

УДК 532.517.4

ОПЫТ ПАРАЛЛЕЛИЗАЦИИ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ РАСЧЕТЕ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ФОРМУЛИРОВОК

Д. К. Зайцев¹, Е. М. Смирнов¹, П. Е. Смирнов², Н. А. Щур¹, С. А. Якубов²

Рассматриваются некоторые особенности эффективного использования технологии MPI при решении ресурсоемких задач вычислительной гидрогазодинамики и теплообмена на кластерных системах. Дается характеристика программного комплекса SINF, предназначенного для решения трехмерных уравнений Навье–Стокса в областях произвольной геометрии с подвижными границами. Приводятся примеры выполненных на его основе расчетов сложных отрывных течений, типичных для гидродинамики турбомашин (течение в рабочем колесе компрессора, струйное охлаждение поверхности, автоколебания тела в потоке). Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 06–08–01334) и Российской программы поддержки ведущих научных школ (проект № НШ–376.2006.8). Статья подготовлена по материалам доклада авторов на международной научной конференции “Параллельные вычислительные технологии” (ПавТ-2007; <http://agora.guru.ru/pavt>).

Ключевые слова: параллельные вычисления, турбулентные потоки, численное моделирование, трехмерные нестационарные задачи, отрывные течения.

1. Введение. В настоящее время расчет сложных турбулентных потоков в условиях реальной геометрии промышленных устройств выполняется, как правило, с использованием RANS моделей турбулентности. Особенно широко распространены модели семейства $k-\varepsilon$ и $k-\omega$, а также ν_t модель Спаларта–Аллмараса, которые реализованы в большинстве коммерческих CFD пакетов. Однако применение таких моделей далеко не всегда обеспечивает необходимую точность результатов. Это касается, в частности, течений с обширными отрывными зонами, для моделирования которых можно использовать современные подходы типа DES или DNS, предполагающие решение нестационарной трехмерной задачи с прямым разрешением, как минимум, наиболее значимых (крупномасштабных) турбулентных вихрей. Решение подобных задач даже на самом современном персональном компьютере может занимать несколько месяцев ввиду необходимости расчета достаточно длинной выборки для получения статистически установившегося результата. Более того, единичный компьютер зачастую не может обеспечить требуемый объем оперативной памяти для работы с многомиллионными расчетными сетками, использование которых диктуется необходимостью разрешения достаточно мелких вихрей (особенно в рамках DNS подхода).

Эффективным средством решения столь ресурсоемких задач гидродинамики является применение технологии параллельных вычислений на распределенных системах кластерного типа, которые сравнительно дешевы и достаточно легко масштабируются как по числу процессоров, так и по объему оперативной памяти. Уже сейчас далеко не редкость кластеры, объединяющие более двадцати процессоров, использование которых в принципе позволяет ускорить вычисления в десятки раз. Однако эффективность параллелизации существенно зависит от того, как в программе организован межпроцессорный обмен данными, который обычно является самой медленной частью алгоритма и может свести на нет эффект от увеличения числа используемых процессоров.

В настоящей работе представлен весьма удачный, по мнению авторов, опыт распараллеливания программного комплекса SINF и даны примеры его использования для решения ряда сложных и крайне ресурсоемких гидродинамических задач.

2. Программный комплекс SINF и его параллелизация. На кафедре гидроаэродинамики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета на протяжении более 10 лет развивается программный комплекс (ПК) SINF (Supersonic to INcompressible Flows) для решения трехмерных

¹ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, физико-механический факультет, ул. Политехническая, 29, 195251, С.-Петербург; e-mail: aero@phmf.spbstu.ru

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, энергомашиностроительный факультет, ул. Политехническая, 29, 195251, С.-Петербург; e-mail: pavel.smirnov@nts-int.spb.ru, sergey.yakubov@nts-int.spb.ru

уравнений Навье–Стокса. Подробное описание первой версии ПК содержится в работе [5], а история его развития и современные возможности — в работах [1, 2]. К настоящему моменту ПК SINF позволяет проводить расчеты стационарных и нестационарных, до- и сверхзвуковых течений жидкости или газа, развивающихся, в общем случае, в областях сложной геометрии с подвижными границами. Для расчета турбулентных течений в ПК SINF реализован широкий спектр RANS моделей, включая высоко- и низкорейнольдсовы версии k , k - ε , k - ω , ν_t и других популярных моделей турбулентности. В особо сложных случаях, когда RANS подходы не обеспечивают необходимой точности моделирования турбулентности, могут использоваться нестационарные формулировки (DNS, LES, а также DES и другие комбинированные RANS/LES подходы).

Численный метод основан на использовании блочно-структурированных сеток, согласованных с границами области течения. Дискретизация пространственных операторов уравнений сохранения выполнена по методу конечных объемов со вторым порядком точности. Для стыковки соседних блоков используется концепция вспомогательного виртуального блока. В ПК SINF такой виртуальный блок формируется из двух слоев приграничных ячеек каждого из стыкуемых физических блоков, с копированием всех данных, необходимых для расчета конвективных и диффузионных потоков через поверхность (интерфейс) стыковки. Вычисления в виртуальном блоке проводятся по тому же алгоритму, что и внутри стыкуемых физических блоков; тем самым обеспечивается “прозрачность” стыковки и сохранение консервативных свойств разностной схемы. Кроме того, применение виртуального блока облегчает решение многих проблем, возникающих при использовании скользящих сеток и/или сеток с обрывом сеточных линий на межблочном интерфейсе, а также при решении задач сопряженного теплообмена. Для получения нестационарных решений в ПК SINF реализована неявная трехслойная схема второго порядка точности по физическому времени. На каждом временном слое итерации (продвижение по фиктивному времени) могут осуществляться по методу искусственной сжимаемости, по методу типа SIMPLEC или по оригинальному гибриднему методу.

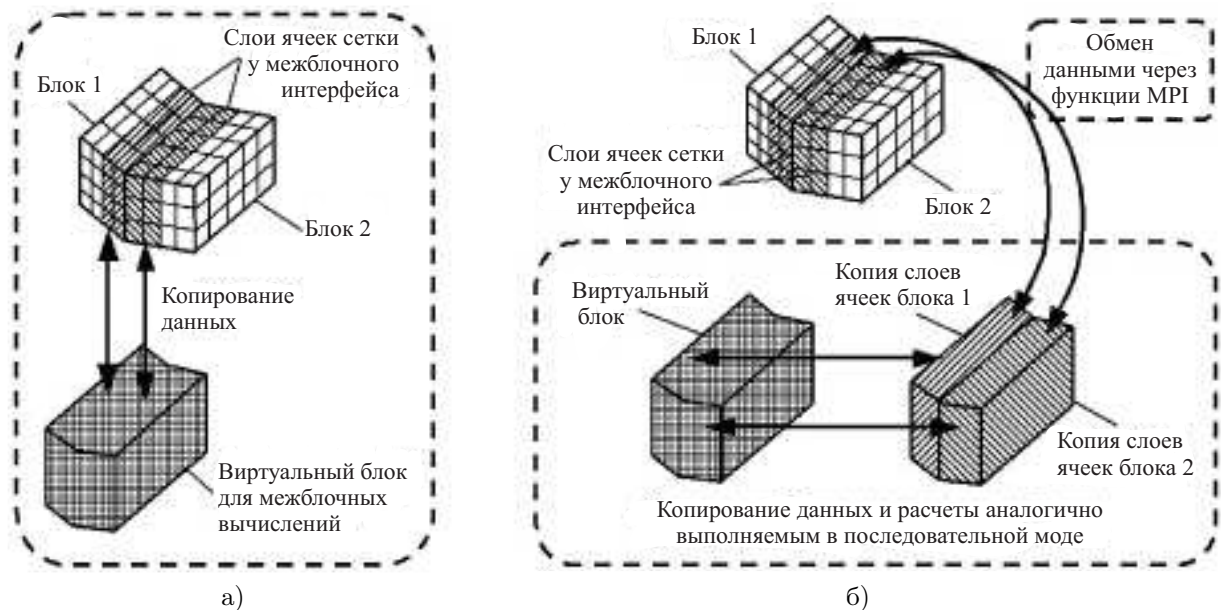


Рис. 1. Схема межблочного обмена данными в последовательной (а) и параллельной (б) версии ПК SINF

Распараллеливание ПК SINF осуществлено в рамках стратегии SPMD на основе коммуникационной библиотеки MPI. Учитывая ориентацию ПК на использование многоблочных расчетных сеток, применен метод декомпозиции расчетной области по блокам сетки. Распределение блоков между запускаемыми процессами осуществляется вручную. Число процессов зависит от размера имеющегося кластера и количества блоков сетки; обычно на каждом процессоре запускается один процесс. Во всех процессах работает один и тот же программный код, который производит независимые вычисления в принадлежащих данному процессу блоках и обеспечивает ввод/вывод данных, связанных с этими блоками. Хотя все процессы в принципе равнозначны, один из них назначается главным и, помимо вычислений, производит сбор и вывод различных вспомогательных данных по всем блокам (максимальные невязки, точки мониторинга, интегральные характеристики и др.). Тем не менее большая часть межпроцессорного обмена данными приходится на процедуры стыковки блоков и, соответственно, организация этого процесса непосредствен-

но сказывается на эффективности параллелизации.

Как уже указывалось, в ПК SINF для стыковки блоков используется концепция вспомогательного виртуального блока. В базовой “последовательной” версии ПК SINF вычисления в виртуальном блоке и соответствующая пересылка данных производятся последовательно, поле за полем, с использованием общей памяти (рис. 1 а). Сохранение подобной концепции в “параллельной” версии программы привело бы к необходимости выполнения для каждой стыковки многократного копирования данных, что является крайне неэффективным — более предпочтительна межпроцессорная пересылка всех данных единым пакетом. Кроме того, формирование виртуального блока само по себе является достаточно сложной задачей, которая не сводится к прямому копированию данных из реальных блоков. В частности, процедуры копирования должны учитывать все возможные варианты ориентации индексных координатных линий в стыкуемых блоках, а в случае использования сеток с обрывом сеточных линий на межблочном интерфейсе — предусматривать переинтерполяцию данных.

Чтобы упростить копирование и обеспечить эффективную передачу данных между процессами, не затрагивая при этом уже реализованные и отлаженные алгоритмы работы с виртуальным блоком, в ПК SINF использован следующий прием. В том процессе, где происходит обработка данной стыковки, создаются дополнительные блоки, представляющие собой копии приграничных слоев ячеек реальных стыкуемых блоков (рис. 1 б). Межпроцессорное копирование всех необходимых для стыковки данных из реального блока в дополнительный осуществляется единым пакетом при помощи функций MPI. Далее выполняется обычная обработка стыковки для дополнительных блоков, после чего проводится обратное MPI-копирование необходимых данных в реальные блоки. В представленной схеме рассмотрен наиболее общий случай, когда в обработке одной стыковки участвуют три процесса. Однако для сокращения межпроцессорного трафика целесообразно обрабатывать стыковку в том же процессе, что и один из стыкуемых реальных блоков. В этом случае виртуальный блок напрямую “общается” с реальным блоком, находящимся в том же процессе, а соответствующий дополнительный блок не создается. Манипулируя распределением блоков и стыковок между процессами, можно достаточно гибко распределять загрузку имеющихся процессоров для получения наиболее высокой эффективности.

К настоящему времени накоплен большой опыт применения параллельной версии ПК SINF при проведении ресурсоемких гидродинамических расчетов (с размерностью сетки до 20 миллионов ячеек) на нескольких высокопроизводительных кластерах с использованием до 24 процессоров (12 двухпроцессорных узлов). Для всех рассмотренных задач эффективность распараллеливания была не менее 0.8. Ниже даны лишь некоторые примеры.

3. Примеры расчетов. В данном разделе представлены результаты решения ряда ресурсоемких задач гидродинамики и теплообмена, полученные с использованием параллельной версии ПК SINF на высокопроизводительных кластерных системах. Отличительной особенностью рассмотренных задач является применение нестационарных формулировок для моделирования турбулентности (современные подходы типа DES и DNS), поскольку RANS подходы не обеспечивали адекватного моделирования.

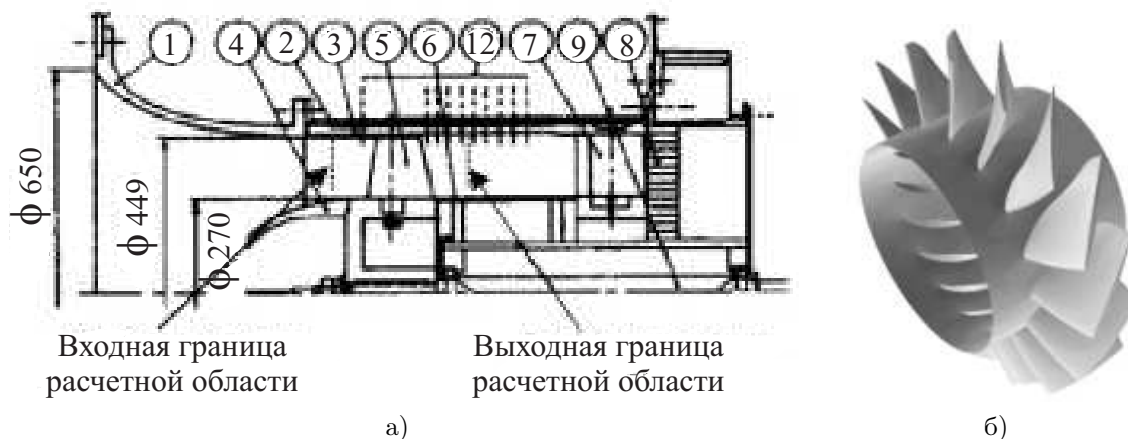


Рис. 2. Схема экспериментальной установки (а) и расчетная модель ротора осевого компрессора (б): 1 — входная камера, 2 — внешний кожух, 3 — внутренний кожух, 4 — носовая часть, 5 — рабочее колесо, 6 — ступица, 7 — статор, 8 — сотовая решетка, 9 — вращающаяся ось, 12 — отверстия для измерений

3.1. Предотрывное течение в рабочем колесе осевого компрессора. Расчет течения в компрессорной решетке является одной из проблемных задач современной вычислительной гидродинамики, поскольку наличие сильного встречного градиента давления чревато возникновением неустойчивых от-

рывных зон, не поддающихся достоверному описанию на основе существующих RANS моделей турбулентности. Эффективным решением проблемы может стать использование комбинированных RANS/LES подходов в рамках нестационарной формулировки задачи.

В настоящей работе возможности метода DES при моделировании предотрывных режимов течения в рабочем колесе осевого компрессора демонстрируются на примере одиночного ротора с 16 лопатками, экспериментальное исследование которого выполнено в работе [3]. Схема установки показана на рис. 2 а, а расчетная модель колеса — на рис. 2 б (фактически рассматривалось обтекание одной лопатки с условиями периодичности на соответствующих границах расчетной области). Особенностью экспериментальной установки является сравнительно большой концевой зазор между лопаткой и кожухом, что приводит к проявлению сильных эффектов перетекания газа. Статорные лопатки расположены достаточно далеко вниз по потоку, что позволяет пренебречь их влиянием на течение в роторе. Число Рейнольдса, построенное по радиусу лопатки R_{tip} и значению окружной скорости V_{tip} на ее конце, равно 480 000. Число Маха не превышает 0.1, поэтому задача решается в приближении несжимаемой жидкости. Используемая для расчетов сетка содержит 1.7 миллиона ячеек; надлежащее сгущение сетки обеспечивает нормированное расстояние от стенки до центра ближайшей ячейки $Y^+ < 1$.

Режим работы ротора задается коэффициентом расхода ϕ , а его производительность оценивается по коэффициенту мощности λ , которые определяются следующими соотношениями:

$$\phi = \frac{4Q}{V_{tip}\pi(D^2 - D_h^2)}, \quad \lambda = \frac{8L}{\rho V_{tip}^3 \pi(D^2 - D_h^2)}.$$

Здесь Q — общий расход, D — диаметр кожуха, D_h — диаметр ступицы, L — мощность на валу (произведение крутящего момента и угловой скорости ротора). Основному режиму работы компрессора отвечает значение коэффициента расхода $\phi = 0.455$; расчеты выполнялись при изменении ϕ от 0.3 до 0.6.

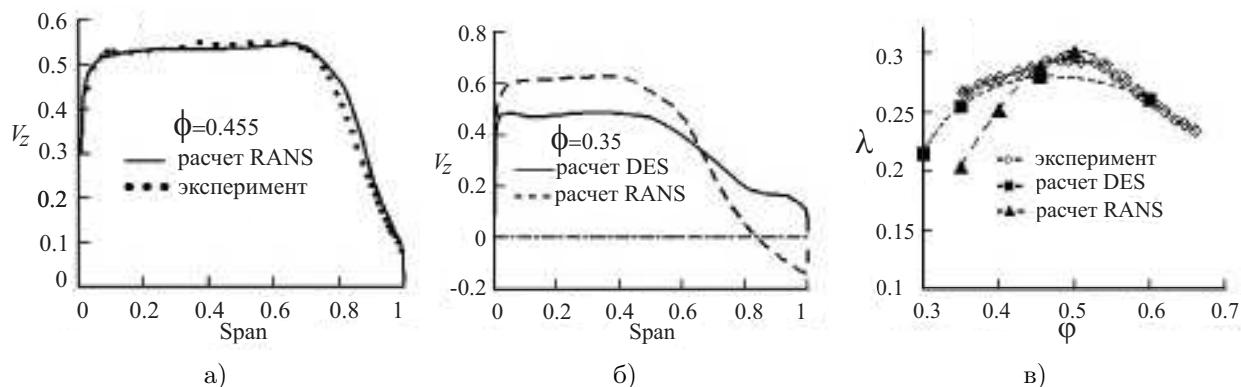


Рис. 3. Расчет течения в рабочем колесе осевого компрессора: а) и б) осредненное по шагу решетки радиальное распределение осевой компоненты скорости за ротором, в) коэффициент мощности на валу

Некоторые результаты расчета течения в рабочем колесе осевого компрессора представлены на рис. 3. Полученное для основного режима ($\phi = 0.455$, рис. 3 а) радиальное распределение осевой компоненты скорости за ротором демонстрирует прекрасное согласие с данными измерений. Отметим, что для этого режима осредненные по времени результаты расчета по методу DES практически совпадают с данными стационарного расчета на основе RANS модели турбулентности (в расчетах использовалась модель эффективной вязкости Спаларта–Аллмараса). Однако для предотрывного режима ($\phi = 0.35$, рис. 3 б) принципиальное расхождение результатов двух подходов очевидно: стационарный расчет предсказывает наличие возвратного течения в периферийной области, тогда как по результатам более надежного DES подхода возвратного течения нет и, соответственно, уровень скоростей вблизи ступицы заметно ниже. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по интегральным характеристикам компрессора (рис. 3 в) подтверждает, что нестационарная формулировка задачи обеспечивает более правильное моделирование предотрывных режимов работы ротора с проявлением сильных эффектов перетекания газа через концевой зазор, тогда как для $\phi > 0.455$ можно ограничиться более дешевым стационарным расчетом.

Некоторое представление об особенностях течения в роторе на предотрывном режиме дает рис. 4 (представлены результаты расчета по методу DES). В частности, показанное на рис. 4 а распределение скоростей в окрестности концевой зазора свидетельствует о наличии в этой области крупномасштабных вихрей, которые приводят к быстрому размыванию вытекающей из зазора струи и, как следствие, к почти

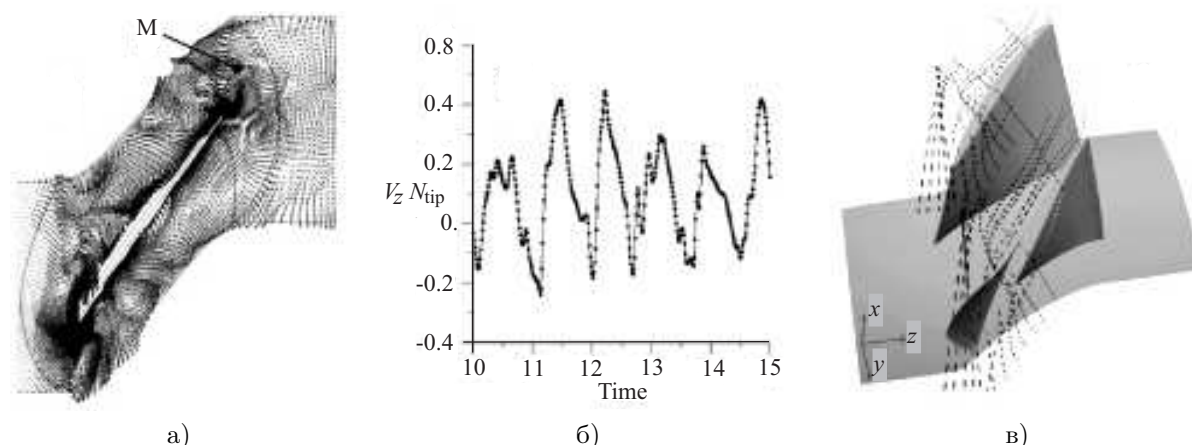


Рис. 4. Расчет течения в рабочем колесе осевого компрессора по методу DES для $\phi=0.35$: а) мгновенное поле скорости на поверхности $R = R_{tip}$, б) эволюция осевой компоненты скорости в точке мониторинга М, в) линии тока осредненного движения

полному вырождению концевых вихря (рис. 4 в). При этом, как явствует из рис. 4 б, амплитуда пульсаций скорости в несколько раз превышает среднее значение. В таких условиях существующие RANS модели турбулентности, “настроенные” на течения с относительно невысоким уровнем пульсаций, недооценивают интенсивность турбулентного перемешивания и, соответственно, предсказывают преждевременный отрыв потока (рис. 3 б).

3.2. Течение и теплообмен в модельной конфигурации пленочного охлаждения. Пленочное охлаждение является одним из способов эффективного охлаждения и защиты лопаток газотурбинных установок от воздействия высокой температуры рабочей среды. В таких системах подаваемый через ряд отверстий в теле лопатки относительно холодный воздух формирует защитную пленку между горячим газом и поверхностью лопатки. Однако попытки численного моделирования охлаждающего эффекта вытекающей из отверстия струи на основе RANS и даже DES подходов до сих пор не увенчались успехом. В настоящей работе представлены расчеты модельной конфигурации пленочного охлаждения, выполненные без использования какой-либо модели турбулентности, как в методе DNS. Однако, поскольку использованная для расчета сетка не обеспечивала разрешения всех турбулентных масштабов, такой подход можно позиционировать как LES без подсеточной модели.

Рассматривается задача охлаждения плоской пластины при подаче охладителя через ряд круглых отверстий, расположенных под углом к основному потоку (рис. 5 а). Расчеты проводились для условий эксперимента [6]; число Рейнольдса, построенное по диаметру D отверстия и скорости основного потока, равно 17 400, отношение потока массы в охладителе и горячем газе равно 0.5. Покрывающая расчетную область (рис. 5 б) сетка имела размерность около 20 миллионов ячеек (это примерно на порядок больше, чем требуется для решения задачи в рамках RANS или DES подходов).

Показанное на рис. 5 в мгновенное распределение z -компоненты скорости на срединной плоскости ($z = 0$) демонстрирует разрешение большого числа вихревых структур. Следует отметить наличие турбулентных вихрей в пограничном слое на входе в расчетную область, что имеет большое значение для обеспечения соответствия расчетной модели условиям эксперимента; необходимые для этого нестационарные граничные условия формировались на основании результатов вспомогательного DNS-расчета турбулентного пограничного слоя.

Типичный вид мгновенного температурного поля на поверхности пластины (рис. 5 г) свидетельствует о формировании вблизи отверстия большого числа хаотично распределенных по поверхности пластины малоразмерных зон с температурой охладителя. Происхождение этих зон поясняет рис. 5 д, где показаны мгновенные векторы скорости в сечении $x/D = 1.5$ (координата x отсчитывается от центра отверстия вниз по потоку).

Анализируя явления в пристенной области, можно заключить, что перенос частиц охладителя к поверхности пластины осуществляется посредством довольно мелких вихрей, образующихся вблизи стенки в результате взаимодействия струи с пограничным слоем основного потока. Подобное взаимодействие не моделируется в рамках существующих RANS моделей турбулентности; ситуацию не спасает и использование DES подхода, поскольку для моделирования пристенных эффектов в нем используется RANS модель. Лишь на пути прямого моделирования с разрешением достаточно большого числа турбулентных вихрей (в том числе и в пристенной области) удалось приблизиться к экспериментально наблюдаемым результа-

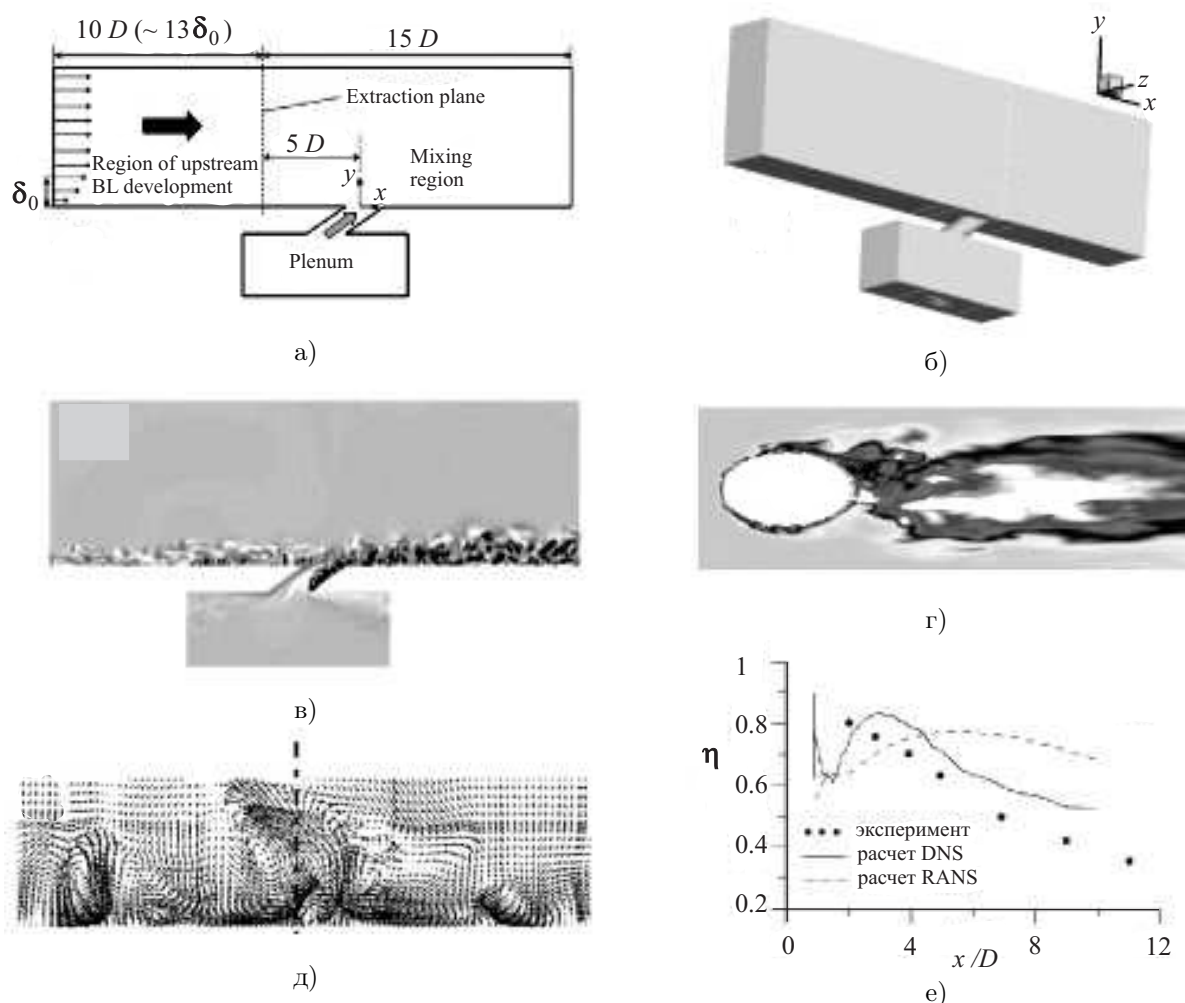


Рис. 5. Расчет течения и теплообмена в модельной конфигурации пленочного охлаждения: а) схема течения в эксперименте [6], б) расчетная область, в) распределение z -компоненты скорости, г) мгновенное поле температуры на стенке, д) векторы скорости за отверстием (сечение $x/D = 1.5$), е) изменение адиабатической эффективности охлаждения вдоль центральной линии

там по эффективности охлаждения (рис. 5 е). Однако использованной в представляемых расчетах сетки в 20 миллионов ячеек оказалось все же недостаточно для разрешения всех требуемых вихрей, вследствие чего эффективность охлаждения вдоль центральной линии получилась несколько завышенной (рис. 5 е), а ширина охлаждаемой зоны — заниженной по сравнению с данными измерений.

3.3. Автоколебания цилиндра в турбулентном потоке. Проблемы, обусловленные автоколебаниями плохообтекаемых цилиндрических тел в потоке жидкости, встречаются в морской нефтедобыче, строительстве и многих других областях. Источником колебаний является периодическое изменение гидродинамической подъемной силы, обусловленное попеременным срывом вихрей то с одной стороны цилиндра, то с другой. Если частота схода вихрей близка к частоте собственных колебаний цилиндра, то наблюдается резонансное увеличение амплитуды колебаний, что приводит к синхронизации частоты схода вихрей с частотой собственных колебаний цилиндра (так называемый захват частоты).

В настоящей работе рассмотрены поперечные колебания упруго закрепленного круглого цилиндра в турбулентном потоке (рис. 6 а). Течение вокруг колеблющегося цилиндра рассчитывалось с применением деформируемых сеток, а получаемые гидродинамические силы использовались для одновременного расчета движения цилиндра. Несмотря на двумерность геометрии, задача решена в трехмерной постановке ввиду необходимости моделирования трехмерной структуры вихревого следа за цилиндром. Размер расчетной области вдоль оси цилиндра составлял два диаметра (в тестовых расчетах — до шести диаметров); на соответствующих границах области накладывались условия периодичности. Расчетная сетка (рис. 6 б) содержит около 200 тысяч ячеек; сгущение сетки к поверхности цилиндра обеспечивает нормированное расстояние до стенки $Y^+ < 1$; в следе за цилиндром уверенно разрешаются не менее шести вихрей “дорожки Кармана”.

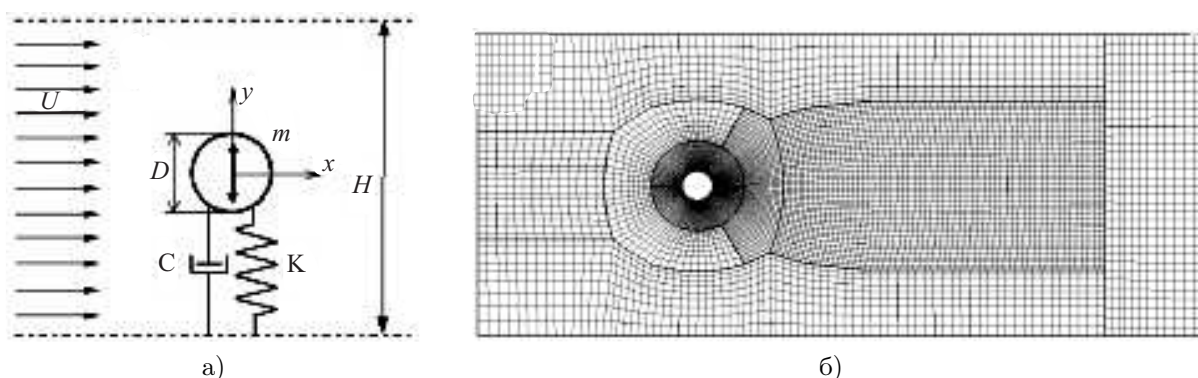


Рис. 6. Схема течения (а) и фрагмент сетки (б) для расчета автоколебаний цилиндра в потоке

Следуя условиям, в которых получены экспериментальные данные [4], рассмотрены колебания цилиндра в канале шириной $H = 10D$. Приведенная масса цилиндра, $m^* = 4m/\pi\rho LD^2$, составляла $m^* = 3.3$; коэффициент демпфирования подвески (декремент затухания) полагался равным 0.004. Относительная скорость потока $U^* = U/Df$ изменялась от 2 до 11 (диапазон чисел Рейнольдса $10^3 - 10^4$), что обеспечило варьирование частоты схода вихрей вблизи собственной частоты колебаний цилиндра f . Для моделирования турбулентности использовался метод DES. Пограничные слои на стенках канала в расчете не разрешались (вместо этого задавались условия скольжения). Результаты расчетов представлены на рис. 7.

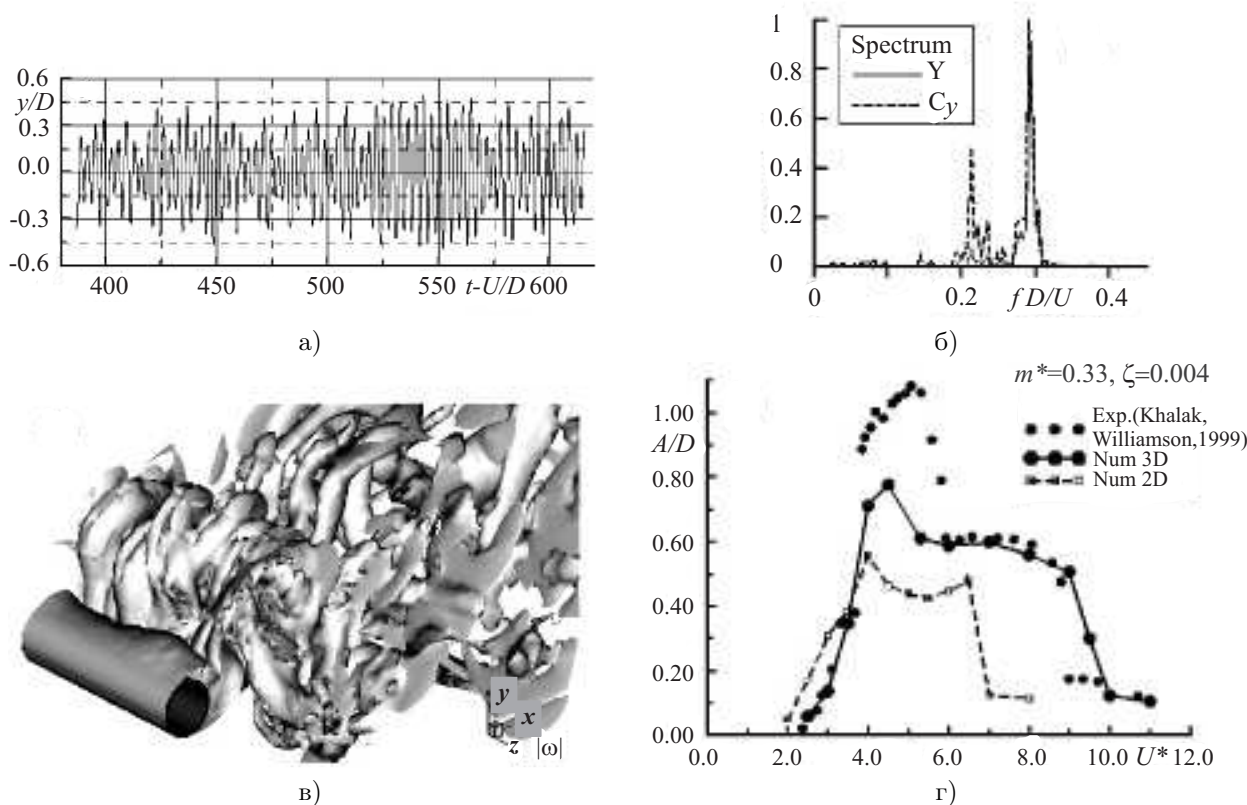


Рис. 7. Расчет автоколебаний цилиндра: а) типичная эволюция положения цилиндра, б) спектр колебаний, в) структура следа, г) амплитудная характеристика колебаний

Типичная история колебаний цилиндра показана на рис. 7 а. В целом движение имеет ярко выраженный нерегулярный характер (обусловленный как турбулентными пульсациями в следе, так и сложным нелинейным взаимодействием потока с колеблющимся цилиндром), что приводит к необходимости расчета сотен периодов колебаний для получения статистически установившихся результатов. В спектре колебаний (рис. 7 б) присутствуют два ярко выраженных пика с безразмерными частотами около 0.3 и 0.22, которые примерно отвечают собственной частоте колебаний цилиндра и частоте схода вихрей с неподвижного цилиндра соответственно. Разность этих частот просматривается на истории колебаний (рис. 7 а) в виде более или менее регулярных биений амплитуды с периодом около 13 единиц безразмерного времени.

Мгновенная изоповерхность завихренности, показанная на рис. 7 в, демонстрирует существенно трех-

мерную структуру вихревого следа за цилиндром. Типичный размер крупномасштабных вихревых структур вдоль оси цилиндра примерно равен двум диаметрам, что определяет минимально допустимую ширину расчетной области. Более длинноволновые структуры имеют сравнительно малую амплитуду и быстро разрушаются (в частности, на рис. 7 в можно видеть структуру длиной $4D$ вблизи поверхности цилиндра), а потому не оказывают существенного влияния на колебания цилиндра.

Опыт расчетов показывает, что моделирование турбулентного обтекания цилиндра в рамках двумерной постановки задачи не обеспечивает приемлемой точности результатов (в частности, сила сопротивления завышается примерно в полтора раза). Применительно к задаче об автоколебаниях цилиндра двумерный расчет, как можно видеть на рис. 7г, дает заниженную амплитуду резонансных колебаний и явно недооценивает ширину области захвата частоты, тогда как представляемые трехмерные расчеты демонстрируют вполне удовлетворительное согласие с экспериментом. Некоторое рассогласование наблюдается лишь в области так называемого верхнего участка резонансной кривой ($4 < U^* < 6$), где амплитуда колебаний в эксперименте превышала диаметр цилиндра.

Специально проведенные методические расчеты позволяют утверждать, что отмеченное рассогласование не связано с недостаточной густотой сетки и/или протяженностью расчетной области вдоль оси цилиндра. Возможно, причина кроется во влиянии неучтенных факторов, имевших место в эксперименте, таких как сравнительно небольшая длина погруженной в гидроток части цилиндра (всего $10D$), наличие свободной поверхности, неоднородность набегающего потока и т.п. Следует отметить также, что по сравнению с другими подобными расчетами уже сам факт заметного повышения амплитуды колебаний в обсуждаемой области можно считать большим достижением.

4. Список сокращений.

DES — *Detached Eddy Simulation* (моделирование отсоединенных вихрей) — метод моделирования турбулентности, предполагающий разрешение крупных турбулентных вихрей вдали от стенки (как в методе LES) с автоматическим переходом к использованию RANS модели в пристенной области.

DNS — *Direct Numerical Simulation* (прямое численное моделирование) — метод моделирования турбулентности, предполагающий разрешение всех турбулентных вихрей вплоть до самых мелких.

LES — *Large Eddy Simulation* (моделирование крупных вихрей) — метод моделирования турбулентности, предполагающий разрешение крупных турбулентных вихрей; влияние не разрешаемых мелких вихрей учитывается дополнительной “подсеточной” моделью.

MPI — *Message Passing Interface* (интерфейс передачи данных) — библиотека процедур, предоставляющая программисту интерфейс высокого уровня для обмена данными между параллельными процессами.

RANS — *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* — расчет осредненного движения (без разрешения турбулентных пульсаций) на основе интегрирования осредненных по Рейнольдсу уравнений гидродинамики с привлечением дополнительной модели, оперирующей осредненными характеристиками турбулентности; среди наиболее популярных модели $k-\varepsilon$, $k-\omega$, ν_t и др.

SPMD — *Single Process Multiple Data* — стратегия распараллеливания вычислений, в которой один и тот же программный код выполняет в разных процессах однотипные действия с отдельными частями единого массива данных (например, с блоками многоблочной сетки).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов Е.М., Зайцев Д.К. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2004. **2(36)**. 70–81.
2. Зайцев Д.К., Щур Н.А. Применение метода деформируемых сеток для моделирования автоколебаний цилиндра в однородном потоке // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2006. **5/1(47)**. 15–22.
3. Inoue M., Kuroamaru M., Fukuhara M. Behavior of tip leakage flow behind an axial compressor rotor // ASME J. of Engineering for Gas Turbines and Power. 1986. **108**. 7–14.
4. Khalak A., Williamson C.H.K. Motions, forces and mode transitions in vortex-induced vibrations at low mass-damping // J. Fluids and Structures. 1999. **13**. 813–851.
5. Smirnov E.M. Numerical simulation of turbulent flow and energy loss in passages with strong curvature and rotation using a three-dimensional Navier–Stokes solver / Vrije Universitet Brussel, Dienst Stromingsmechanica (Dept. Fluid Mechanics). Report on “Research in Brussels’92”. Brussels, March 1993.
6. Sinha A.K., Bogard D.G., Crawford M.E. Film cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio // ASME J. Turbomachinery. 1991. **113**. 442–449.

Поступила в редакцию
03.03.2007