSYS CFX, Fluent, Fine Turbo Numeca и др. В конце прошлого века в ИПМаш НАН Украины под руководством автора данной статьи был разработан один из первых в СНГ решателей осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса – программный комплекс FlowER [1]. С его помощью во многих случаях удается моделировать трехмерное течение в турбинах и компрессорах, и совершенствовать их конструкции. Однако возможности применения этого решателя ограничены рядом недостатков. Остановимся на некоторых из них.

С помощью решателя FlowER сложно, а иногда невозможно, проводить расчеты течений с большими положительными градиентами давления, например, в нагруженных компрессорных решетках, в переходных диффузорах газовых турбин, в турбинных ступенях на частичных режимах.

Разностная аппроксимация, реализованная в решателе FlowER, хотя формально и имеет второй порядок, но только для равномерных сеток, и весьма чувствительна к изломам разностной сетки. При этом сходимость решений слишком медленная.

Программный код FlowER написан более 15 лет назад, громоздкий, трудночитаемый и плохо поддающийся модификации. Диалоговый интерфейс не работает в операционных средах Windows Vista/7, а также на 64-разрядных компьютерах.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости разработки нового CFD решателя, ли-

шенного перечисленных выше недостатков. Основные принципы, заложенные в основу такой разработки, представлены в настоящей статье.

1. Модели течения

Для численного моделирования потока вязкого газа в проточных частях турбомашин могут быть применены различные математические модели течения. Для осредненного турбулентного потока, как правило, используется модель RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) – осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Нестационарное поведение крупномасштабной турбулентности моделируется с помощью модели LES (Large-Eddy Simulation). Для прямого численного моделирования турбулентности используется модель DNS, в основу которой положена система уравнений Навье-Стокса. Существуют гибридные RANS/LES модели течения, позволяющие рассчитать наиболее крупные вихри, соизмеримые по масштабу с обтекаемыми телами.

Согласно современным оценкам полноценные расчеты течений в решетках турбин и компрессоров при высоких числах Рейнольдса по моделям DNS и LES вряд ли будут возможны в ближайшие десятилетия, поэтому модель RANS еще долго будет оставаться основной моделью для прикладных исследований течений в турбомашинах [2]. При этом гибридные RANS/LES модели течения могут привлекаться для единичных исследовательских расчетов.

Так как разрабатываемый CFD решатель предназначен как для прикладных расчетов, так и для изучения свойств течений в решетках турбомашин, то в нем должны быть заложены следующие основные модели течения: RANS и RANS/LES.

2. Модели турбулентности

Существует три основных класса моделей турбулентности для уравнений RANS: алгебраические и дифференциальные модели турбулентной вязкости, и модели переноса рейнольдсовых напряжений. Последние, несмотря на большой потенциал, редко используются при решении сложных внутренних задач, так как недостаточно хорошо описывают пристеночные течения. Алгебраические модели турбулентной вязкости, по-видимому, достигли предела своих возможностей и позволяют получать удовлетворительные результаты только для простых течений. В то же время дифференциальные модели турбулентной вязкости продолжают развиваться, во многом за счет привлечения новых данных о турбулентности, полученных в DNS и LES моделировании, что делает их выбор предпочтительным.

Для течений в лопаточных аппаратах турбомашин хорошо себя зарекомендовали дифференциальные модели турбулентной вязкости Спаларта-Аллмараса [3] и $k-\omega$ SST [4], поэтому их целесообразно использовать в новом CFD решателе. Учет ламинарно-турбулентного перехода [5] позволит повысить точность определения потерь в ступенях турбомашин и улучшить моделирование теплообмена на охлаждаемых лопатках. Чтобы модель турбулентности не генерировала физически нереализуемые турбулентные напряжения, необходимо использовать ограничения реализуемости [6].

Гибридные модели RANS/LES могут быть построены на основе обычных дифференциальных моделей турбулентности, таким образом, чтобы в зависимости от масштабов сетки и турбулентности в локальной области течения моделировать только неразрешаемые сеткой вихри и выполнять расчет разрешаемых вихрей напрямую.

3. Граничные условия

Постановка граничных условий на проницаемых и твердых границах расчетной области для уравнений RANS к настоящему времени достаточно хорошо проработана, поэтому нет смысла на ней подробно останавливаться. Численная реализация граничных условий, включающая дополнительные соотношения, которые связывают параметры на границе с параметрами в расчетной области, строится на основе системы линейных уравнений, записанных для приращений параметров на границе [7].

Постановка граничных условий на проницаемых границах, основанная на соотношениях на характеристиках, может приводить к появлению в рассматриваемом потоке ложных возвратных течений. Для течений с большими положительными градиен-

тами давления этого может быть достаточно, чтобы расчет оказался невозможным. Для устранения такого недостатка в настоящей работе в тех точках границы, где диффузионные эффекты преобладают над конвективными, и может возникнуть обратное течение, предлагается не использовать характеристические соотношения, которые в этом случае не выполняются. Задание расходной компоненты скорости в качестве граничного условия на выходной границе вместо статического давления, расхода или инварианта Римана повышает устойчивость решений. Неравномерность осевой скорости по радиальной координате может быть учтена навязыванием профиля скорости в приторцевых пограничных слоях [8], а в ядре потока – применением условия радиального равновесия для осевой скорости.

4. Численные методы и алгоритмы

Для расчета течений по RANS и гибридным RANS/LES моделям обычно достаточно методов второго или третьего порядка аппроксимации. Методы более высокого порядка могут быть полезными для расчета турбулентных вихрей с помощью моделей LES и DNS. В разрабатываемом решателе в качестве основных численных методов закладываются ENO-схема второго порядка аппроксимации [9] и TVD-схема третьего порядка [10]. Для уточнения расчетов на изломах сетки необходимо использовать поправки, учитывающие различия направлений, вдоль которых выполняется реконструкция и экстраполяция.

В первоначальных версиях решателя FlowER аппроксимация диффузионных членов осуществлялась с помощью производных ENO-реконструкции, что порождало неустойчивость профиля скорости в пограничном слое. Для устранения этого недостатка в последующих версиях нормальные напряжения на гранях ячеек приближались двухточечными разностями, что в свою очередь приводило к потере аппроксимации на неравномерных сетках. В новом решателе предлагается использовать для диффузионных членов центрально-разностную аппроксимацию второго порядка.

Неявная схема Бима-Уорминга, реализованная в решателе FlowER, основана на устаревших идеях линеаризации и факторизации разностных аналогов исходных дифференциальных уравнений. При больших шагах по времени такой подход снижает точность решения или даже не обеспечивает его устойчивость. В настоящей работе предлагается использовать неявную итерационную схему, построенную с помощью метода Ньютона.

За счет погрешностей вычислений положительно определенные величины (например, давление и

кинетическая энергия турбулентности) в расчете могут стать отрицательными. Избежать этого можно, преобразовав приращения положительно определенных величин в приращения их логарифмов [11] или используя нелинейную коррекцию приращений, обеспечивающую сходные результаты [12].

5. Программная реализация

Одно из основных требований к новому CFD решателю (получившему рабочее название F) – это его приемственность программному комплексу FlowER. Препроцессор и постпроцессор CFD решателя F написаны на языке Fortran-90 для операционных сред семейства Windows. Графические возможности реализованы с использованием программного интерфейса к стандартным средствам ОС Windows. Тестирование разработанного кода выполнено под операционными системами семейства Windows (XP, Vista, 7, Server 2003), а также для эмулятора Wine операционной системы Linux Ubuntu.

В CFD решателе F реализованы следующие новые возможности: работа с распределенной базой данных; многократный одновременный запуск программы на одном компьютере; экспорт результатов расчетов в форматы внешних постпроцессоров (Paraview, Tecplot и др.); упрощенный доступ ко всем данным проекта; работа с сетками свыше 10 миллионов ячеек в межлопаточном канале и др. Кроме того, по сравнению с пре- и постпроцессорами решателя FlowER в новом программном продукте

- выполнена реализация сгущений сетки к твердым поверхностям, требующая меньшее количество ячеек;
- добавлена возможность оценки качества сетки;
- улучшено начальное приближение для расчета;
- исправлены ошибки при построении графиков параметров течения и визуализации изолиний;
- расширен список визуализируемых параметров;
- добавлены возможности осреднения параметров в окружном и радиальном направлениях;
- внесены исправления и уточнения, улучшающие и упрощающие работу с программой.

Общий вид пользовательского интерфейса CFD решателя F показан на рис. 1-2.

6. Тестовые расчеты

Задача взаимодействия скачка уплотнения с турбулентным пограничным слоем является классическим примером течения с большими положитель-

ными градиентами давления. При падении косога скачка на обтекаемую газом поверхность с турбулентным пограничным слоем вблизи точки падения образуется отрывная зона. Точка отрыва расположена по отношению к точке падения выше по потоку, а точка присоединения – ниже. Отраженный скачок возникает вблизи точки отрыва. За отраженным скачком отрывная область генерирует волны разрежения, а еще ниже по потоку – волны сжатия. Такая картина течения хорошо качественно и удовлетворительно количественно прогнозируется методом расчета осредненных турбулентных течений вязкого сжимаемого газа с использованием модели турбулентности $k-\omega$ SST Ментера, ограничений реализуемости и уточненных граничных условий на выходе расчетной области. При расчете с помощью стандартного решателя FlowER, в котором не используются ограничения реализуемости, получается физически неправильная ламинарноподобная картина течения с двумя отраженными скачками уплотнения и осцилляциями давления в отрывной области (рис. 3). Следует также отметить, что получить решение по старому CFD решателю сложно или даже невозможно, если в процессе установления по времени в непосредственной окрестности выходной границы расчетной области в пограничном слое наблюдается рост давления в направлении течения.

7. Расчет течения в многоступенчатом компрессоре

Для проточных частей компрессоров авиационных двигателей и стационарных турбоустановок характерны течения с большими положительными градиентами давления. Поэтому расчет течения вязкого газа в многоступенчатых компрессорах часто вызывает трудности. С помощью решателя FlowER такие расчеты обычно выполняют, используя в качестве начального приближения установившееся решение в точке, лежащей на характеристике компрессора правее от текущей. К сожалению, даже в этом случае не всегда удается рассчитать характеристику компрессора, так как возникающие в процессе установления отрывы имеют тенденцию к неограниченному росту, что, в конце концов, может привести к аварийному останову программы.

Включение в модель ограничений реализуемости и модификация граничных условий на границе выхода позволили выполнять расчеты для любого режима компрессора при достаточно произвольном начальном приближении. На рис. 4 приведена характеристика компрессора, полученная таким способом. Правая (рабочая) ветвь характеристики располагается между точками **a** (режим записания) и **c**

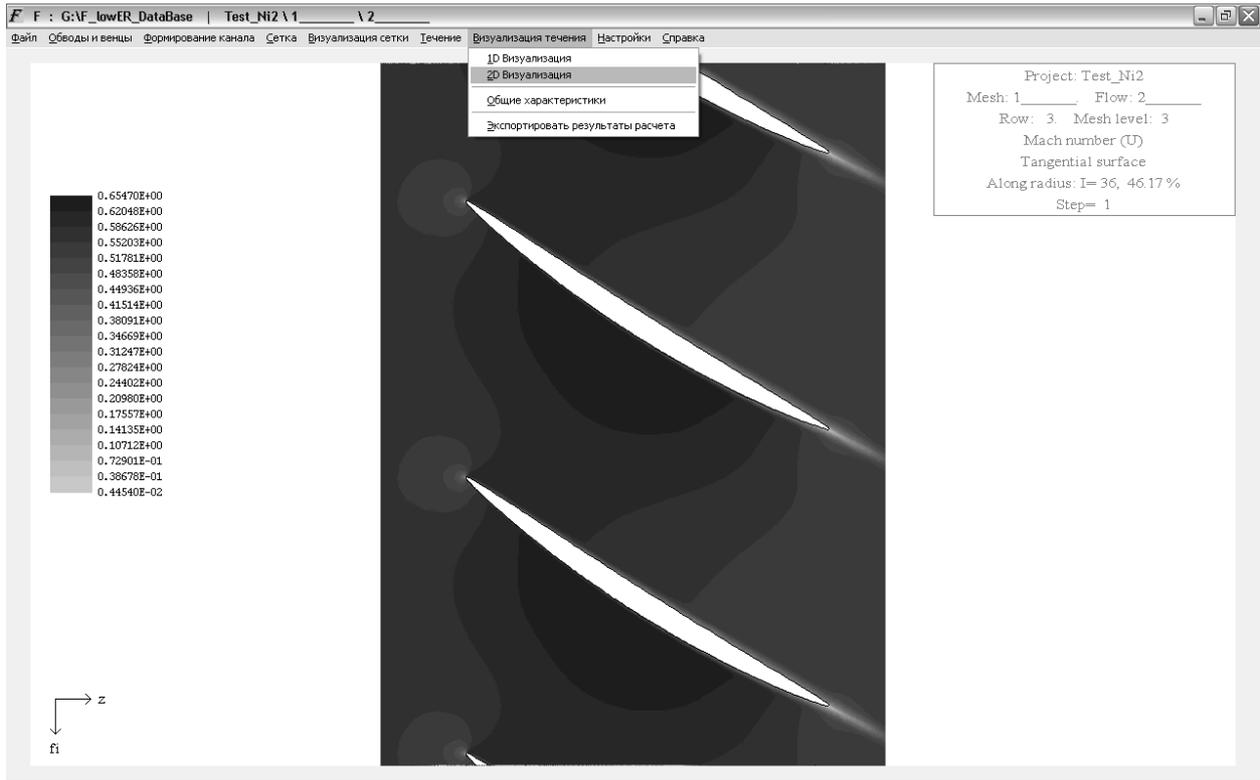


Рис. 1. Изолинии чисел Маха в решетке компрессора (постпроцессор решателя F)

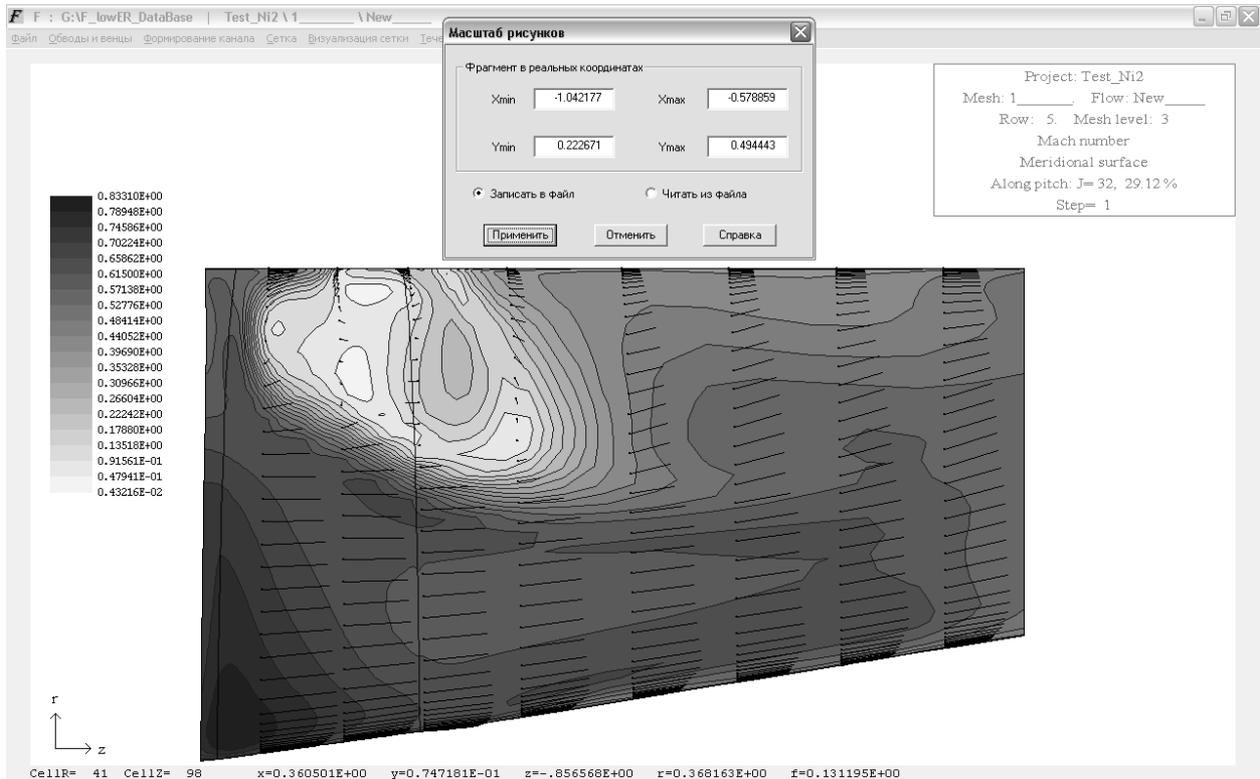


Рис. 2. Числа Маха и векторы скорости в меридиональном сечении спрямляющего аппарата компрессора (постпроцессор решателя F)

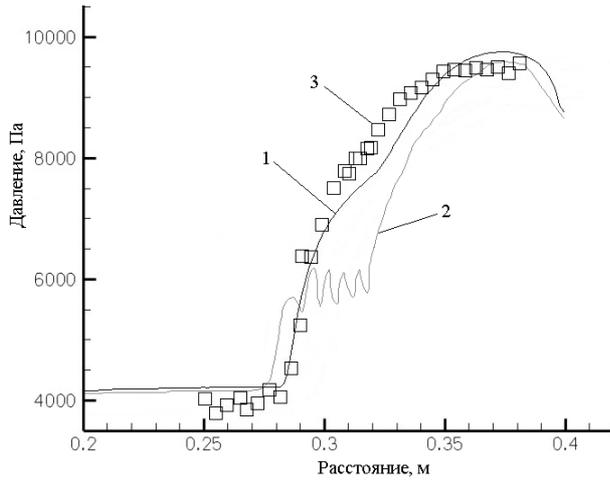


Рис. 3. Распределение давления в области взаимодействия:

- 1 – расчет данной работы;
- 2 – расчет по стандартной версии решателя FlowER;
- 3 – экспериментальные данные [13]

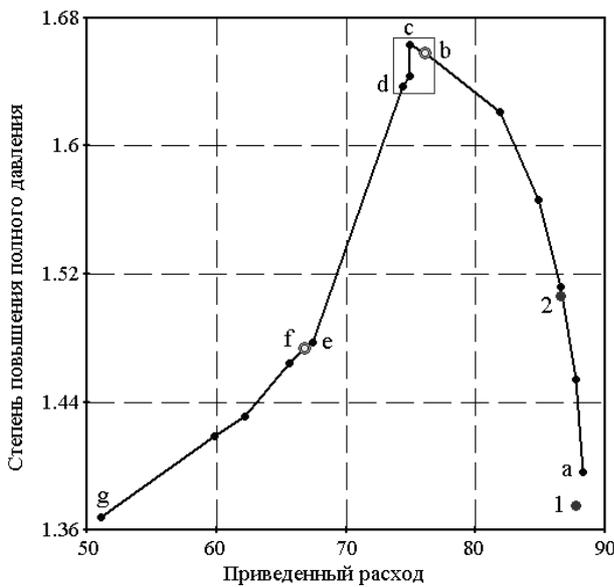


Рис. 4. Характеристика компрессора

(граница устойчивости). Левая (срывная) ветвь характеристики ограничена точками **e** и **g**. Переход с рабочей ветви на срывную происходит между точками **c** и **e**. Для режимов, соответствующих началу переходного участка характеристики (между точками **b** и **d**) численное решение оказалось нестационарным. Необходимо отметить, что при использовании стандартной версии решателя FlowER удалось получить решение только вблизи запираания для режимов, соответствующих точкам **1** и **2**.

Описанным выше образом удалось моделировать течение в компрессоре как на расчетных, так и существенно срывных режимах. На рис. 4 приведе-

ны векторы скорости в меридиональном сечении последнего спрямляющего аппарата компрессора на режиме **f**. Наблюдаемый на периферии отрыв занимает в окружном направлении до 60% канала, однако его размеры и положение стабильны и решение устанавливается. Для этого режима линии тока в отрывной области приведены на рис. 5, а, а поверхностные линии тока на стенках лопатки и периферийного обвода даны на рис. 5, б. Здесь используются следующие обозначения: **B** – поверхность лопатки; **T** – периферийная ограничивающая поверхность; **H** – втулочная поверхность; **s1** и **n** – седловая и узловая точки, относящиеся к угловому вихрю; **f1**, **f2** и **f3** – фокусы, в которых зарождаются вихри; **s2** и **s3** – седловые точки, из которых выходят линии отсоединения, отделяющие рассматриваемую отрывную область от основного потока.

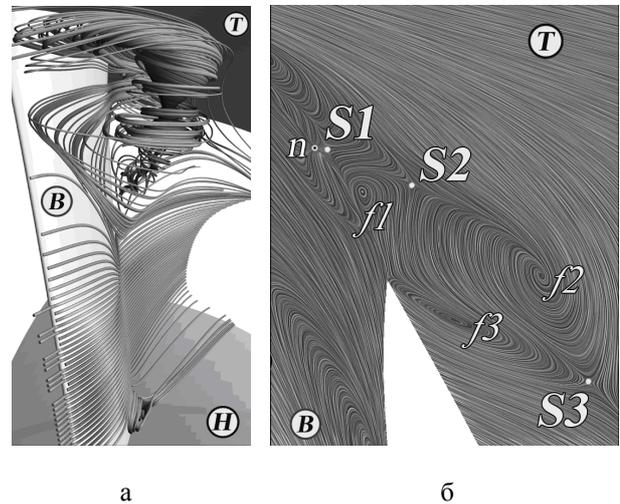


Рис. 5. Отрывное течение в периферийной угловой области последнего спрямляющего аппарата на режиме **f**:

а – линии тока; б – предельные линии тока

Заключение

Предложена концепция нового CFD решателя, предназначенного для расчетов течений вязкого газа в проточных частях турбомашин. Отмечена важность использования уточненных моделей турбулентности и адекватных физике течения граничных условий. Приведены мгновенные снимки экрана оболочки нового решателя и результаты тестовых и прикладных расчетов течений, в том числе с большими положительными градиентами давления.

Литература

1. Єршов, С.В. Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовіцевих турбомашинах "FlowER" [Текст] / С.В. Єршов, А.В. Русанов: Свідцтво про державну реєстрацію прав автора на

твір, ПА № 77. Державне агентство України з авторських та суміжних прав, 19.02.1996.

2. Hirsch, Ch. Reynolds-Averaged Navier-Stokes modelling for industrial applications and some challenging issues [Text]/ Ch. Hirsch, B. Tartinville // *Int. J. Computational Fluid Dynamics*. – 2009. – V.23, № 4. – P. 295-303.

3. Spalart, P.R. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows [Text]/ P.R. Spalart, S.R. Allmaras // *Recherche Aerospaciale*. – 1994. – № 1. – P. 5-21.

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

5. Еришов, С.В. Низко-рейнольдсовая модель турбулентности с ограничителем производства кинетической энергии [Текст]/ С.В. Еришов, А.И. Деревянко // *Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник национального технического университета «ХПИ»*. – 2010. – № 2. – С. 81-85.

6. Lumley, J.L. Computational Modeling of Turbulent Flows [Text]/ J.L. Lumley // *Adv. Appl. Mech.* – 1978. – V. 18. – P. 123-176.

7. Еришов, С.В. Численная реализация граничных условий на проницаемых границах для уравнений газовой динамики [Текст] / С.В. Еришов // *Проблемы машиностроения*. – 2011. – Т. 14, № 4. – С. 25-37.

8. Еришов, С.В. Численное моделирование трех-

мерных отрывных течений вязкого сжимаемого газа в многоступенчатых компрессорах [Текст]/ С.В. Еришов, Д.А. Козырец / *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. – 2012. – Т. 9, № 1. – С. 15-24.

9. Еришов, С.В. Квазилинейная схема повышенной точности для интегрирования уравнений Эйлера и Навье–Стокса [Текст] / С.В. Еришов // *Мат. моделирование*. – 1994. – Т. 6, № 11. – С. 63–75.

10. Zijlema, M. On the construction of a third-order accurate TVD scheme using Leonard's normalized variable diagram with application to turbulent flows in general domains [Text]/ M. Zijlema // *Delft University of Technology: Technical Report DUT-TWI-94-104*. – 1994. – 25 p.

11. Lund, E. Shape Optimization of Fluid–Structure Interaction Problems Using Two-Equation Turbulence Models [Text]/ E. Lund, H. Møller, L.A. Jakobsen // *AIAA Paper*. – 2002. – № 2002-1478. – 11 p.

12. Тилляева, Н.И. Обобщение модифицированной схемы С.К. Годунова на произвольные нерегулярные сетки [Текст]/ Н.И. Тилляева // *Уч. зап. Центр. аэрогидродинам. ин-та*. – 1986. – Т. 17, № 2. – С. 18–26.

13. Polivanov, P. Experimental Study of Unsteady Effects in Shock Wave / Turbulent Boundary Layer Interaction [Text]/ P. Polivanov, A. Sidorenko, A. Maslov // *AIAA Paper*. – 2009. – № 2009-409. – 7 p.

Поступила в редакцию 22.05.2012

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

РОЗВИТОК КОМПЛЕКСУ ПРОГРАМ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТРИВИМІРНИХ ТЕЧІЙ В'ЯЗКОГО ГАЗУ

С.В. Еришов

Розглянута концепція побудови нового CFD розв'язувача для системи рівнянь Навьє-Стокса осереднених за Рейнольдсом стосовно до тривимірних течій в'язкого стисливого газу в турбомашинах. Обґрунтовано вибір моделей турбулентної течії, моделей турбулентності та числових методів розв'язку рівнянь газової динаміки. Показана важливість застосування обмежень реалізованості та адекватних граничних умов для моделювання течій з додатними градієнтами тиску. Стисло представлено вигляд користувальницького інтерфейсу нового комплексу програм. Приведені результати тестових розрахунків течій в'язкого газу.

Ключові слова: течія в'язкого стисливого газу, решітки турбомашин, рівняння Навьє-Стокса, модель турбулентності, пакет прикладних програм.

DEVELOPMENT OF APPLICATION PACKAGE FOR 3D FLOW COMPUTATIONS

S.V. Yershov

The conception of the new CFD solver for the 3D turbomachinery viscous compressible flow simulation using the RANS equations is considered. Choice of turbulent flow model, turbulence models and numerical methods is grounded. Realisability constraints and special boundary conditions are shown to be important for adverse pressure gradient flows. User interface of new application package is shown briefly. The numerical results for some test cases are presented.

Key words: viscous compressible flow, turbomachinery cascades, Navier-Stokes equations, turbulence modeling, application package.

Еришов Сергей Владимирович – д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина, e-mail: yershov@ipmach.kharkov.ua, sergiy.v.yershov@gmail.com.