

На правах рукописи

ЩУР Николай Алексеевич

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНЫХ И ВЫНУЖДЕННЫХ
КОЛЕБАНИЙ ТЕЛ В ПОТОКЕ

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2007

Работа выполнена на кафедре гидроаэродинамики ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент Зайцев Дмитрий Кириллович

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

кандидат технических наук,
Лобачев Михаил Павлович

Ведущая организация: ФГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный университет"

Защита состоится « » _____ 2008 года в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.07 при 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 « » _____ 2008 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук,
доцент

Зайцев Д.К.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Существует обширный ряд задач гидродинамики, в которых имеет место взаимодействие между движением твёрдого тела в потоке и конфигурацией самого потока. Это задачи аэроупругости. К данному классу задач относятся: флаттер крыла, колебания высотных зданий и сооружений под ветровой нагрузкой, автоколебания трубчатых теплообменников, опор нефтяных платформ, подвесных мостов, лопаток турбомашин, колебания гибких крыльев, деформация обтекаемых поверхностей и т. д. Практическая значимость задач аэроупругости во многих инженерных приложениях неоспорима. Однако на данный момент для решения подобных задач используются, как правило, весьма упрощённые модели, основанные на интегральных балансовых соотношениях и, зачастую, не учитывающие взаимного влияния гидродинамической нагрузки и движения тела. Между тем, точность и достоверность полученных таким образом данных вызывают серьёзное сомнение.

Применение упрощённых постановок связано, прежде всего, с тем, что численное решение задач, имеющих значение для практических приложений, в полной постановке является очень ресурсоёмким. Большие вычислительные затраты связаны как с большим временем установления для задач с обратной связью, так и с моделированием турбулентности. От способа моделирования турбулентности зависит точность, а в некоторых случаях - и физическая адекватность решения. Известно, в частности, что широко распространенные URANS модели турбулентности (k - ϵ , k - ω и др.) не позволяют адекватно моделировать течение в случаях, когда крупномасштабные вихревые структуры составляют суть явления и/или оказывают существенное влияние на исследуемые характеристики течения (как, например, при расчете обтекания цилиндра). Подобная ситуация может иметь место и при рассмотрении интенсивных колебаний тел в потоке.

Весьма эффективным средством решения задач с крупномасштабными вихрями является применение гибридных RANS-LES подходов (в частности, DES). Однако опыт применения подобных вихре-разрешающих формулировок к расчету обтекания колеблющихся тел крайне невелик, что определяет необходимость дальнейшего тестирования этого подхода применительно к данному классу течений.

Исключительная сложность задачи аэроупругости о колебаниях тела в потоке жидкости усугубляется необходимостью вести расчет в области с изменяющейся геометрией. Хотя подобная опция имеется во многих коммерческих

гидродинамических пакетах, учет взаимного влияния течения жидкости и движения обтекаемого тела является очень непростой задачей, требующей высокой квалификации исследователя. Как следствие, подобные исследования встречаются крайне редко. Фактически, численное решение задач аэроупругости с совместным интегрированием уравнений гидродинамики (с применением трехмерных вихре разрешающих подходов) и уравнений движения обтекаемого тела является передовым краем современной вычислительной гидродинамики.

В настоящей работе рассмотрены две задачи, связанные с колебаниями тел в жидкости. Это систематическое численное исследование автоколебаний круглого цилиндра в однородном потоке и расчет течения, создаваемого колебаниями упругой консольной пластины. Обе задачи решены с полным учетом взаимного влияния течения жидкости и движения тела, с применением трехмерных вихре-разрешающих формулировок. С учетом изложенного ранее, подобное исследование является безусловно актуальным и представляет несомненный интерес для вычислительной гидродинамики. Помимо этого, обе рассмотренные задачи имеют и непосредственное практическое значение.

Цели работы

Представляемая диссертационная работа направлена на

- Разработку и внедрение метода деформируемых сеток в программный комплекс общего назначения SINF. Тестирование метода.
- Доработку комплекса SINF для расчета автоколебаний цилиндра. Проведение тестовых расчетов для ламинарного режима обтекания; сравнение результатов расчета и эксперимента.
- Систематическое численное исследование автоколебаний цилиндра в турбулентном потоке с применением двумерной (URANS) и трёхмерной (DES) постановок. Сравнение полученных результатов с данными измерений. Оценку применимости двумерной постановки. Исследование структуры вихревого следа за колеблющимся цилиндром.
- Численное моделирование струи, индуцируемой колебаниями упругой консольной пластины. Исследование структуры полученного течения.

Научная новизна работы

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

- Впервые проведено подробное численное исследование поперечных автоколебаний цилиндра в турбулентном потоке в рамках двумерной (URANS) и трёхмерной (DES) формулировки. Получены амплитудные и частотные характеристики колебаний, а также осреднённые параметры силового воздействия на цилиндр в зависимости от приведённой скорости потока;
- Обнаружено, что результаты трёхмерного расчёта хорошо согласуются с экспериментальными данными как по амплитуде и частоте колебаний цилиндра, так и по уровню гидродинамической нагрузки, тогда как двумерный расчёт недооценивает амплитуду колебаний цилиндра и даёт более узкую область захвата частоты;
- Исследована структура вихревого следа за осциллирующим цилиндром; определены режимы схода вихрей внутри области захвата частоты. Впервые обнаружен S+P режим схода вихрей вблизи правой границы области захвата частоты, а также чередование 2S и 2P режимов схода вихрей в области “upper” режима, сопровождаемое существенным изменением амплитуды и частоты колебаний цилиндра;
- Впервые проведено численное моделирование течения, индуцируемого колебаниями упругой консольной пластины, в рамках трёхмерной (DES) формулировки с учетом обратного влияния жидкости на движение пластины. Получен эффект генерации струи; картина течения согласуется с данными наблюдений;
- Проанализирована структура потока. Обнаружено, в частности, что вблизи передней кромки пластины имеется зона возвратных токов; угол раскрытия струи составляет около 45° . Показано, что струя генерируется в основном боковыми кромками пластины.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных численных результатов обосновывается использованием хорошо отлаженного программного комплекса SINF, верификация которого осуществлялась путем сопоставления результатов расчетов с данными

теории и экспериментов для ряда модельных и тестовых задач. Приложение этого пакета к расчету канонических задач в настоящей работе служило основой при верификации реализованного автором метода деформируемых сеток. Все расчеты выполнены с применением дискретизации второго порядка точности по времени и пространству. Параметры расчётной схемы подбирались при проведении предварительных методических расчётов, результаты которых сопоставлялись с экспериментальными данными.

Практическая ценность работы

Практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

- базовый программный комплекс SINF доработан для моделирования течений жидкости в областях с изменяющейся геометрией на основе метода деформируемых сетках, что существенно расширило область применимости комплекса;
- продемонстрирована эффективность трёхмерного вихререшающего подхода (DES) для расчета турбулентного обтекания колеблющихся тел;
- для течения генерируемого колебаниями упругой пластины получены осреднённые поля скорости и давления, а также представительная выборка мгновенных полей, которые могут служить основой для будущего исследования пульсационных характеристик течения.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на российских и международных конференциях и семинарах: XV школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева “Процессы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках” (Калуга, 2005); IX всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 22-28 августа 2006г); международной научной конференции “Параллельные вычислительные технологии” (Челябинск, 29 января – 2 февраля 2007г.); международной конференции по параллельным технологиям в вычислительной гидродинамике (Parallel CFD) (Анталия, Турция 2007); XVI школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (С.-Петербург, 21 - 25 мая 2007 г.)

Публикации по теме диссертации

Основные результаты работы изложены в шести научных публикациях, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 105 страницах машинописного текста, включая 5 таблиц и 56 рисунков. Список литературы содержит 126 наименований.

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 работы по исследованию автоколебаний цилиндра в однородном потоке. Пристальное внимание уделено режимам схода вихрей, которые определяют структуру следа за цилиндром. Также приводятся результаты работ по исследованию вынужденных колебаний цилиндра.

Помимо обзора экспериментальных исследований в разделе также присутствует обзор результатов большого числа расчётов, проделанных различными авторами. Ряд работ посвящен исследованию ламинарного режима обтекания цилиндра, который не вносит дополнительной неопределенности, связанной с моделированием турбулентности, и, к тому же, позволяет использовать более экономичную двумерную постановку задачи. Существенная часть этих исследований опирается на эксперимент (Anagnostopoulos & Bearman 1992), который, по сути, является единственным доступным экспериментом для ламинарного режима обтекания.

В представленных численных исследованиях автоколебаний цилиндра в турбулентном потоке, преобладают исследования, использующие двумерную постановку задачи с применением (URANS) подхода для моделирования турбулентности. Небольшое число расчётов на основе трёхмерных вихре-разрешающих формулировок (DES подход) для моделирования турбулентности объясняется значительными вычислительными затратами при проведении подобных расчётов. Отмечается, что расчеты автоколебаний цилиндра в турбулентном потоке с использованием вихре-разрешающих формулировок дают гораздо лучшее согласие с

экспериментом, чем двумерные расчеты. Однако опыт применения трехмерных формулировок в этой области еще слишком мал для окончательных выводов.

Раздел 1.2 посвящен исследованию течения генерируемого колебаниями упругой пластины в неподвижной жидкости. Технологическим устройством, использующим этот эффект для охлаждения тепловыделяющих элементов внутри электронных приборов, является пьезовентилятор.

Исследование структуры течения, создаваемого пластиной пьезовентилятора, находится в зачаточном состоянии. Эксперименты направлены, главным образом, на оценку интегрального охлаждающего эффекта пьезовентилятора и/или визуализацию потока. Измерение скоростей в струе было выполнено лишь для модельного двумерного случая. Немногие расчеты также ограничиваются двумерной постановкой задачи, хотя для большинства серийных моделей пьезовентилятора геометрия пластины предполагает существенные трёхмерные эффекты.

С учетом сказанного, выполненное в настоящей работе трехмерное численное моделирование струи, генерируемой колебаниями упругой консольной пластины, является первым в своем роде и представляет несомненный интерес для более глубокого понимания механизма генерации струи и роли различных факторов в этом процессе.

В разделе 1.3 приводится краткая характеристика и сравнительная оценка основных подходов к учету движения границ расчетной области в задачах гидродинамики. С учетом особенностей различных подходов, показана целесообразность выбора метода деформируемых сеток для расчета обтекания колеблющихся тел (цилиндра и упругой пластины).

Во второй главе излагаются основы метода деформируемых сеток для решения задач гидродинамики в областях с изменяющейся геометрией. В разделах 2.1 и 2.2 приведены уравнения гидродинамики для произвольного деформируемого объема и рассмотрены особенности их дискретизации. В частности, обсуждается вопрос о способе вычисления скоростей граней ячеек. В разделе 2.3 дано краткое описание программного комплекса SINF и перечислены изменения, внесенные в данный комплекс в рамках настоящей работы для внедрения метода деформируемых сеток.

В разделе 2.4 приводится описание разработанного автором алгоритма деформации блочно-структурированной сетки. Разработанный алгоритм деформации сетки в некотором блоке исходит из того, что в блоке задан сегмент, положение которого в данный момент времени известно. Пересчет координат узлов сетки вне

этого сегмента основан на поочередном расчете векторов перемещения узлов, расположенных вдоль сеточных линий, идущих от движущегося сегмента к границе блока. При этом используется линейная интерполяция вдоль соответствующих сеточных линий.

Достоинством данного способа деформации является его эффективность (отсутствие итераций) и возможность сохранять качество сетки вблизи твердой поверхности, где это наиболее актуально для получения точного решения.

В разделе 2.5 представлены результаты тестирования блока процедур, ответственного за расчёт на деформируемых сетках. Первая серия тестовых расчётов была сделана для стационарных потоков, однако использовалась нестационарная формулировка задачи, причем расчетная сетка искусственно деформировалась во времени. Были рассмотрены, в частности, однородный поток и неизотермическое течение в каверне с движущейся крышкой.

Также была рассмотрена задача о внезапном приведении в движение шара, находящегося в безграничной несжимаемой покоящейся жидкости. Суть теста состоит в том, что сравниваются решения, полученные в двух эквивалентных постановках. В первой постановке шар и сетка неподвижны, а жидкость в области движется с единичной скоростью. Во второй постановке шар движется вдоль оси x с отрицательной единичной скоростью, жидкость неподвижна, а сетка деформируется в соответствии с движением шара.

Для всех рассмотренных тестов, деформация сетки не приводила к изменению результатов расчёта относительно результатов на неподвижной сетке.

В третьей главе приводятся результаты численного исследования поперечных автоколебаний упруго закреплённого круглого цилиндра в однородном ламинарном и турбулентном потоке.

В разделе 3.1 дана общая постановка задачи об автоколебаниях цилиндра, приводится динамическое уравнение движения цилиндра, даны определяющие безразмерные параметры задачи. Также приведено описание экспериментов, на которые опираются проведённые в настоящей работе расчёты.

Для моделирования турбулентного следа за осциллирующим цилиндром, в работе использовалась как двумерная, так и трёхмерная постановки. В двумерной постановке для моделирования турбулентности использовалась низкорейнольдсовая SST модель Ментера. Трёхмерные расчеты выполнялись на основе DES подхода, в

котором SST модель использовалась в своей обычной RANS формулировке около стенки и плавно переходила в LES моду на удалении от нее.

В разделе 3.2 показаны результаты методических расчётов по исследованию сеточной сходимости, а также зависимости получаемого численного решения от различных параметров расчётной схемы для ламинарного и турбулентного режима обтекания цилиндра.

В пункте 3.2.1 проведено тестирование конечноразностной схемы, использованной для интегрирования уравнения движения цилиндра. Показано, что численная диссипация схемы при расчёте с шагами по времени, используемыми в гидродинамических расчётах, пренебрежимо мала по сравнению с демпфированием подвески.

В пункте 3.2.2 даны результаты методических расчётов для ламинарного обтекания неподвижного цилиндра, в которых были подобраны шаги расчётной сетки и шаги по времени, необходимые для получения сеточно-независимого решения. Полученная в расчётах зависимость числа Струхала от числа Рейнольдса хорошо соответствует экспериментальными данными.

В пункте 3.2.3 проведены методические расчёты для турбулентного обтекания неподвижного цилиндра при $Re=5000$. В частности, для двумерного расчета турбулентного обтекания неподвижного цилиндра были подобраны шаги расчётной сетки и шаги по времени, достаточные для получения сеточно-независимого решения. Приведены результаты трёхмерных расчётов, проведенных для определения длины расчётной области и шага сетки вдоль осевого направления, достаточных для проведения основной серии расчётов.

Обнаружено, что двумерные расчёты обтекания неподвижного цилиндра на порядок завышают амплитуду подъёмной силы. При этом амплитуда колебаний подъёмной силы в двумерных расчётах практически не зависит от времени, тогда как в трёхмерных расчётах наблюдаются её хаотические низкочастотные пульсации.

В разделе 3.3 приведены результаты численного моделирования автоколебаний цилиндра в ламинарном потоке. На рис.1 результаты расчёта сопоставлены с экспериментальными данными (Anagnostopoulos & Bearman 1992). Видно, что в расчёте, как и в эксперименте, наблюдается синхронизация колебаний подъёмной силы с колебаниями цилиндра (захват частоты), сопровождаемая резонансным увеличением амплитуды колебаний; частота колебаний цилиндра для этого режима соответствует его собственной частоте. Вне области захвата частоты цилиндр

колеблется с естественной частотой схода вихрей. Амплитуда колебаний цилиндра максимальна вблизи левой границы области захвата частоты.

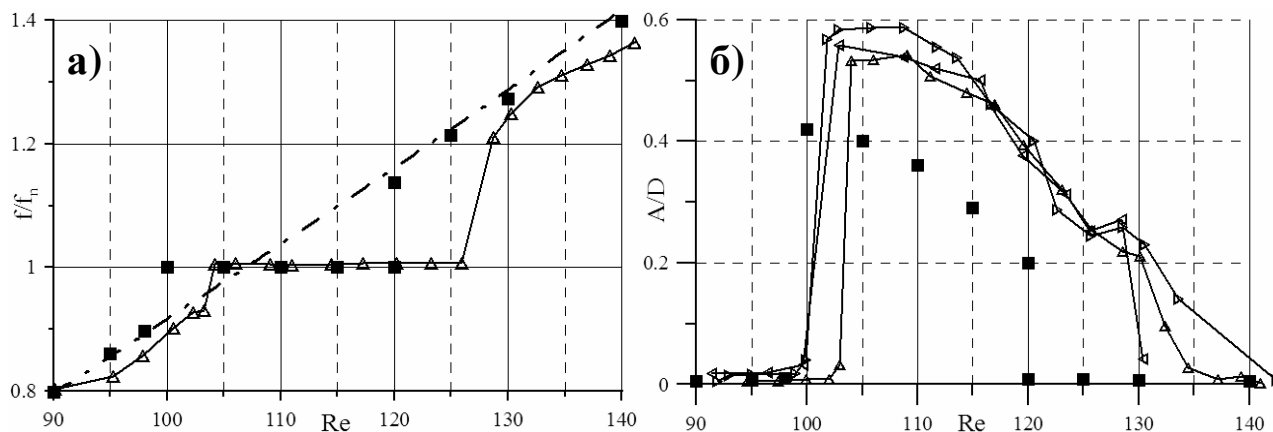


Рис. 1. Зависимость частоты схода вихрей (а) и амплитуды установившихся колебаний цилиндра (б) от числа Рейнольдса: $\triangle, \triangleright, \triangleleft$ - эксперимент (Anagnostopoulos & Bearman 1992), \blacksquare - настоящий расчёт, $-\cdot-$ - неподвижный цилиндр

Однако можно отметить, что амплитуда колебаний, полученная в расчёте, существенно меньше, а область захвата частоты несколько уже, чем в эксперименте, и слегка сдвинута влево. Дополнительное методическое исследование обнаружило значительный разброс расчетных данных, полученных разными авторами, причем для ряда работ на основании косвенных признаков было выявлено неверное задание параметров задачи. Результаты настоящего расчета хорошо согласуются с результатами аккуратно проведённых расчётов других авторов. На основании проведенного анализа сделан вывод о непригодности результатов эксперимента (Anagnostopoulos & Bearman 1992) для тестирования двумерных расчётов.

Помимо рассмотренного выше методического аспекта, проведённое исследование автоколебаний цилиндра в ламинарном потоке включало дополнительные серии расчётов с разными значениями удельной массы m^* (до сих пор подобного параметрического исследования для ламинарного режима обтекания никем не проводилось). Результаты этих расчётов показаны на рис.2.

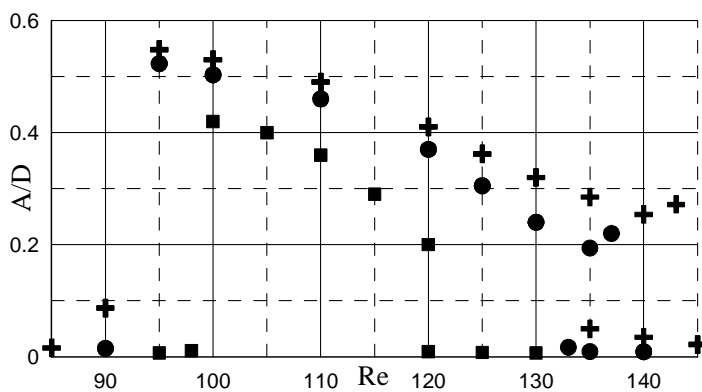


Рис.2. Зависимость амплитуды установившихся колебаний цилиндра от числа Рейнольдса (расчёт): \blacksquare - $m^*=149$, \bullet - $m^*=50$, $+$ - $m^*=17.85$

Можно отметить, в частности, что уменьшение удельной массы цилиндра ведет к увеличению амплитуды резонансных колебаний и расширению области

захвата частоты; для случая ламинарного обтекания данная закономерность продемонстрирована впервые. Вблизи правой границы области захвата частоты обнаружен гистерезис, причём область гистерезиса становится шире с уменьшением массы цилиндра.

В разделе 3.4 приводятся результаты численного моделирования автоколебаний цилиндра в турбулентном потоке. Исследование было выполнено для режимных параметров, отвечающих условиям проведения экспериментов (Khalak & Williamson 1999) и (Govardhan & Williamson 2000). На рис.3 показаны амплитудная и частотная характеристики колебаний цилиндра для удельной массы $m^*=3.3$. Видно, что двумерный расчёт дает заниженную амплитуду колебаний и явно недооценивает ширину области захвата частоты. Результаты трёхмерного расчёта хорошо согласуются с экспериментальными данными как по амплитуде, так и по частоте колебаний цилиндра. Можно отметить однако, что расчет не в полной мере воспроизводит локальное повышение амплитуды колебаний цилиндра вблизи левой границы области захвата частоты, отвечающее т.наз. “urper” режиму колебаний. Тем не менее наличие значительного подъёма амплитуды колебаний в упомянутой области можно считать серьёзным успехом настоящего расчёта, т.к. до сих пор ни в одном расчёте не удавалось воспроизвести данное явление.

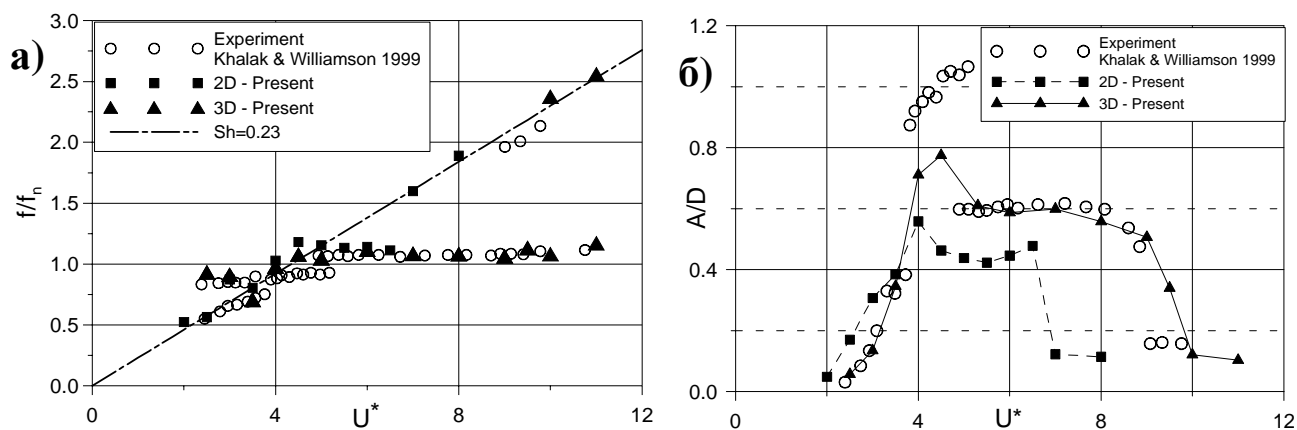


Рисунок 3. Зависимость частоты (а) и амплитуды (б) автоколебаний цилиндра от скорости потока ($m^*=3.3$)

Помимо амплитудной и частотной характеристик получены зависимости амплитуды подъёмной силы и угла сдвига фаз между подъёмной силой и смещением цилиндра от приведённой скорости U^* . В окрестности резонансной частоты сдвиг фаз претерпевает изменение от значения, близкого к 0° , до почти 180° , что соответствует экспериментальным данным. Получено хорошее согласование между расчётом и

экспериментом для амплитуды подъёмной силы (некоторое рассогласование наблюдается только в области “urreg” режима, где в эксперименте наблюдается более высокая амплитуда колебаний цилиндра, чем в расчёте).

На основании анализа структуры вихревого следа (рис.4) определены режимы схода вихрей с колеблющегося цилиндра. Вблизи левой границы области захвата частоты наблюдается 2S режим схода вихрей (рис.5а), когда за один период колебаний с цилиндра срываются два одиночных (Single) вихря. В середине области захвата частоты (рис.5б) режим схода вихрей соответствует 2P моде, когда за один период колебаний с цилиндра срывается две пары (Pair) вихрей. Вблизи правой границы области захвата частоты обнаружен S+P режим схода вихрей; при этом наблюдалась перемежаемость двух «зеркальных» режимов асимметричного S+P схода вихрей. Также было обнаружено чередование 2S и 2P режимов схода вихрей в области “urreg” режима колебаний.

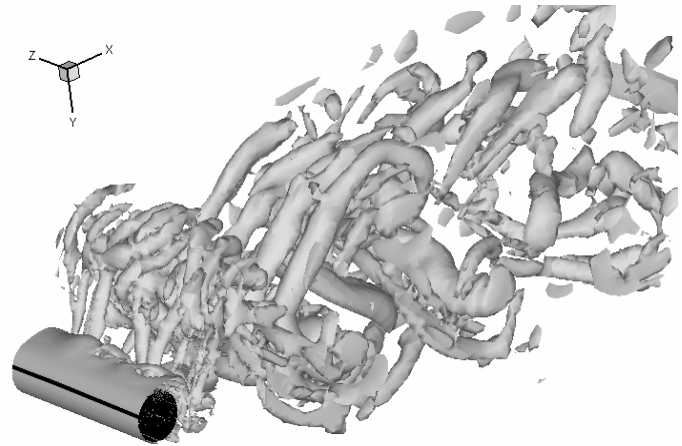


Рис.4. Трёхмерная структура следа за колеблющимся цилиндром (изоповерхность Q-критерия; $U^*=4.5$, $m^*=3.3$)

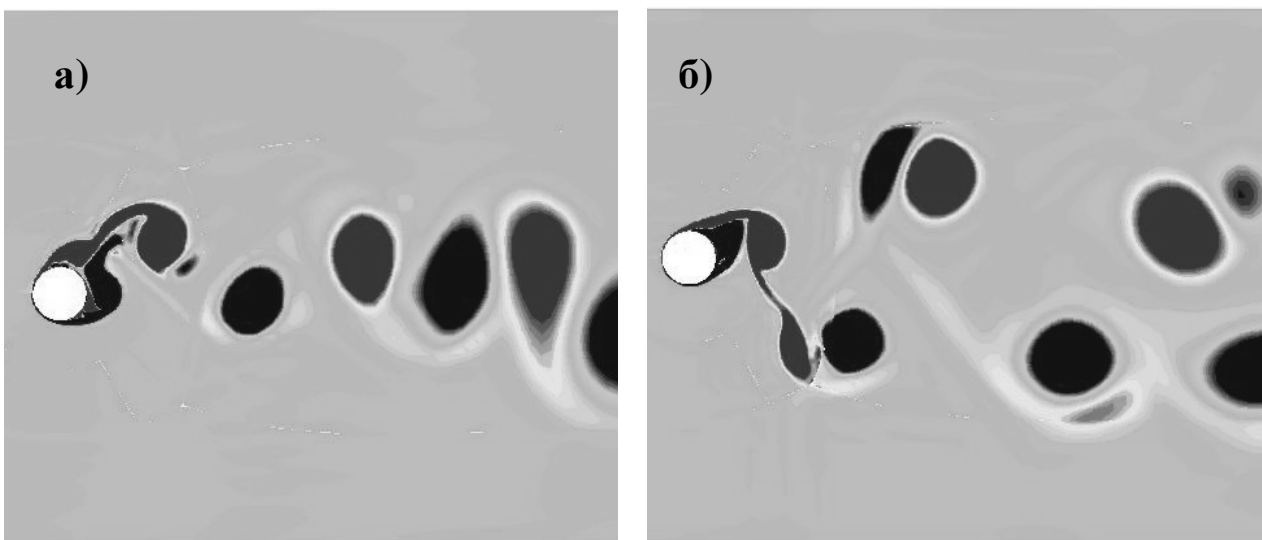


Рис. 5. Поля завихренности ω_z , соответствующие 2S (а) и 2P (б) режимам схода вихрей

Четвертая глава посвящена численному исследованию течения, генерируемого колебаниями упругой консольной пластины.

В разделе 4.1 дана постановка задачи, приводится динамическое уравнение колебаний пластины и определяющие параметры задачи. Описана численная схема интегрирования уравнения движения пластины и результаты ее тестирования. Приводятся данные по размерам расчётной области и параметрам сетки, используемой в гидродинамическом расчёте.

В разделе 4.2 приведены результаты моделирования течения генерируемого упругой пластиной. На рис.6 представлена трёхмерная структура полученного течения. Можно отметить, что «видимая» внешняя граница струи на рис.6а сильно неоднородна и состоит из крупномасштабных всплесков и провалов, расположение которых существенно несимметрично относительно оси струи. Можно отметить также довольно большой (около 45°) угол раскрытия струи. Из особенностей вихревой структуры струи (рис.6б) бросается в глаза хаотическое скопление вихрей различных масштабов, которые занимают почти сферический объём вблизи передней кромки пластины. Внутри этого вихревого облака идёт интенсивное перемешивание жидкости. При удалении от пластины интенсивность вихревых структур падает.

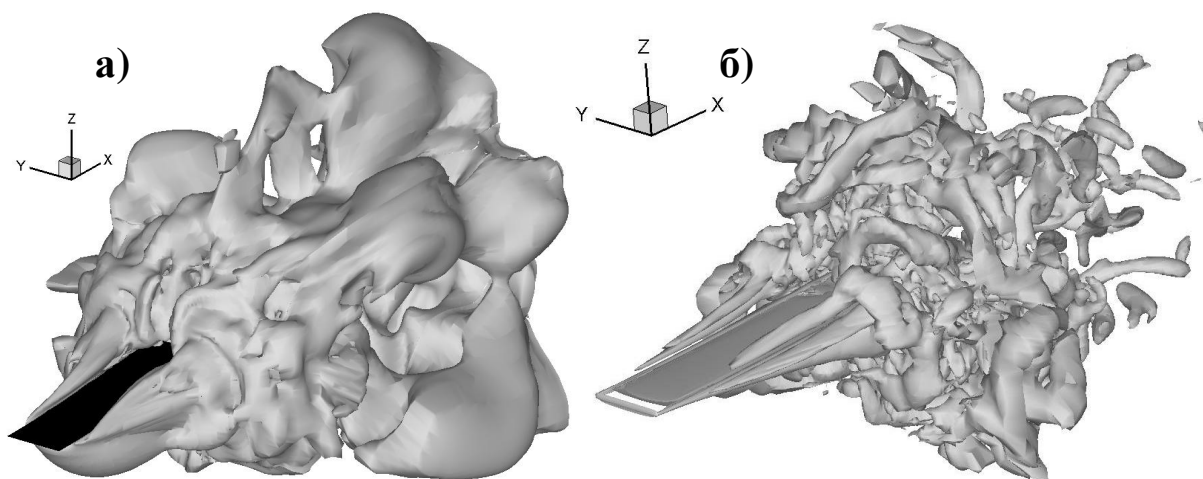


Рис. 6. Мгновенная изоповерхность продольной составляющей скорости (а) и Q-критерия (б) в струе

На рис.7 показано распределение осреднённой скорости в продольных сечениях струи. Видно, что вблизи передней кромки пластины расположена зона обратных токов, которая имеет сложную пространственную конфигурацию и, в частности, «охватывает» колеблющуюся пластину сверху и снизу (рис.7б). Как видно из рис.7а, скорость нарастает вдоль боковых кромок от заземлённого к свободному концу пластины, а затем полученные струи, огибая застойную зону перед передней кромкой

пластины, сливаются, и формируют общую струю. Сравнивая поле скоростей на рис.7а с вихревой структурой струи (рис.6б) можно заключить, что струя создается в основном линейными вихрями, срывающимися с боковых кромок пластины.

Также на рис.7 можно отметить, что скорости в струе сравнительно невелики и быстро убывают при удалении от пластины. В частности, на расстоянии $0.4L$ от передней кромки пластины скорость струи не превышает 20% от скорости кончика пластины.

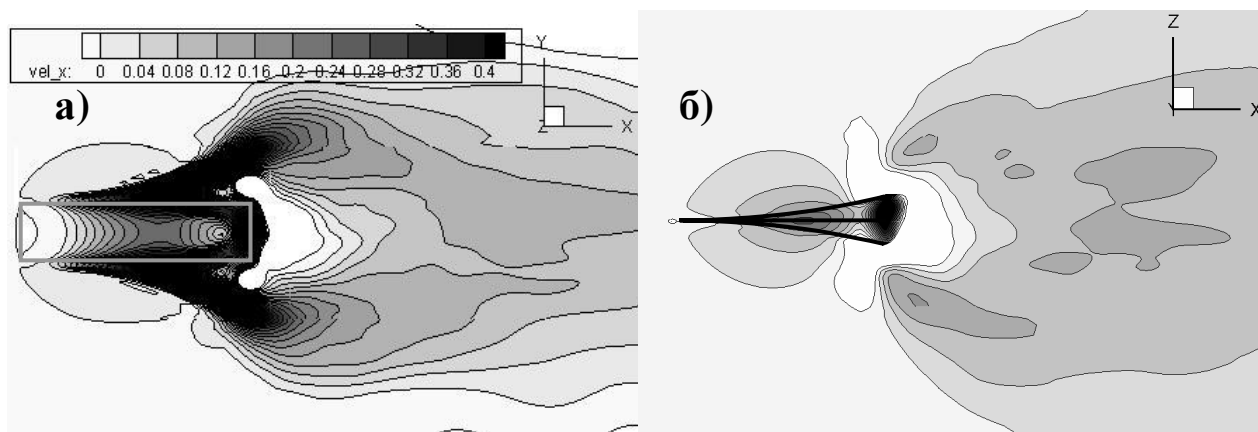


Рис. 7. Осреднённое поле продольной составляющей скорости в сечениях $z=0$ (а) и $y=0$ (б)

Помимо осреднённых полей скорости и давления в настоящей работе получена представительная выборка мгновенных полей, которые могут служить основой для будущего исследования пульсационных характеристик течения.

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

1. Базовый программный комплекс SINF доработан для моделирования течений жидкости на деформируемых сетках, что позволяет вести расчёты в областях с изменяющейся геометрией. Тестирование части программы, ответственной за расчёт на деформируемых сетках показало, что движение сетки не вносит существенных погрешностей в получаемое решение.
2. Разработан эффективный алгоритм деформации многоблочных структурированных сеток в соответствии с движением границ. Реализовано совместное интегрирование уравнения движения обтекаемого тела (цилиндра или упругой пластины) и уравнений гидродинамики.
3. Проведено систематическое исследование поперечных автоколебаний цилиндра на упругой подвеске в однородном ламинарном потоке. Продемонстрирован эффект захвата частоты. Обнаружен гистерезис амплитуды колебаний при изменении скорости потока. Результаты

настоящего расчёта соответствуют результатам аккуратно проведённых расчётов других авторов.

4. Впервые проведено подробное численное исследование поперечных автоколебаний цилиндра в турбулентном потоке в рамках двумерной (URANS) и трёхмерной (DES) формулировки. Получены амплитудные и частотные характеристики колебаний, а также осреднённые параметры силового воздействия на цилиндр в зависимости от приведённой скорости потока.
5. Результаты трёхмерного расчёта хорошо согласуются с экспериментальными данными как по амплитуде и частоте колебаний цилиндра, так и по уровню гидродинамической нагрузки; небольшое отличие наблюдается только в узкой области “upper” режима колебаний. Двумерный расчёт недооценивает амплитуду колебаний цилиндра и даёт более узкую область захвата частоты.
6. Исследована структура вихревого следа за осциллирующим цилиндром; определены режимы схода вихрей внутри области захвата частоты. Впервые обнаружен S+P режим схода вихрей вблизи правой границы области захвата частоты, а также чередование 2S и 2P режимов схода вихрей в области “upper” режима, сопровождаемое существенным изменением амплитуды и частоты колебаний цилиндра.
7. Впервые проведено численное моделирование течения, индуцируемого колебаниями упругой консольной пластины, в рамках трёхмерной (DES) формулировки с учетом обратного влияния жидкости на движение пластины. Получен эффект генерации струи; картина течения согласуется с данными наблюдений.
8. Проанализирована структура потока. Обнаружено, в частности, что вблизи передней кромки пластины имеется зона возвратных токов; угол раскрытия струи составляет около 45° . Показано, что струя генерируется в основном боковыми кромками пластины. Получены осреднённые поля скорости и давления, а также представительная выборка мгновенных полей, которые могут служить основой для будущего исследования пульсационных характеристик течения.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Щур Н.А. Применение метода деформируемых сеток для моделирования автоколебаний цилиндра в однородном потоке / Щур Н.А., Зайцев Д.К. // В кн.: Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках. Тр. XV школы-семинара под руководством акад. А.И. Леонтьева, Калуга, 23-27 мая 2005г. – М.: МЭИ, 2005, Т.1. – С. 125-129.

2. Зайцев Д.К. Применение деформируемых сеток для численного моделирования течений в областях с подвижными границами / Д.К. Зайцев, Н.А. Щур // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2006. – №5/1 (47). – С. 15-22. (перечень ВАК)

3. Зайцев Д.К. Численное моделирование автоколебаний цилиндра в турбулентном потоке/ Зайцев Д.К., Смирнов Е.М., Щур Н.А. // IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, Нижний Новгород, 22-28 августа 2006г. – Аннотации докладов, т.II, с.88. Ниж.Новгород: Изд. ННГУ, 2006. – С. 194.

4. Зайцев Д.К. Опыт параллелизации вычислений при расчете отрывных течений на основе трехмерных нестационарных формулировок/ Д.К. Зайцев, Е.М. Смирнов, П.Е. Смирнов, Н.А. Щур, С.А. Якубов. // Вычислительные методы и программирование. – 2007. – т.8. – С.95-102.

5. Щур Н.А. Численное моделирование турбулентных течений для свободных и вынужденных колебаний тел в потоках/ Н.А. Щур, Д.К. Зайцев // В кн.: Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках. Тр. XVI школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева, г. С.-Петербург, 21 – 25 мая 2007. – т.2, М.: Изд. МЭИ, 2007. – С.197-200.

6. Zaitsev D. K. Numerical simulation of 3D turbulent flows around bodies subjected to vortex-induced and forced vibration/ D. K. Zaitsev, N. A. Schur and E. M. Smirnov // Int. Conf on Parallel Computational Fluid Dynamics, May 21-24, 2007, Antalya, Turkey (Parallel CFD 2007). – CD-ROM Proceedings, ParCFD-2007-072. – 5 p.

Список литературы

1. *Anagnostopoulos, P., Bearman, P. W. (1992) Response characteristics of a vortex-excited cylinder at low Reynolds numbers // Journal of Fluids and Structures, 6, pp.39-50.*
2. *Govardhan, R. N. & Williamson, C. H. K. (2000) Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder // J. Fluid Mechanics 420, pp.85-130.*
3. *Khalak, A. & Williamson, C. H. K. (1999) Motions, forces and mode transitions in vortex-induced vibrations at low mass-damping // J. Fluids Struct. 13, pp.813-851.*