На правах рукописи

ЯКУБОВ Сергей Ансарович

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТСОЕДИНЕННЫХ ВИХРЕЙ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ ОТРЫВНОГО ОБТЕКАНИЯ РЕШЕТОК

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2005

Работа выполнена на кафедре теоретических основ теплотехники ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Смирнов Евгений Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Стрелец Михаил Хаимович

кандидат физико-математических наук,
Калаев Владимир Владимирович

Ведущая организация: ГУП ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится 24 января 2006 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.07 в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" (195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, корпус 1, кафедра гидроаэродинамики).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан « » _____ 2005 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук,
доцент Зайцев Д.К.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Актуальность темы диссертационной работы определяется необходимостью развития методов расчета внутренних отрывных течений, включая течения, характерные для задач турбомашиностроения. Большими потенциальными возможностями для решения соответствующих задач обладает метод численного моделирования отсоединенных вихрей (МОВ, Dettached Eddy Simulation, DES).

К настоящему времени в литературе накоплен достаточно обширный положительный опыт применения метода DES к внешним задачам аэродинамики. Однако для численного моделирования внутренних отрывных течений, включая проблемы турбомашиностроения, этот метод широко еще не использовался. Вместе с тем, для ряда важных и одновременно сложных задач аэродинамики турбомашин и турбоустановок метод DES потенциально способен обеспечить не только повышение точности предсказаний интегральных/осредненных характеристик, но и получение качественно новой информации о вихревой структуре течения и нестационарных силовых нагрузках, действующих на элементы конструкции.

Цели работы

Представляемая диссертационная работа направлена на

- реализацию многосеточного алгоритма численного решения уравнений гидродинамики и реализацию параллельных вычислений на основе базового программного комплекса SINF, а также на проведение тестовых расчетов по оценке эффективности реализованных методик;
- апробацию реализованного в программном комплексе SINF метода моделирования отсоединенных вихрей на ряде тестовых задач и на исследование влияния выбора численной схемы;
- численное исследование отрывных турбулентных течений в решетках, включая изучение вопроса о влиянии на решение поперечного размера расчетной области (числа каналов), анализ вихревой структуры течения в области концевых зазоров и оценку эффективности метода DES для рассматриваемого круга задач.

Научная новизна работы

Исследования, проведенные в диссертационной работе, позволили получить ряд новых результатов:

– впервые метод моделирования отсоединенных вихрей применен для расчетов отрывных турбулентных течений через решетки различной геометрии, получен целый ряд новых данных по нестационарным полям и интегральным характеристикам рассчитанных течений;

– проведенные параметрические расчеты для плоских решеток позволили заключить, что для течений с обширным отрывом необходимо использовать расчетные области, покрывающие как минимум два или три межлопаточных канала;

– численное моделирование течения в рабочем колесе осевого компрессора для условий предотрывных режимов работы показало, что метод DES дает существенно отличную от метода решения стационарных уравнений Рейнольдса картину осредненного течения в окрестности концевого зазора; результаты расчета интегральных характеристик по методу DES для этих режимов лучше согласуются с данными измерений.

Достоверность полученных результатов

Результаты проведенных в настоящей работе расчетов по методу отсоединенных вихрей турбулентного обтекания круглого и квадратного цилиндра, а также крылового профиля, согласуются с аналогичными данными других авторов и с известными экспериментальными данными. Результаты расчетов турбулентного течения в рабочем колесе осевого компрессора согласуются по интегральным характеристикам с известными экспериментальными данными.

Практическая ценность работы

Практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

1) существенно расширены возможности базового программного комплекса SINF для проведения трехмерных нестационарных расчетов на сетках с большим количеством узлов; это достигнуто как путем реализации параллельных вычислений на кластерных системах, так и за счет внедрения многосеточного алгоритма численного решения уравнений гидродинамики;

2) реализация метода DES в программном комплексе SINF верифицирована путем расчета базовых тестовых задач и сравнения полученных данных с результатами других авторов и экспериментами;

3) выработаны рекомендации по выбору числа одновременно рассчитываемых

межлопаточных каналов для задач о течении жидкости через периодическую решетку профилей;
4) получены подробные пространственные данные о структуре течения в рабочем колесе осевого компрессора с увеличенным радиальным зазором.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на российских и международных конференциях и семинарах: международной конференции по параллельным вычислениям в вычислительной гидродинамике (Москва, 2003); XIV школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева “Процессы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках” (Рыбинск, 2003); всероссийской научно-технической конференции "Параллельные вычисления в задачах математической физики" (Ростов-на-Дону, 2004); IV европейском конгрессе "Вычислительные методы в прикладных науках" (Финляндия, 2004); заседании секции «Высокопроизводительные вычислительные системы и их применение» Совета РАН под председательством акад. Г.И. Савина (Москва, 2004); XV школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева “Процессы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках” (Калуга, 2005).

Публикации по теме диссертации

Основные результаты работы изложены в шести научных публикациях.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 108 наименований. Работа изложена на 143 страницах машинописного текста, включая 18 таблиц и 77 рисунков.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследования, ее научное и практическое значение, сформулированы основные задачи работы.

В первой главе приводится обзор литературы по тематике работы.

В разделе 1.1 рассмотрены вопросы моделирования течений вокруг плохообтекаемых тел. Неблагоприятный характер обтекания тел такого рода, с отрывом пограничного слоя, обусловливается прежде всего формой их обводов – большой относительной толщиной сечений, наличием изломов обтекаемых поверхностей, присутствием выступов, расположенных поперек течения и т.п.

При достаточно большом числе Рейнольдса (а именно такие случаи и представляют основной практический интерес), возникает обширная зона отрыва и развивается сильнонестационарный вихревой след. Все это приводит к большой силе сопротивления и возникновению боковых периодических сил, действующих на тело и вызывающих его вибрацию. Наиболее полно в разделе рассматриваются работы по численному моделированию и экспериментальному изучению обтекания длинных круговых и квадратных цилиндров.

Раздел 1.2 посвящен введению в метод моделирования отсоединенных вихрей (DES). Этот метод, предложенный менее десяти лет назад [Spalart P.R., Jou W.-H., Strelets M., Allmaras S.R. / In: Advances in DNS/LES, Greyden Press, Columbus, OH, 1997. – P. 137-147] на сегодняшний день является одним из наиболее распространенных гибридных подходов к моделированию турбулентности и основан на сочетании метода решения нестационарных трехмерных уравнений Рейнольдса в пограничных слоях (URANS) и метода моделирования крупных вихрей (МКВ, Large Eddy Simulation, LES) в зонах свободного потока [Стрелец М.Х., Травин А.К., Шур М.Л., Спаларт Ф.Р. / НТВ СПбГПУ, 2004. – №2(36). – С.22-33]. Излагается мотивация к использованию метода DES и основные идеи его реализации. Отмечается, что к настоящему моменту метод DES реализован уже в большом числе развитых пакетов вычислительной гидродинамики, включая коммерческие (CFX, Fluent, Cobalt), использующие схемы дискретизации второго прядка точности и неструктурированные сетки.

Первоначальный положительный опыт использования метода DES накапливался, в основном, при его применении к задачам внешней аэродинамики. В разделе дается обзор работ, посвященных расчетам обтекания крылового профиля NACA 0012 при произвольном угле атаки и обтекания круглого цилиндра, численному моделированию задачи обтекания шасси самолета и ряда других задач внешней аэродинамики. Также рассматриваются результаты приложения метода DES к двум задачам внутренней аэродинамики: к течению в канале с обратным уступом и к задаче обтекания цилиндра треугольного сечения, находящегося в канале.

В разделе 1.3 рассматривается проблема сокращения временных затрат на получение численного решения, которая становится особо острой при проведении расчетов на основе трехмерных нестационарных формулировок задач аэродинамики. Данную проблему можно рассматривать с двух позиций – ускорение сходимости итерационного процесса решения дискретизированных

задач и ускорение собственно вычислений за счет эффективного использования современной вычислительной техники (применение новейших компьютеров, суперкомпьютеров, параллелизации вычислений). Прогресс в ускорении сходимости итераций требует внедрения специальных алгоритмов, обладающих, как правило, достаточно сложной логикой расчета и трудностью реализации, а ускорение счета предполагает привлечение новейших, часто дорогостоящих вычислительных ресурсов и своевременное их обновление. Естественно, наиболее эффективным, с точки зрения уменьшения временных затрат, будет согласованное использование обоих подходов.

Среди итерационных методов на данный момент наибольший эффект ускорения сходимости позволяет получить многосеточный метод, а наиболее экономически привлекательным и сегодня уже весьма распространенным способом ускорения счета является параллелизация процесса вычислений с использованием кластерных систем.

В разделе излагаются основные идеи многосеточного алгоритма и история его развития, приводятся работы, посвященные использованию многосеточного алгоритма при решении задач гидродинамики, даны оценки эффективности алгоритма для разных задач.

Также в разделе рассмотрены базовые идеи современных технологий параллельных вычислений. Выделены основные направления развития высокопроизводительной вычислительной техники, приведены описания двух парадигм параллельного программирования: параллелизма данных и параллелизма задач, дано краткое описание библиотеки распараллеливающих подпрограмм MPI (Message Passing Interface), использованной в данной работе.

Во второй главе излагаются математическая модель (раздел 2.1) и численный метод (раздел 2.2), на основе которых были проведены расчеты (все задачи рассматриваются в работе в рамках модели несжимаемой ньютоновской жидкости с постоянными физическими свойствами). Рассматриваются вопросы реализации замыкающих моделей метода RANS (модели турбулентности Спаларта-Аллмараса и Ментера), LES (модель Смагоринского) и метода DES (на основе моделей турбулентности Спаларта-Аллмараса и Ментера) в использованном для расчетов программном “конечно-объемном” комплексе SINF, разработанном на кафедре гидроаэродинамики СПбГПУ. Заложенные в ПК возможности прошли предшествующую верификацию в результате численного моделирования целого ряда задач гидродинамики и теплообмена.

В разделе 2.3 приводится описание реализованного автором алгоритма параллелизации вычислений в программном комплексе SINF на основе

технологии MPI, соответствующей библиотеки стандарта MPI и учитывая исходный многоблочный подход, реализованный в SINF для численного решения широкого круга задач. При таком подходе расчетная область заранее разбивается на подобласти (блоки), для каждого из которых строится своя сетка. После чего происходит распределение блоков по выбранным процессам, запускаемым на кластере. Каждый процесс производит независимые вычисления для назначенных ему блоков и, кроме того, обеспечивает вывод данных, связанных с этими блоками. Кроме независимых вычислений на разных процессорах, при расчетах происходит обмен данными вдоль поверхностей, по которым происходит стыковка соседних блоков.

В этом же разделе приведены данные по оценке эффективности параллелизации вычислений для задачи течения жидкости в кубической полости с движущейся верхней крышкой и задачи обтекания круглого цилиндра. В среднем, достигнутая эффективность параллелизации составляет около 0,9 (по опытам расчетов с числом процессов до 24-х).

Раздел 2.4 посвящен реализации многосеточных вычислений. Приведен алгоритм метода, основанный на схеме полной апроксимационной памяти для решения нелинейных задач. Рассмотрены разновидности многосеточных алгоритмов: V-, W- и F-циклы, а также различные варианты операторов ограничения и пролонгации как для двумерных, так и для трехмерных задач. Также рассмотрены особенности реализации алгоритма, связанные с решением уравнений для параметров турбулентности и позволяющие избежать нефизических (отрицательных) значений рассчитываемых характеристик кинетической энергии турбулентности, скорости ее диссипации и т.д.

В разделе 2.5 приводятся результаты исследований по оценке эффективности многосеточного алгоритма в сочетании с неявной итерационной схемой расчета поправок по методу приближенной факторизации, реализованной в ПК SINF. Алгоритм был протестирован при решении ряда задач теплопроводности (уравнение Лапласа) и динамики вязкой жидкости (уравнения Навье-Стокса). При этом основное внимание уделялось исследованию зависимости скорости сходимости итерационного процесса от числа многосеточных уровней.

Были рассмотрены задачи теплопроводности для квадратной области с граничными условиями первого рода на равномерной и неравномерной сетках (64x64 ячеек). Реальное ускорение (оцениваемое по сокращению времени работы компьютера) для данной задачи составило 12 раз как для равномерной, так и для неравномерной сетки.

Оценка эффективности многосеточного алгоритма при решении уравнений Навье-Стокса была проведена на примерах стационарного течения, вызванного движением крышки кубической полости при числе Рейнольдса 5000 и пограничного слоя, развивающегося на пластине при $Re_L \sim 10^6$. Для течения в каверне при использовании сетки 364x364 ячеек и восьмиуровневого многосеточного алгоритма было достигнуто реальное ускорение, составляющее около 9 раз. Для задачи пограничного слоя (использовалась сильно неравномерная сетка 128x64 ячеек) ускорение составило три раза.

В двух последующих главах представляются результаты численного моделирования турбулентных течений, полученные на основе методов DES и URANS. Относительно затратные расчеты по методу DES проводились с использованием нескольких кластерных систем: Центра высоко-производительных вычислительных кластерных технологий СПбГПУ, Санкт-Петербургского филиала Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН и Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В третьей главе приводятся результаты апробации метода DES для ряда тестовых задач внешней аэродинамики.

В разделе 3.1 рассматривается задача об обтекании круглого цилиндра безграничным потоком. Вычисления по методу DES проводились для двух режимов обтекания: с отрывом либо ламинарного, либо турбулентного пограничного слоя. Случай отрыва ламинарного пограничного слоя (LS) рассматривался при числе Рейнольдса, построенном по диаметру цилиндра и скорости внешнего потока, равном 18900. Второй режим, с отрывом турбулентного пограничного слоя (TS), моделировался при числе Рейнольдса $1{,}4 \times 10^5$.

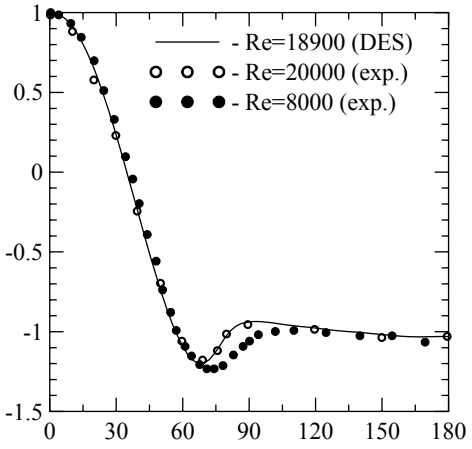

Рис. 1. Коэффициент давления по поверхности цилиндра в зависимости от угловой координаты (вариант LS): (●,○) – экспериментальные данные, (——) – результаты настоящей работы.

Полученные данные по интегральным характеристикам течения – коэффициентам лобового сопротивления и подъемной силы, числу Струхаля и длине рециркуляционной зоны за цилиндром, хорошо согласуются с экспериментальными данными и расчетами авторов метода DES. Полученные для обоих случаев результаты распределения коэф-фициента давления по поверхности цилиндра

также достаточно хорошо согласуются с известными результатами экспериментальных измерений, особенно для случая отрыва ламинарного пограничного слоя (рис. 1).

В разделе 3.2 рассматривается задача об обтекании цилиндра квадратного сечения при числе Рейнольдса 22000. В дополнение к трехмерным расчетам по методу DES (на основе модели турбулентности Спаларта-Аллмараса) задача решалась и в двумерной постановке, для чего использовались нестационарные уравнения Рейнольдса и та же модель турбулентности.

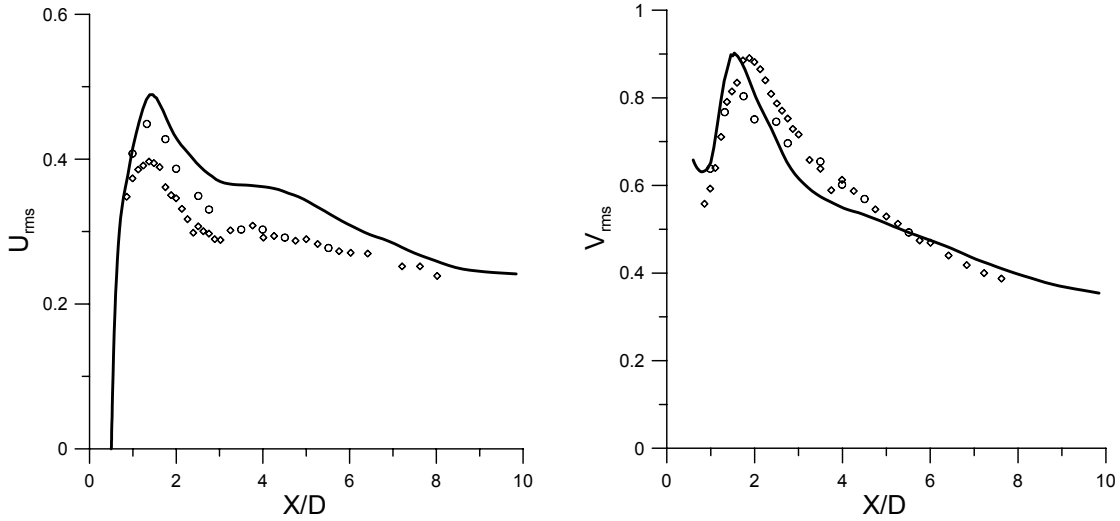

Рис. 2. Распределения интенсивности пульсаций продольной (слева) и поперечной (справа) компонент скорости за квадратным цилиндром: (символы) – экспериментальные данные, (линии) – результаты настоящей работы.

В серии проведенных двумерных расчетов проводилось варьирование размера сетки, численной схемы и шага по безразмерному физическому времени. Была показана сеточная сходимость задачи, установлено, что уменьшение шага по времени и использование различных схем вычисления конвективных потоков (не ниже второго порядка) незначительно влияет на интегральные характеристики течения. При этом наибольшие отличия от экспериментальных данных наблюдаются для протяженности рециркуляционной зоны (в расчетах протяженность получилась заниженной), в то время как число Струхаля и значения коэффициента лобового сопротивления предсказываются довольно точно.

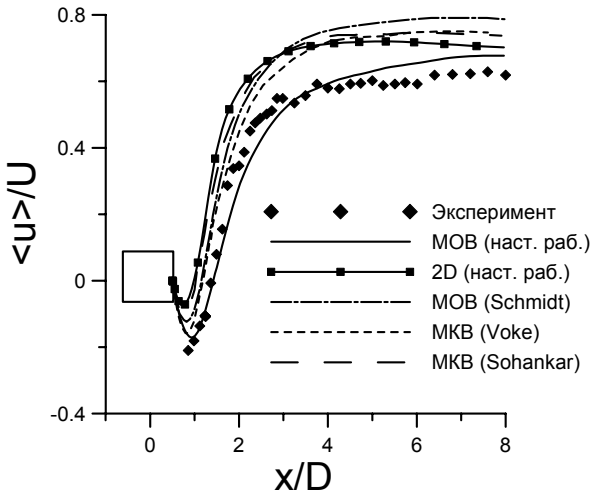

Рис. 3. Распределение продольной компоненты скорости за цилиндром.

Расчеты по методу DES показали, что его использование позволяет на сетках, имеющих порядка полумиллиона ячеек, разрешить большое число вихревых структур, образующихся в ближнем следе цилиндра. Среднеквадратичные пульсации компонент скорости в следе за цилиндром, посчитанные с использованием метода DES, хорошо согласуются с данными измерений (рис. 2). Вычисления настоящей работы дали наилучшее среди аналогичных расчетов согласие с экспериментом по распределению осредненной продольной компоненты скорости за цилиндром вдоль центральной линии (рис. 3).

Задача об обтекании крылового профиля NACA 0012 рассматривается в разделе 3.3. Расчеты по методу DES на основе модели турбулентности Ментера проводились для двух углов атаки: 20 и 45 градусов. Число Рейнольдса, построенное по длине хорды профиля и скорости на входе, составляло 10^5. Для расчета конвективных потоков использовалась схема QUICK, а также смешанная схема второго/четвертого порядка (заметим, что для получения наилучших результатов авторы метода DES рекомендуют использовать схемы более высокого порядка, вплоть до пятого). Результаты расчетов показали, что использование смешанной схемы позволяет разрешить больше мелкомасштабных вихревых структур в отрывной зоне над профилем, чем QUICK-схема (рис. 4). На временную эволюцию коэффициентов лобового сопротивления и подъемной силы переход от использования QUICK-схемы к смешанной схеме не оказал существенного значения.

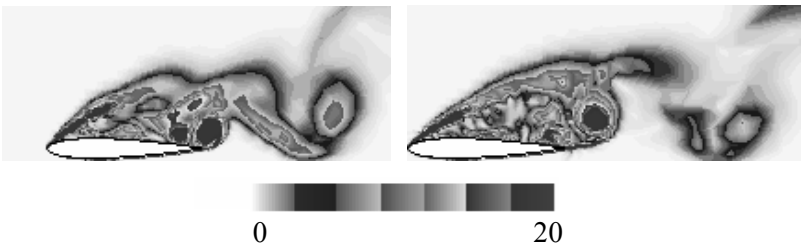

Рис. 4. Рассчитанные по методу DES с использованием QUICK-схемы (слева) и смешанной схемы (справа) поля завихренности для течения вокруг крылового профиля при угле атаки 20 градусов.

Таблица 1. Осредненные значения коэффициентов сопротивления и подъемной силы для крылового профиля NACA 0012 при различных углах атаки

	Эксперимент	DES, расчеты настоящей работы
Угол атаки 20 градусов		
$\langle C_D \rangle$	0,30	0,32 (7%)
$\langle C_L \rangle$	0,66	0,75 (11%)
Угол атаки 45 градусов		
$\langle C_D \rangle$	1,12	1,13 (1%)
$\langle C_L \rangle$	1,18	1,11 (6%)

В целом же, проведенные для профиля NACA 0012 расчеты по методу DES показали достаточно хорошее согласование с экспериментом (табл. 1) и тестовыми расчетами авторов метода.

Четвертая глава посвящена вопросам применения метода моделирования отсоединенных вихрей к расчетам турбулентных течений в областях с периодической геометрией.

В разделе 4.1 рассматривается течение жидкости через бесконечную периодическую решетку, составленную из расположенных поперек течения квадратных цилиндров с сечением HxH. Отношение шага решетки L к стороне цилиндра H было выбрано равным трем. Задача решалась в двух постановках: в двумерном приближении, с использованием нестационарных уравнений Рейнольдса, замкнутых согласно модели турбулентности Спаларта-Аллмараса, и в трехмерной постановке – по методу DES на основе той же модели турбулентности. Для обоих случаев проводилось варьирование размера сетки (использовались три различные сетки) и поперечного размера области: использовались области, включающие один, два и, в двумерном случае, три шага решетки (обозначаемые O1, O2 и O3 соответственно). Задача решалась при числе Рейнольдса, равном 10^5 (построенном по стороне цилиндра и входной скорости).

Двумерные расчеты течения в области O1 привели к установлению стационарного течения с сильно завышенной длиной рециркуляционной зоны за цилиндром. Переход к задаче для области O2 обеспечил возможность получения нестационарного течения, при этом развившиеся колебания являются квазипериодическими. Для области O3 полученное течение имеет еще более сложный характер.

Расчеты по методу DES, в отличие от двумерных расчетов по методу URANS, позволили получить нестационарное течение уже для области O1. Однако определенная по осредненным полям длина рециркуляционной зоны также оказалась весьма завышенной. Течение, полученное при расчетах для области O2 (рис. 5), имеет близкий к хаотичному характер: просматривается большое число дополнительных частот различной интенсивности, что в двумерных расчетах наблюдалось лишь при переходе к области O3. На рис. 5 видно также, что в различные моменты времени бóльшая часть жидкости поочередно протекает то через один, то через другой проход между соседними цилиндрами. Та же картина течения наблюдалась и при двумерных расчетах.

Что касается интегральных характеристик, то, как в двумерных, так и в трехмерных расчетах, наибольшие различия между результатами для областей O1 и O2 заключаются в длине рециркуляционной зоны за цилиндром. В отношении коэффициента лобового сопротивления результаты двумерных и

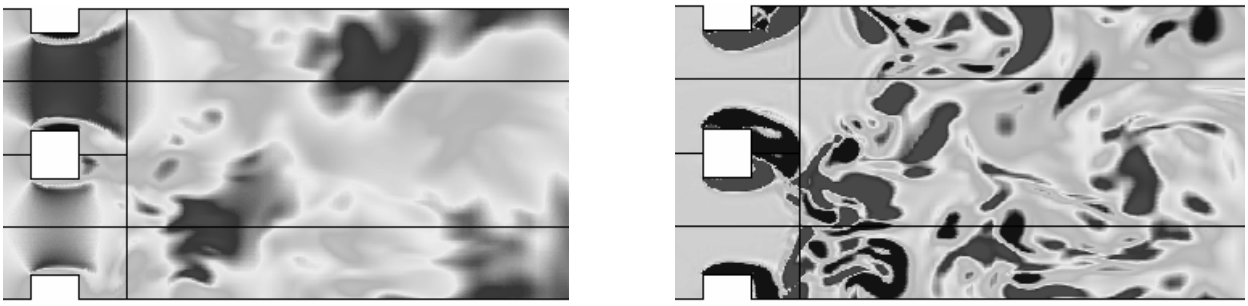

Рис. 5. Результаты расчетов по методу DES для решетки квадратных цилиндров. Мгновенные поля продольной компоненты скорости (слева) и трансверсальной компоненты завихренности (справа) для области с поперечным размером в два шага решетки.

трехмерных расчетов для областей различного поперечного размера оказались достаточно близки между собой.

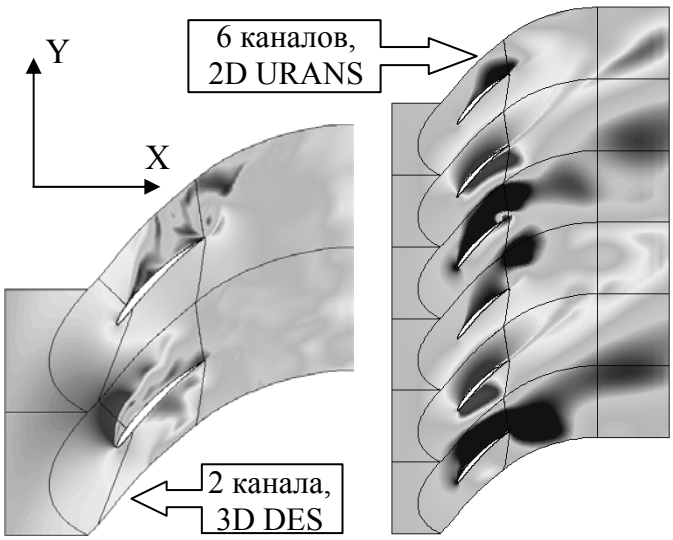

Рис. 6. Результаты расчетов в линейной компрессорной решетке: мгновенные поля продольной компоненты скорости

В разделе 4.2 рассматривается течение несжимаемой жидкости через линейную бесконечную компрессорную решетку (рис. 6). При расчетном режиме угол входа набегающего потока (угол между вектором входной скорости и осью X, перпендикулярной к фронту решетки) составляет 55 градусов. В настоящей работе, для получения режима с развитым отрывом, расчеты проводились при угле входа 70 градусов, то есть при угле атаки 15 градусов. Число Рейнольдса, построенное по абсолютной скорости на входе и хорде профиля, полагалось равным 10^6. Расчеты проводились в двумерной и трехмерной постановках, с использованием методов 2D URANS и DES соответственно.

Двумерные расчеты проводились для областей, покрывающих от одного до семи межлопаточных каналов, трехмерные – от одного до трех каналов. Было получено, что, несмотря на геометрическую периодичность области, через соседние каналы жидкость протекает с разными скоростями, при этом за лопатками возникают обширные зоны обратного течения (рис. 6). Кроме ярко выраженной непериодичности решений для областей с несколькими каналами, следует отметить эффект уменьшения частоты колебаний и одновременное

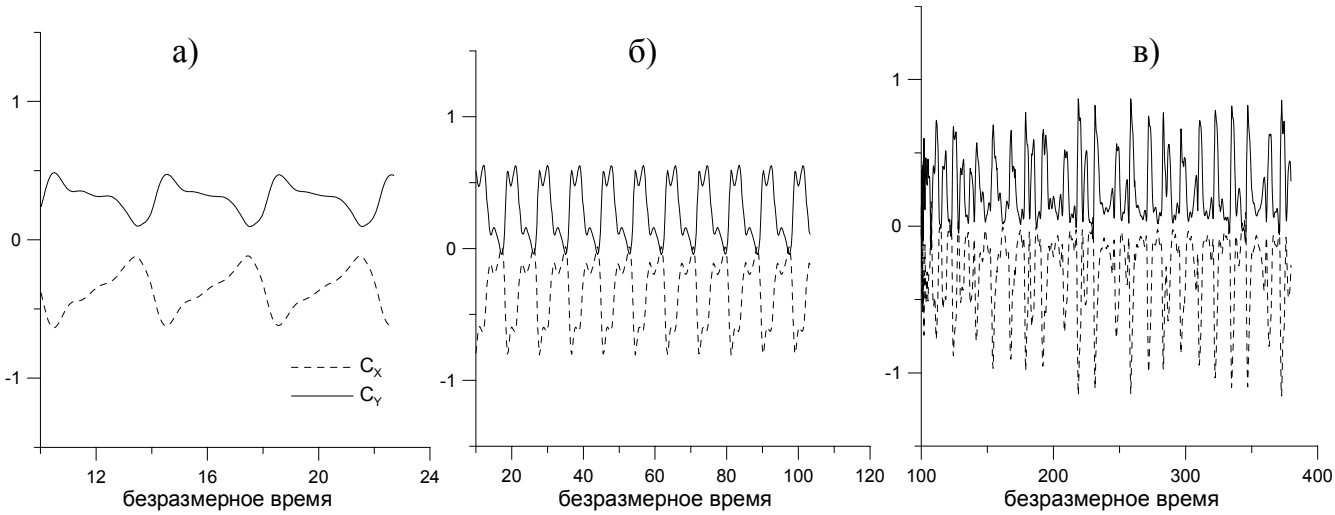

Рис. 7. Результаты двумерного моделирования течения через плоскую компрессорную решетку: эволюция сил, действующих на отдельную лопатку для областей с одним, двумя и шестью межлопаточными каналами, (а-в) соответственно.

увеличение амплитуды сил, действующих на лопатку, по сравнению с результатами для облсти с одним каналом. В случае области, охватывающей два канала, ведущая частота оказывается вдвое меньше. Соответственно, амплитуда действующих на лопатку сил значительно больше, чем для области с одним каналом (рис. 7).

В целом, сравнение сводных данных по вычисленным значениям осредненных сил и ведущих частот для всех рассмотренных вариантов позволило заключить следующее: при переходе от области с одним каналом к области с двумя каналами решение по методу DES сильно изменяется, однако, переход от двух к трем каналам на результатах почти не сказывается; при двумерном моделировании по методу URANS необходимо, чтобы расчетная область включала не менее трех соседних каналов.

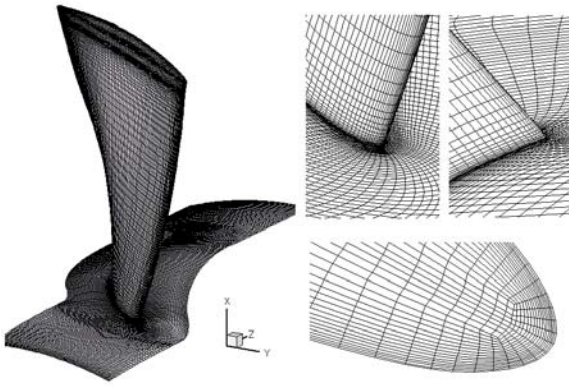

Рис. 8. Общий вид и фрагменты сеток, использовавшихся при расчетах течения в роторе компрессора.

Раздел 4.3 посвящен изучению возможностей метода DES при моделировании предотрывных режимов течения в рабочих колесах осевых компрессоров, прежде всего, для условий, при которых проявляются сильные эффекты перетекания газа через концевые зазоры. На примере одиночного вращающегося ротора с 16-ю лопатками (рис. 8) было проведено сопоставление решений по методу DES со стационарными решениями уравнений

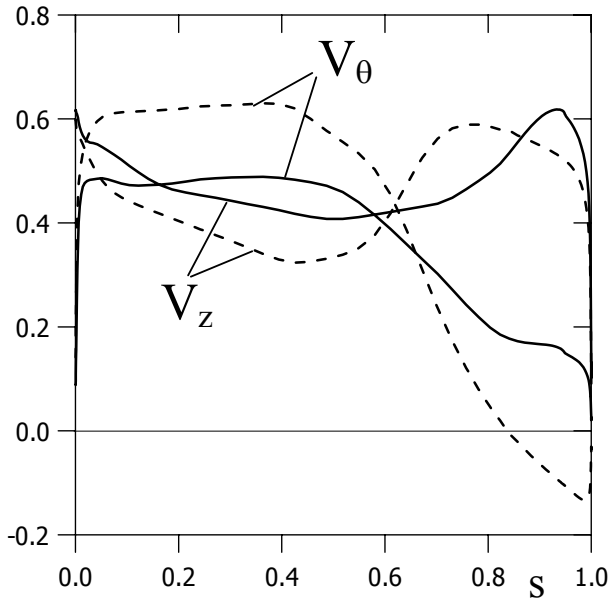

Рис. 9. Осредненные радиальные распределения осевой (V_z) и окружной (V_θ) скорости за рабочим колесом компрессора при ϕ=0,35: сравнение результатов метода DES со стационарным решением уравнений Рейнольдса (сплошные и штриховые линии соответственно).

Рейнольдса, полученными на основе одной и той же модели турбулентности (Спаларта-Аллмараса). Для предотрывных режимов, в частности, при коэффициенте расхода ϕ=0,35, метод RANS предсказывает продолжающуюся на большое расстояние вниз по потоку отрывную зону на периферии ротора. В решении же по методу DES обратные токи в выходном сечении ротора не наблюдаются (рис. 9), что указывает на бóльшую интенсивность турбулентного обмена, предсказываемого на основе данного подхода. Примечательно также, что в решении по методу DES концевой вихрь вообще не формируется: процесс сворачивания вихревого слоя струи, которая образуется из-за утечки, разрушается интенсивными пульсациями потока (рис. 10).

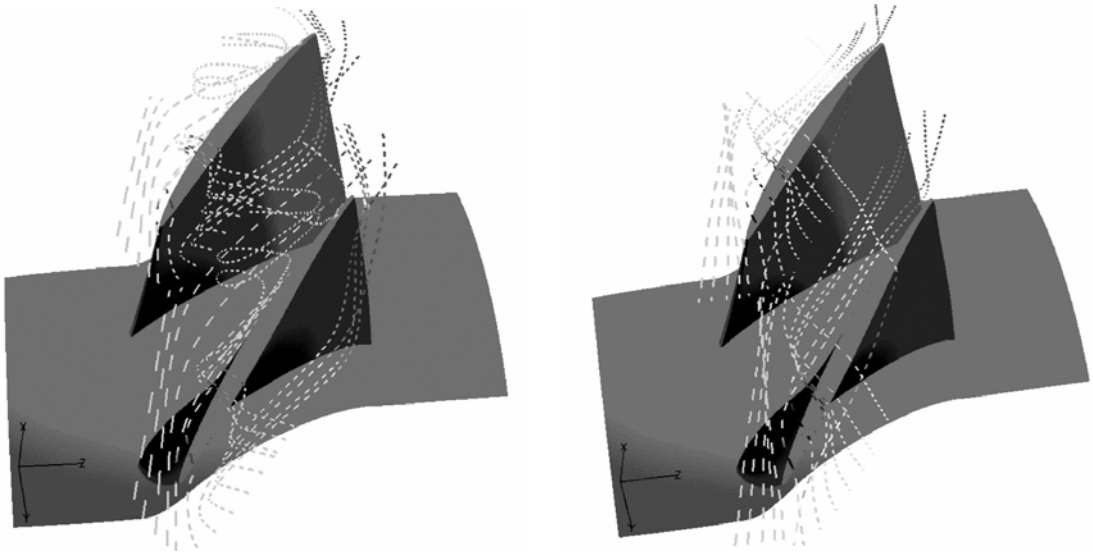

Рис. 10. Линии тока в области радиального зазора рабочего колеса осевого компрессора для ϕ=0,35: (слева) – стационарное решение уравнений Рейнольдса; (справа) – решение по методу DES.

Сопоставление вычисленных по двум подходам значений коэффициента повышения полного давления и приложенной к ротору нормированной мощности с экспериментальными данными показало, что метод DES позволяет существенно повысить качество расчетных предсказаний в области пониженных расходов.

В заключении кратко сформулированы основные результаты настоящей работы, которые сводятся к следующему:

1. На основе базового "конечно-объемного" программного комплекса SINF, использующего неявные итерационные схемы и блочно-структурированные сетки, реализован многосеточный алгоритм численного решения уравнений Навье-Стокса. Достигнуто существенное сокращение времени получения сошедшегося решения. В результате программной доработки комплекса обеспечена также возможность проведения высокоэффективных параллельных вычислений на кластерных системах.

2. Реализованный в программном комплексе SINF метод моделирования отсоединенных вихрей (DES) апробирован на ряде тестовых задач внешней аэродинамики, для которых характерно образование обширных зон отрыва. Полученные для этих задач осредненные поля течения и интегральные характеристики хорошо согласуются с экспериментальными результатами и расчетами других авторов, использовавших тот же подход. Тем самым обоснована возможность получения по методу DES достаточно точных результатов с использованием не только высокоразрешающих схем, но и типичных для метода конечных объемов схем пространственной дискретизации второго порядка точности.

3. Результаты проведенных тестовых расчетов турбулентного течения вокруг квадратного цилиндра не уступают по качеству данным, полученным другими исследователями методом моделирования крупных вихрей (LES) на сетках с существенно большим числом расчетных ячеек; при этом для ближнего следа за цилиндром достигнуто хорошее согласование с измерениями не только для осредненной скорости, но и для среднеквадратичных пульсаций.

4. Впервые метод моделирования отсоединенных вихрей применен для расчетов отрывных турбулентных течений через решетки разной геометрии, включая плоские и кольцевые решетки турбомашин. Результаты метода DES сопоставлены с данными расчетов на основе стационарных и нестационарных уравнений Рейнольдса (методов RANS и URANS).

5. Результаты численного моделирования течения через решетку квадратных цилиндров позволили заключить, что для проведения расчетов, как

по методу URANS, так и DES, поперечного размера области в один шаг решетки оказывается недостаточно для получения удовлетворительного решения: необходимо использовать расчетные области, покрывающие, как минимум, два шага решетки. Наибольшие отличия между решениями для областей с различным поперечным размером заключаются в длине рециркуляционной зоны за каждым цилиндром.

6. Для течения жидкости через плоскую компрессорную решетку с развитым отрывом установлено, что результаты двумерных расчетов по методу URANS для областей с одним, двумя и тремя межлопаточными каналами сильно различаются; при этом ведущая частота колебаний потока уменьшается пропорционально поперечному размеру области. При дальнейшем увеличении числа включаемых в расчет каналов результаты изменяются не столь сильно. В случае же трехмерных расчетов по методу DES сильные изменения в решении происходят только при переходе от области с одним каналом к области с двумя каналами; включение в расчет трех и более каналов оказывается избыточным.

7. Проведено сопоставление возможностей методов RANS и DES по предсказанию характеристик течения в рабочих колесах осевых компрессоров с проявлением сильных эффектов перетекания газа через концевые зазоры. Для близкого к проектному режиму работы ротора с 16-ю лопатками получено, что как метод RANS, так и DES, дают хорошее согласование с экспериментальными данными. Для предотрывного режима полученное по методу RANS решение характеризуется наличием весьма обширной зоны обратного течения в выходном сечении за ротором; при этом предсказываются значения коэффициентов повышения полного давления и мощности существенно ниже экспериментальных. В решении по методу DES зона обратного течения в выходном сечении отсутствует, а эффект общего "запирания" потока гораздо слабее, чем в решении метода RANS. Зависимости интегральных характеристик работы ротора от коэффициента расхода, рассчитанные по методу DES, хорошо согласуются с данными измерений.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Якубов С.А. Численное моделирование нестационарных явлений в двумерном турбулентном течении жидкости через решетку квадратных цилиндров // Труды XIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева. Том 1. – Москва: Издательство МЭИ, 2003. С.125-128.

2. Smirnov E.M., Abramov A.G., Ivanov N.G., Smirnov P.E., Yakubov S.A. DNS and RANS/LES-computations of complex geometry flows using a parallel

multiblock finite-volume code / in: Parallel Computational Fluid Dynamics – Advanced Numerical Methods, Software and Application (eds. Chetverushkin B. et al.). Elsevier, 2004. P.219-226.

3.Смирнов Е.М., Абрамов А.Г., Зайцев Д.К., Иванов Н.Г., Смирнов П.Е., Якубов С.А. Применение параллельных вычислений для моделирования турбулентных течений в областях сложной геометрии / “Параллельные вычисления в задачах математической физики”: Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции, Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 2004. С. 132-141.

4. Smirnov E., Yakubov S. URANS and DES of turbulent flow through a periodic row of bluff bodies // In: 4th European congress on computational methods in applied sciences and engineering (July 24-28, 2004, Finland). Book of abstracts, P.171.

5. Смирнов Е.М., Смирнов П.Е., Якубов С.А. Метод моделирования отсоединенных вихрей в приложении к проблемам аэродинамики турбомашин // Труды XV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева. Том 1. – Москва: Издательство МЭИ, 2005. С.20-25.

6. Якубов С.А. Метод моделирования отсоединенных вихрей в приложении к задаче турбулентного обтекания цилиндра квадратного сечения и сопоставление с решениями двумерных уравнений Рейнольдса // Труды XV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева. Том 1. – Москва: Издательство МЭИ, 2005. С.130-133.