

Рис. 5. Лінії току в аеродинамічній трубі

працездатними для створення осесиметричного потоку та градієнта швидкості в робочій зоні труби, що дозволяє використовувати стенд для визначення аеродинамічних характеристик ортогональних вітродвигунів.

Література

1. Шабаров В. В. Применение системы ANSYS к решению гидрогазодинамических задач / В. В. Шабаров. – Нижний Новгород: Нижнее Новгородский гос. ун-т, 2006. – 108 с.
2. Абрамовский Е. Р. Аэродинамика ветродвигателей / Е. Р. Абрамовский, С. В. Городько, Н. В. Свиридов // Учеб. пособие. – Днепропетровск: Днепропетровский ун-т, 1987. – 220 с.

Надійшла до редакції
29.09.12

УДК 533.6:621.165

С. В. Ершов, д-р. техн. наук

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины
(г. Харьков, e-mail: yershov@ipmach.kharkov.ua, sergiy.v.yershov@gmail.com)

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОГО ГАЗА В РЕШЕТКАХ ТУРБОМАШИН

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

Розглянута концепція побудови нового CFD розв'язувача для системи рівнянь Нав'є-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'язання рівнянь газовой динаміки. Відмічена важливість застосування обмежень реалізованості та адекватних граничних умов для моде-

лювання течій з великими додатними градієнтами тиску. Стисло наведено вигляд корисувального інтерфейсу нового комплексу програм. Подані результати тестових та прикладних розрахунків в 'язких течій.

Введение

Важность разработки эффективных численных моделей и методов расчета пространственных течений вязкого газа в турбомашинах сегодня не вызывает сомнения. Несмотря на высокий потенциал коммерческих CFD решателей, таких, как ANSYS CFX, Fluent, Fine Turbo Numesa и пр., их применение не всегда целесообразно. Это связано с тем, что данные решатели, являясь по сути универсальными, пригодными для решения широкого круга задач газодинамики, требуют как повышенных вычислительных ресурсов, так и сложных процедур подготовки расчета и обработки результата. Поэтому многовариантные расчеты течения при варьировании геометрии проточной части оказываются трудноосуществимыми.

Под руководством автора данной статьи разработан один из первых в СНГ решателей осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса – программный комплекс FlowER [1]. Он широко использовался в научно-исследовательских, учебных и конструкторских организациях Украины, России и Польши. С его помощью выполнялось как моделирование трехмерных течений в турбомашинах, так и усовершенствование их конструкций. Тем не менее, ряд существенных недостатков данного программного комплекса ограничивает возможности его дальнейшего применения для исследовательских целей и проектирования.

В решателе FlowER реализованы три модели пространственного потока, а именно, модель течения невязкого газа, построенная на основе нестационарных трехмерных уравнений Эйлера, модель ламинарного течения вязкого газа при низких числах Рейнольдса, использующая уравнения Навье–Стокса, и модель осредненного турбулентного течения вязкого газа, в которую заложены осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса. Однако этого уже недостаточно, и при исследовании турбулентных течений требуются более современные модели течения.

Выбор моделей турбулентности в решателе FlowER ограничен тремя моделями семейства $k-\omega$. Реализация этих моделей выполнена на устаревших представлениях и с определенными неточностями. В результате решатель плохо работает для 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.

При визуализации результатов расчетов в виде графиков и двухмерных полей параметров используются некоторые не всегда допустимые упрощения, которые в отдельных случаях приводят к значительным погрешностям.

Ядро решателя FlowER написано более 15 лет назад. Диалоговый интерфейс, созданный для операционной системы DOS, не работает в операционных средах Windows Vista/7, а также на 64-разрядных компьютерах. Ограничения оперативной памяти ПК на момент создания как решателя FlowER, так и всего программного комплекса привели к громоздкому, трудночитаемому и плохо поддающемуся модификации программному коду.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости разработки нового CFD решателя, лишённого перечисленных выше недостатков. Основные принципы, лежащие в основе такой разработки, представлены в настоящей статье.

1. Модели течения

В настоящее время для численного моделирования турбулентного потока вязкого газа в проточных частях турбомашин используются следующие математические модели течения. Осредненный турбулентный поток, как правило, описывается с помощью модели RANS

(Reynolds–Averaged Navier–Stokes) – осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса. Для исследования нестационарного поведения крупномасштабной турбулентности применяют модели LES (Large–Eddy Simulation), в которых крупные масштабы рассчитываются непосредственно, а мелкие – моделируются с помощью простых моделей. Прямое численное моделирование турбулентности использует модель DNS (Direct Numerical Simulation), 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. Переход от более простой модели к более сложной для турбулентных течений при высоких числах Рейнольдса обычно требует увеличения вычислительных ресурсов на 2-3 порядка. Применение моделей непосредственного расчета турбулентных вихрей с игнорированием этого факта (например, на недостаточно измельченных сетках) бессмысленно. Очевидно, что в этом случае получаемый результат будет соответствовать числу Рейнольдса, определяемому схемной вязкостью – т. е. шагом сетки, и даже качественно не будет соответствовать искомому результату, так как размеры вихрей, частоты турбулентных пульсаций определяются именно числом Рейнольдса. 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]. В то же время гибридные модели течения уже сегодня могут привлекаться для единичных исследовательских расчетов.

Поскольку разрабатываемый CFD решатель предназначается 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

Для уравнений RANS разработано большое количество моделей турбулентности и, к сожалению, ни одна из них не обеспечивает хорошего количественного согласования результатов расчетов с экспериментальными данными для всех типов течения. Поэтому при выборе модели турбулентности необходимо стремиться к тому, чтобы она приемлемо описывала явления и процессы, характерные для исследуемого течения.

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 моделей турбулентности таким образом, чтобы в зависимости от масштабов сетки и турбулентности локально моделировать только неразрешаемые сеткой вихри и выполнять расчет разрешаемых вихрей напрямую. При таком подходе данные модели будут представлять собой модификацию исходных дифференциальных моделей турбулентности [7].

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 [8].

Постановка граничных условий на проницаемых границах, использующая соотношения на характеристиках, может приводить к появлению в рассчитываемом потоке ложных возвратных течений. Для течений с большими положительными градиентами 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 [9], а в ядре потока – применением условия радиального равновесия для осевой скорости.

4. Численные методы и алгоритмы

Выбор численного метода во многом определяется решаемыми дифференциальными уравнениями.

Для моделей течения LES и DNS, позволяющих рассчитывать турбулентные вихри различных масштабов напрямую, необходимо использовать методы высокого (4-го и выше) порядка аппроксимации, причем применение противопоточных схем, построенных на принципах TVD, ENO (WENO), оказывается нецелесообразным в силу их высокой диссипативности. Большинство исследователей склоняется к точке зрения, что для этих задач удачным выбором является использование центрально-разностных схем с контролируемым уровнем осцилляций.

Для расчета течений по RANS и гибридным RANS/LES моделям обычно достаточно методов второго или третьего порядка аппроксимации, которые оказываются эффективнее своих аналогов повышенной точности. TVD, ENO (WENO) схемы в этом случае позволяют получать не осциллирующие решения, а повышенная диссипация не оказывает вредного влияния, так как практически не действует на разрешаемые турбулентные масштабы.

В разрабатываемом решателе в качестве основных численных методов закладываются ENO-схема второго порядка аппроксимации [10] и TVD-схема третьего порядка [11]. 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. В дальнейшем для устранения этого недостатка нормальные напряжения на гранях ячеек приближались двухточечными разностями, что в свою очередь приводило к потере аппроксимации на неравномерных сетках. В новом решателе для диффузионных членов предлагается центрально-разностная аппроксимация 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 устойчивости. В настоящей работе предлагается использовать неявную итерационную схему, построенную с помощью метода Ньютона. Для повышения устойчивости итерационного процесса, выполняемого на каждом шаге по времени, может использоваться неявное сглаживание приращений [2].

За счет погрешностей вычислений положительно определенные величины (например кинетическая энергия турбулентности) в расчете могут стать отрицательными. Избежать этого можно, преобразовав в исходных уравнениях приращения положительно определенных величин в приращения их логарифмов [12] или используя нелинейную коррекцию приращений, обеспечивающую сходные результаты [13].

5. Программная реализация

Одно из основных требований к новому CFD решателю, получившему рабочее название F, – это его преемственность 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 различных эмуляторов.

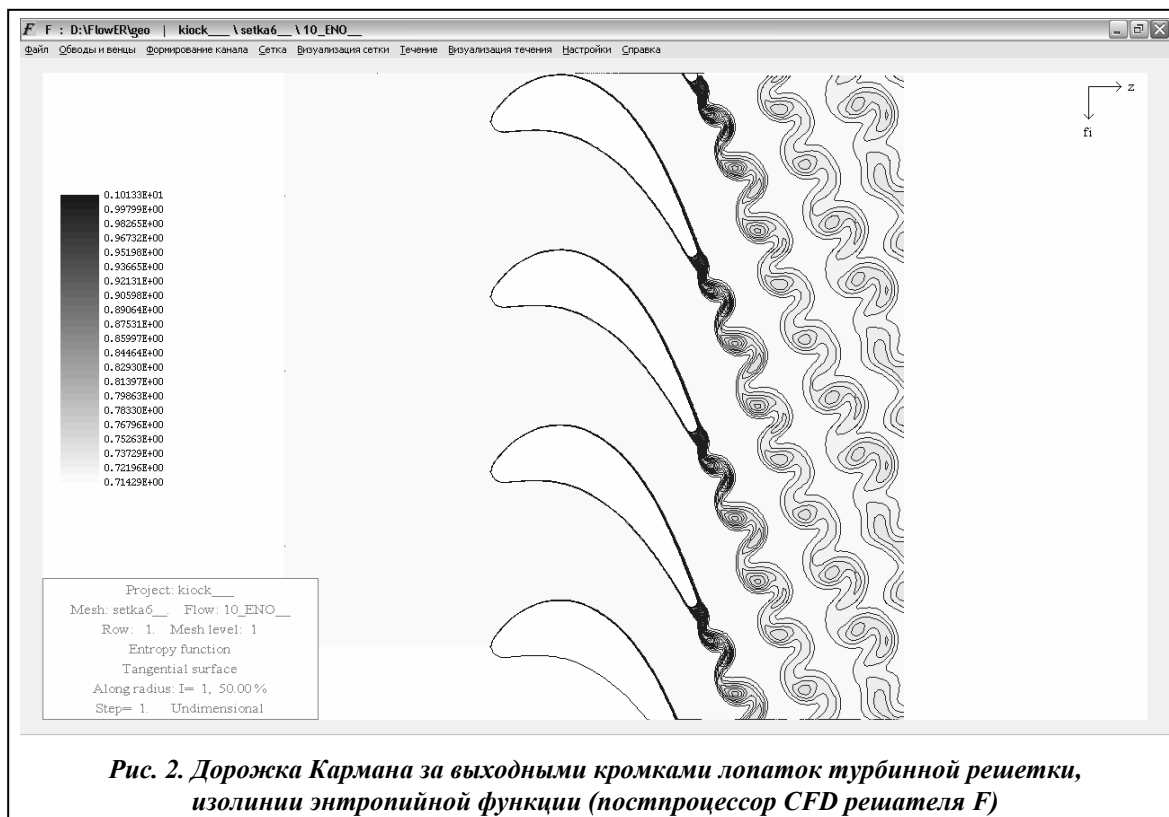
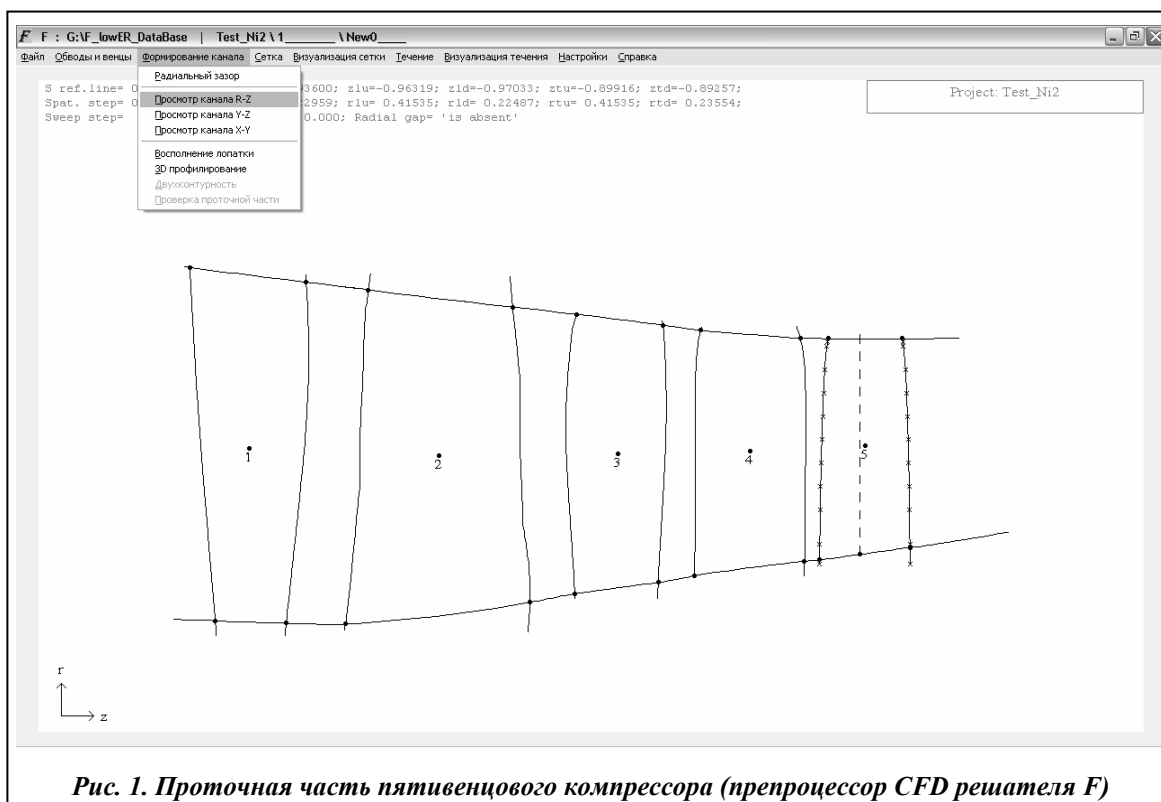
В диалоговом интерфейсе CFD решателя F реализованы следующие новые возможности: работа с распределенной базой данных; многократный одновременный запуск программы на одном компьютере; экспорт результатов расчетов в форматы внешних постпроцессоров (Paraview, Tecplot и др.); упрощенный доступ ко всем данным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

- выполнена реализация сгущений сетки к твердым поверхностям, требующая меньшего количества ячеек;
- добавлена возможность оценки качества сетки;
- улучшено начальное приближение для расчета;
- исправлены ошибки при построении графиков параметров течения и визуализации изолиний;
- значительно расширен список визуализируемых параметров;
- добавлены возможности осреднения параметров в окружном и радиальном направлениях;
- существенно улучшена система справки;
- внесены исправления и уточнения, улучшающие и упрощающие работу с программой, предоставляющие более широкие возможности пользователям.

Общий вид пользовательского интерфейса CFD решателя F показан на рис. 1–4.

6. Тестовые расчеты

Задача взаимодействия скачка уплотнения с турбулентным пограничным слоем является классическим примером течения с большими положительными градиентами давления. При падении косоугольного 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. 5). 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.



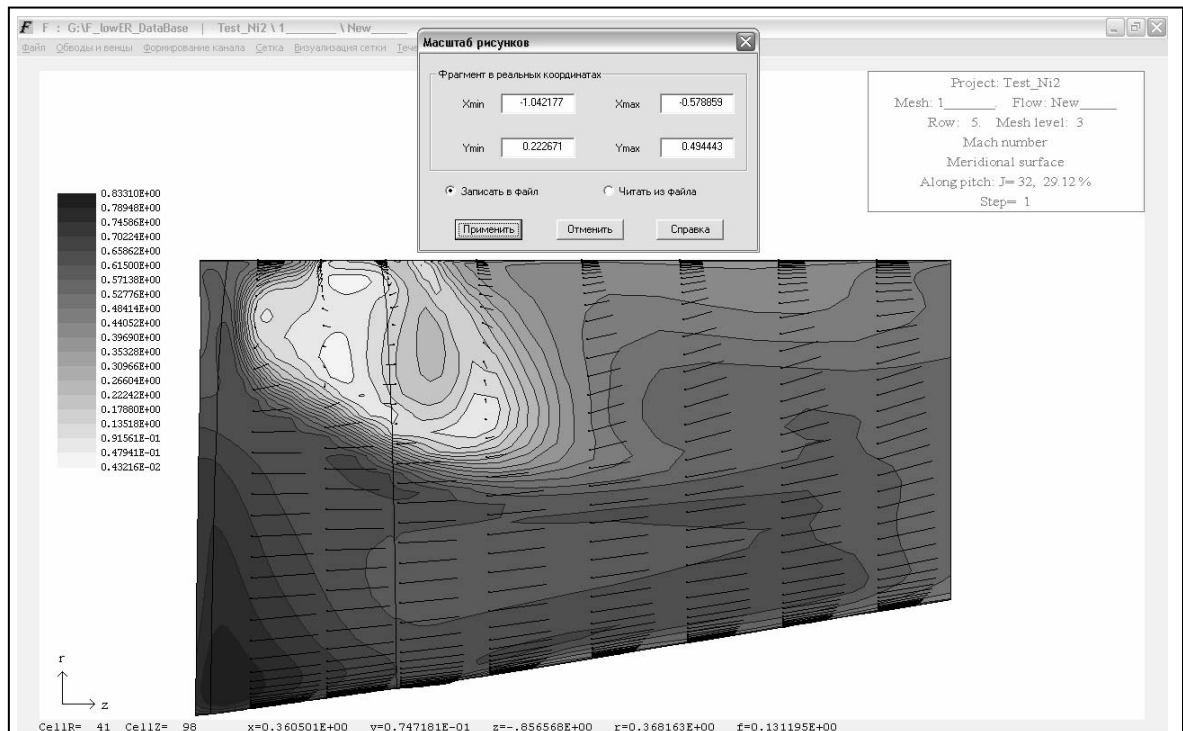


Рис. 3. Числа Маха и векторы скорости в меридиональном сечении пятого венца компрессора (постпроцессор CFD решателя F)

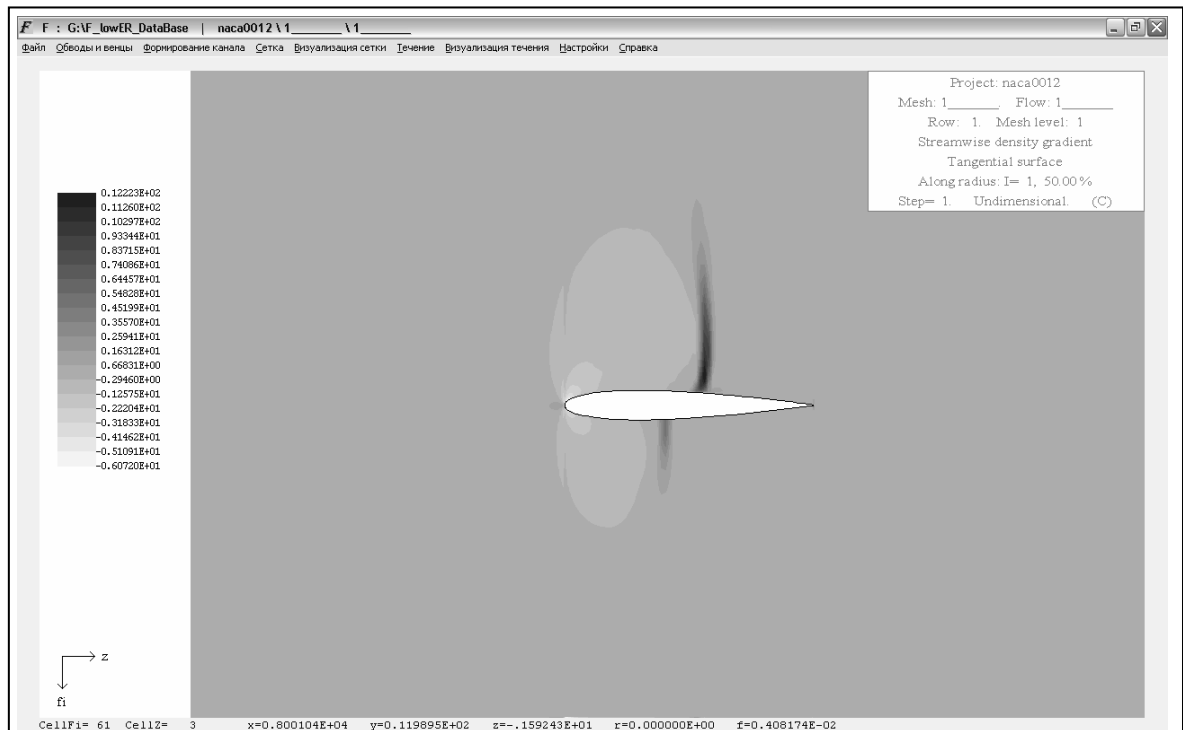


Рис. 4. Шлирен-визуализация [15] обтекания профиля NACA 0012, полученная расчетным путем (постпроцессор CFD решателя F)

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. Так, для пятивенцового компрессора, приведенного на рис. 1, расчет с помощью последних версий CFD решателя FlowER оказался возможен только в ближайшей окрестности режима запираания.

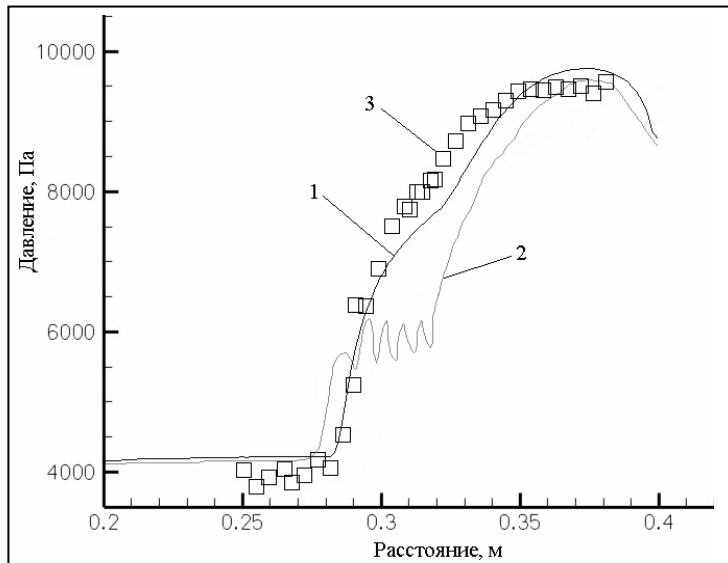


Рис. 5. Распределение давления в области взаимодействия: 1 – расчет данной работы; 2 – расчет по стандартной версии решателя FlowER; 3 – экспериментальные данные [14]

Включение в модель ограничений реализуемости, строгая запись рейнольдсовых напряжений и модификация граничных условий на границе выхода позволили выполнять расчеты для любого режима компрессора при достаточно произвольном начальном приближении. На рис. 6 приведена характеристика компрессора, полученная таким способом. Правая (рабочая) ветвь характеристики располагается между точками *a* (режим запираания) 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*. Для режимов, соответствующих началу переходного участка характеристики (между точками *b* и *d*), численное решение оказалось существенно нестационарным. Необходимо отметить, что при использовании стандартной версии решателя FlowER удалось получить решение только вблизи запираания для режимов, соответствующих точкам 1 и 2.

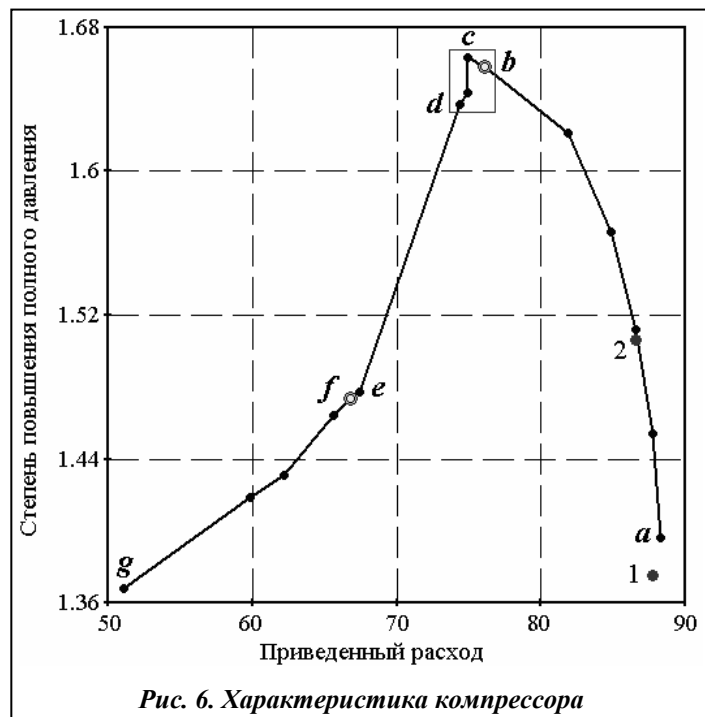


Рис. 6. Характеристика компрессора

Тестирование нового комплекса программ также включало:

- расчеты обтекания изолированных профилей NASA 0012 и RAE 2822;
- расчеты течений на пластине и тестовой компрессорной решетке с учетом ламинарно-турбулентного перехода;
- расчеты течения в компрессорной решетке Rotor 37;

– расчеты отрывных течений в многоступенчатых компрессорах.

Результаты, полученные в этих исследованиях, будут опубликованы в ближайшее время.

Заключение

Предложена концепция нового CFD решателя, предназначенного для расчетов трехмерных течений вязкого газа в проточных частях турбомашин. Оговорена важность использования уточненных моделей турбулентности и адекватных физике течения граничных условий. Приведены мгновенные снимки экрана оболочки нового решателя и результаты тестовых расчетов течений в области взаимодействия скачка уплотнения с турбулентным пограничным слоем и в многоступенчатом компрессоре. Показано, что разработанный CFD решатель позволяет проводить расчеты течений с большими положительными градиентами давления.

Литература

1. *Єршов С. В.* Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовісцевих турбомашинах “FlowER” / С. В. Єршов, А. В. Русанов: Свідоцтво 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 / Ch. Hirsch, B. Tartinville // *Int. J. Computational Fluid Dynamics*. – 2009. – Vol. 23, № 4. – P. 295–303.
3. *Spalart P. R.* A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows / 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 / F. R. Menter // *AIAA J.* – 1994. – Vol. 32, № 8. – P. 1598–1605.
5. *Єршов С. В.* Низко-рейнольдсовая модель турбулентности с ограничителем производства кинетической энергии / С. В. Ершов, А. И. Деревянко // *Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование: Вестн. нац. техн. ун-та «ХПИ»*. – 2010. – № 2. – С. 81–85.
6. *Lumley J. L.* Computational Modeling of Turbulent Flows / J. L. Lumley // *Adv. Appl. Mech.* – 1978. – Vol. 18. – P. 123–176.
7. *Abdol-Hamid Kh. S.* Numerical Study of High Temperature Jet Flow Using RANS/LES and PANS Formulation / Kh. S. Abdol-Hamid, A. Elmiligui / *AIAA Pap.* – 2005. – № 5092. – 17 p.
8. *Єршов С. В.* Численная реализация граничных условий на проницаемых границах для уравнений газовой динамики / С. В. Ершов // *Пробл. машиностроения*. – 2011. – Т. 14, № 4. – С. 25–37.
9. *Єршов С. В.* Численное моделирование трехмерных отрывных течений вязкого сжимаемого газа в многоступенчатых компрессорах / С. В. Ершов, Д. А. Козырец / *Компрессор. и энерг. машиностроение*. – 2012. – Т. 9, № 1. – С. 15–24.
10. *Єршов С. В.* Квазилинейная схема повышенной точности для интегрирования уравнений Эйлера и Навье–Стокса / С. В. Ершов // *Мат. моделирование*. – 1994. – Т. 6, № 11. – С. 63–75.
11. *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 // *Delft University of Technology: Technical Report DUT-TWI-94-104*. – 1994. – 25 p.
12. *Lund E.* Shape Optimization of Fluid–Structure Interaction Problems Using Two-Equation Turbulence Models / E. Lund, H. Møller, L. A. Jakobsen // *AIAA Paper*. – 2002. – № 1478. – 11 p.
13. *Тилляева Н. И.* Обобщение модифицированной схемы С.К. Годунова на произвольные нерегулярные сетки / Н. И. Тилляева // *Уч. зап. Центр. аэрогидродинам. ин-та*. – 1986. – Т. 17, № 2. – С. 18–26.
14. *Polivanov P.* Experimental Study of Unsteady Effects in Shock Wave / Turbulent Boundary Layer Interaction / P. Polivanov, A. Sidorenko, A. Maslov // *AIAA Paper*. – 2009. – № 409. – 7 p.
15. *Yates L. A.* Interferograms, Schlieren, and Shadowgraphs Constructed from Real- and Ideal-Gas, Two- and Three-Dimensional Computed Flowfields / L. A. Yates // *NASA-CR-190054*. – 1992. – 10 p.

Поступила в редакцию
11.06.12