На правах рукописи

НИКОНОВ Валерий Владимирович

РАЗВИТИЕ ВИХРЕВЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ НЕСЖИМАЕМЫМИ НЕВЯЗКИМ И ВЯЗКИМ ПОТОКАМИ

Специальность:
01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара 2007

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева»

Научный руководитель:
кандидат технических наук, профессор **В.Г. Шахов**

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой высшей математики Военно-воздушной инженерной академии им. проф. Н.Е. Жуковского **Сетуха Алексей Викторович**

доктор технических наук, профессор кафедры математического моделирования в механике Самарского государственного университета **Клюев Николай Ильич**

Ведущая организация:

ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

Защита состоится 5 октября 2007 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.01 Самарского государственного аэрокосмического университета по адресу: 443086, Московское шоссе 34, корп. 3а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева

Автореферат разослан 23 августа 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета **Шахов В.Г.**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Течение за плохообтекаемыми телами за исключением очень малых скоростей практически всегда сопровождается отрывом потока. При рассмотрении задач о поперечном обтекании тел большого удлинения целесообразно от трехмерной постановки проблемы перейти к двумерной. Характер обтекания таких тел, особенно с гладким контуром, является очень сложным явлением. Например, обтекание кругового цилиндра с ростом числа Рейнольдса сопровождается кризисом сопротивления, обусловленного перестройкой и изменением ширины его аэродинамического следа. Данной проблеме посвящено много экспериментальных работ, в которых показано, что причина такого явления состоит в перемещении точек отрыва вниз по потоку при переходе пограничного слоя из ламинарной формы в турбулентную. С другой стороны, плохообтекаемые тела с угловыми точками на контуре практически не имеют кризиса сопротивления. Еще более сложные течения возникают при близком расположении друг к другу нескольких тел. Необходимость исследования таких явлений обусловлена наличием ряда практических приложений.

Первое связано с учетом ветровой нагрузки, действующей на элементы строительных и инженерных сооружений. При наличии у таких объектов острых кромок или углов набегающий поток может производить нестационарную знакопеременную нагрузку, амплитуда которой может в несколько раз превышать ее среднее значение, что может приводить к разрушению элементов и самой конструкции.

Второе приложение связано с определением боковой силы от оперения летательных аппаратов (ЛА), по которой судят об его эффективности. По результатам серии численных экспериментов о поперечном обтекании под различными углами атаки нескольких конфигураций оперения можно выбрать наиболее эффективное. При этом сокращаются затраты на этапе предварительного проектирования, а значит уменьшается стоимость изделия.

Первоначально в качестве метода исследования использовался метод дискретных вихрей (МДВ), в котором точки отрыва назначаются с привлечением внешних данных. Также применялся метод «вихрь в ячейке» (ВЯ), для которого был проведен раздельный и совместный расчет процессов диффузии и конвекции завихренности. В результате исследований выяснилось, что с помощью метода ВЯ не удается провести моделирование ламинарного пограничного слоя в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Автором предложен и разработан метод расщепления завихренности (МРЗ), который устраняет этот недостаток метода ВЯ.

Целью работы является развитие вихревых методов для расчета обтекания тел несжимаемыми невязким и вязким потоками.

Были сформулированы следующие задачи:

- разработка алгоритма поперечного обтекания одиночных и групп тел большого удлинения в рамках двумерного нестационарного метода МДВ;
- провести моделирование обтекания оперения летательного аппарата;

- разработка алгоритма поперечного обтекания одиночных тел большого удлинения в рамках двумерного нестационарного метода «вихрь в ячейке»;

- раздельное и совместное тестирование процессов диффузии и конвекции, а также граничных условий для завихренности;

- разработка метода расщепления завихренности.

Научная новизна работы заключается в следующем.

Для метода дискретных вихрей не следует задавать отрыв потока на входе в канал, при моделировании обтекания групп тел, образующих узкие сквозные каналы, что подтверждено сравнением с экспериментальными данными.

Сформулировано правило выбора шага по времени в схеме «донор-акцептор» (Д-А), применяемое для расчета диффузии, и определена константа для этого правила в методе «вихрь в ячейке» (ВЯ).

Предлагается новый метод прямого моделирования ламинарного пограничного слоя – метод расщепления завихренности (МРЗ). Для этого метода была разработана схема вычисления поля скорости, схема аппроксимации граничных условий и численная схема учета уравнения неразрывности в случае несжимаемой жидкости.

Практическая ценность. Модифицированный метод МДВ может быть использован при расчетах аэродинамической нагрузки, действующей на одиночные тела и группы тел большого удлинения в поперечном потоке (инженерные сооружения, оперение летательных аппаратов и т.д.). Программы расчета воздушных нагрузок на систему тел (два уголковых профиля) и оперения ЛА при произвольной их ориентации относительно скорости набегающего потока внедрены в ряде проектных организаций, что подтверждено соответствующими актами.

Правило для выбора шага по времени в методе «донор-акцептор» может применяться как для решения только диффузионных задач, так и для более сложных с участием других процессов.

Адаптированная схема интегрирования с разными шагами по времени может применяться для решения уравнений Навье-Стокса при любых числах Рейнольдса.

Разработанный метод расщепления завихренности может применяться при прямом численном моделировании ламинарных пограничных слоев в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

Достоверность и обоснованность результатов обусловлена строгой математической постановкой рассматриваемых задач, корректностью используемых методов. Математическое моделирование исследуемых физических процессов проведено в рамках известных теорий и моделей. Достоверность численных результатов подтверждается сравнением с результатами расчетов, аналитическими решениями и экспериментальными данными других авторов.

Публикации и апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международной молодежной конференции «XXV Гагаринские чтения» (Москва, 1999), на 2-ой Всероссийской научной конференции "Самолетостроение России: проблемы и перспективы", (Самара, 2000 г.), на 3-й Международной конференции молодых ученых и студентов "Актуальные проблемы современной науки", (Самара, 2002 г.), на 11-м Всероссийском семинаре по управлению движением и навигации летательных аппаратов, (Самара, 2003 г.), на 1-м Международном форуме "Актуальные проблемы современной науки", (Самара, 2005 г.), на семинаре по гидродинамике в НИИ Механики МГУ (Москва, 2006 г.), на 2-м Международном форуме "Актуальные проблемы современной науки", (Самара, 2006 г.). По теме диссертационной работы имеется 11 публикаций.

Структура и объем работы. Диссертация общим объемом 157 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложений; основная часть содержит 114 страниц текста, 58 рисунков, 15 таблиц, 146 наименований источников литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цели и задачи исследования, излагается краткое содержание диссертации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 диссертации на основе анализа литературных источников приводится обзор методов исследования отрывных и вязких течений, а также описание методов МДВ и ВЯ. Дается краткий обзор работ, посвященных применению аналитических методов в механике жидкости и газа, как точных, так и приближенных. В частности, рассматриваются такие решения, как поле скорости потенциального вихря и вихря Озеена, первая задача Стокса, задача о ламинарном пограничном слое на плоской пластине и о спутном течении за ней. Особенно отмечается роль решений, полученных аналитически, для верификации численных схем существующих и вновь разрабатываемых методов.

Описывается классификация методов решения задач механики жидкости: лагранжевые, эйлеровые и смешанные; бессеточные и сеточные; и т.п.

Особенное внимание уделяется нестационарному методу дискретных вихрей для двумерных задач аэродинамики, отмечаются его достоинства и недостатки.

Приводится классификация сеточных методов. Дается классификация численных методов по способу дискретизаци исходных уравнений Навье-Стокса. Рассматриваются методы: конечных разностей (МКР), конечных элементов, конечных объемов (МКО). В методах «частиц в ячейках» подходы, используемые в МКО, обобщаются на случай моделирования произвольной среды. Отмечается, что метод ВЯ, с одной стороны, относится к серии методов дробных шагов, а по пространственной дискретизации метод ВЯ относится к методам «частиц в ячейках». Отмечается, что решение численным сеточным методом зачастую зависит от используемой сетки.

В обзоре вихревых методов приводится краткая историческая справка о их развитии. Отмечается большой вклад отечественных исследователей С.М. Белоцерковского, М.И. Ништа, А.С. Гиневского в становление и развитие метода дискретных вихрей. Зарубежные исследования по вихревым методам наиболее полно представлены в обзоре вихревых методов Т. Сарпкайи, а также в более позднем Г.-Х. Коте и П. Комотсакоса. Также следует упомянуть А. Леонарда, являющегося одним из наиболее крупных авторитетов в этой области.

В частности, указывается, что большое идейное влияние на автора предлагаемой диссертации оказали работы по методу «вихрь в ячейке» Н.В. Корнева и А.Е. Таранова. Приводится классификация вихревых методов: по использованию моделей турбулентности, по способу моделирования процесса конвекции, по схемам расчета поля скорости течения, по способам моделирования вязкой диффузии в свободном потоке и по схемам учета граничных условий для завихренности.

Глава 2 посвящена модификации численной схемы метода дискретных вихрей и результатам моделирования течений за плохообтекаемыми телами. Приводится математическая постановка задачи моделирования течения за группой плохообтекаемых тел. В этом случае условие о постоянстве циркуляции на контуре тела и в его следе должно выполняться для каждого тела, входящего в группу. Описывается отличающийся от классического алгоритм процедуры объединения вихрей, позволяющий существенно экономить машинное время, приводится методика реализации условия непроникновения вихрей через контур обтекаемого тела, а также величина расстояния от поверхности тела, на котором располагаются попавшие внутрь тела свободные вихри, определенная путем серии численных экспериментов.

Далее представляются результаты численного моделирования МДВ обтекания пары профилей уголкового сечения (рис. 1, таблица 1) в сравнении с экспериментальными данными. Получены картины вихревого следа и коэффициенты аэродинамических сил при различных углах набегающего потока. Для обеспечения хорошего соответствия численных результатов экспериментальным данным необходимо не задавать отрыв потока на входе в узкий канал, образованный уголками (таблица 1).

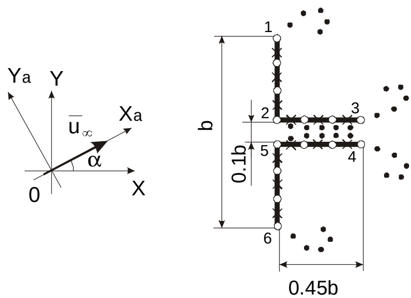


Рис. 1. Расчетная схема обтекания пары уголков:
о – присоединенный, • – свободный дискретный вихрь;
× – контрольная точка; 1…6 – номера точек отрыва

Таблица 1

Сравнение данных, полученных в расчете,
с экспериментом для некоторых углов атаки

Угол атаки, град.	$C_{xaэ}$	$C_{yaэ}$	C_{xa}	C_{ya}	C_{xa1}	C_{ya1}	Номера исключенных точек отрыва (только для C_{xa1}, C_{ya1})
0	1,60	0,00	1,56	0,11	1,67	0,03	2, 5
45	0,99	-1,13	1,20	-1,08	1,09	-0,93	2, 5
90	0,70	0,95	0,76	1,16	0,78	1,19	2, 5
135	1,10	-0,39	1,69	0,04	1,25	-0,39	4
180	1,50	0,00	1,87	-0,01	1,63	0,00	4, 3

Для расчета обтекания одного из возможных вариантов оперения ЛА, представляющего собой группу дужек в поперечном сечении (рис. 2), приводятся геометрическая постановка задачи, содержащая схему дискретизации, результаты расчетов обтекания оперения ЛА: картины вихревых пелен и коэффициенты аэродинамических сил, полученные в скоростной (рис. 3) и связанной с телом системах координат.

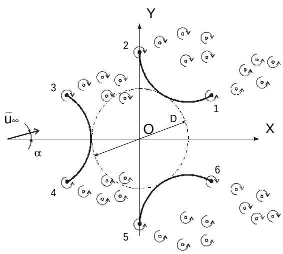


Рис. 2. Расчетная схема семейства дужек

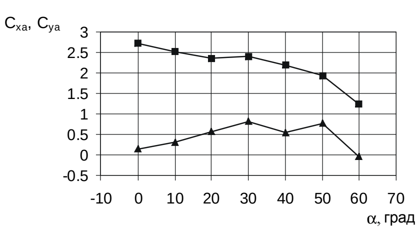


Рис. 3. Зависимость коэффициентов аэродинамических сил
от угла атаки набегающего потока в скоростной системе координат

В главе 3 рассматривается применение метода «вихрь в ячейке» для моделирования течений вязкой несжимаемой жидкости. Дается краткое описание метода, приводятся основные уравнения математической модели метода ВЯ, схема расщепления уравнения Навье-Стокса для завихренности и дается подробное описание дискретной численной схемы метода ВЯ (алгоритм метода, определение вихревой интенсивности на поверхности тела, расчет диффузии завихренности в свободном потоке и с поверхности обтекаемого тела, определение поля скорости и моделирование процесса конвекции жидких частиц, расчет аэрогидродинамических нагрузок).

Представлены результаты моделирования течения за круговым цилиндром методом «вихрь в ячейке» при числе Рейнольдса Re = 9500. Расчет проводился на однородных сетках с различными размерами ячейки. Приводятся картины полей завихренности и коэффициент сопротивления цилиндра C_x в сравнении с результатами других авторов и экспериментальными данными. Лучшее соответствие экспериментальным данным по C_x наблюдается на сетке с более крупным шагом. При уменьшении шага сетки точность решения ухудшается. Для определения причин такого влияния размера сетки рассчитывались раздельно и совместно процессы диффузии и конвекции завихренности. Исследуется вопрос о соотношении между пространственным и временным разрешением при моделировании задачи диффузии завихренности в свободном потоке. Анализируется поведение интегралов функции распределения Гаусса, которые используются в методе «донор-акцептор» для расчета обмена завихренностью. Показывается, что при выборе шага по времени с помощью предлагаемого соотношения

$$_{\Delta}t = k_d\, h^2 / \nu$$

интегралы будут зависеть только от константы k_d. Здесь h – шаг сетки, ν - коэффициент кинематической вязкости.

Проводится численное моделирование диффузии вихря Озеена, которое имеет точное аналитическое решение. После серии экспериментов для различных значений k_d для двух значений коэффициента кинематической вязкости и для двух размеров сетки были получены величины коэффициентов $k_d^{опт}$ (таблица 2), которые обеспечивают наименьшую погрешность решения и зависят только от размеров «диффузионной молекулы» n_d.

Таблица 2

Оптимальная величина параметра пространственно-временного разрешения в зависимости от размера диффузионной молекулы

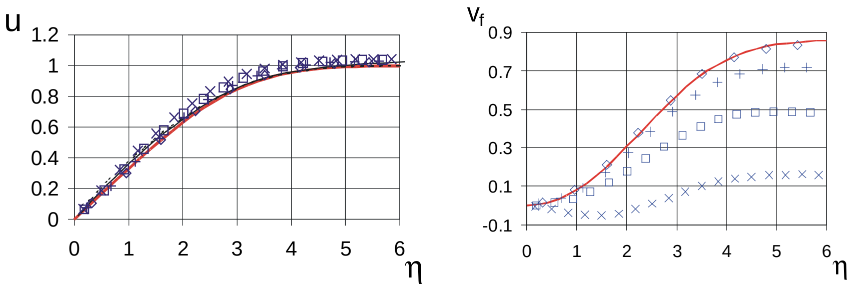
n_d	$k_d^{опт}$	$_{\Delta}t$, $h = 0.01$, ν=1.0 $^{-3}$
1	0.20 … 0.21	0.020 … 0.021
2	0.4 … 0.5	0.04 … 0.05
3	0.7 … 0.8	0.07 … 0.08
4	1.1 … 1.2	0.11 … 0.12

На примере перемещения экспоненциального вихря под действием набегающего потока производится тестирование процесса конвекции завихренности. Исследуется движение вихрей трех разных интенсивностей на сетках с двумя размерами ячейки. Отмечается, что ошибка этапа конвекции складывается из двух частей: ошибки метода численного интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) движения вихрей и ошибки от перераспределения их интенсивностей в ячейки сетки. Показано, что уменьшение шага по времени дальше некоторой величины не целесообразно из-за роста ошибки этапа конвекции, который связан с ростом числа операций перераспределения, хотя ошибка интегрирования ОДУ уменьшается. Кроме того оказывается, что шаг по времени для процесса диффузии $_{\Delta}t_d$ может на несколько порядков превышать шаг для процесса конвекции $_{\Delta}t_c$.

Излагается применение метода Пуанкаре к моделированию процесса диффузии, дается математическое обоснование включения метода Пуанкаре в численную схему Д-А, используемую для расчета процесса диффузии. Заново переформулируются: условия выбора шага по времени для расчета процесса диффузии и схема метода Д-А, в которой появляется малый параметр. Модифицированная схема Д-А получила условное название «донор-акцептор с малым параметром» (Д-АМП) и она позволяет применять шаги по времени на один или несколько порядков меньшие, чем в обычной схеме Д-А. Проводится численное моделирование диффузии двумерного вихря Озеена. Анализируя полученные данные, делается вывод, что метод Д-АМП позволяет получать результаты с точностью достаточной для инженерных целей в широком диапазоне изменения шага по времени. Метод Д-А дает аналогичные результаты только для одного значения шага по времени, который назван «оптимальным».

Проводится совместное тестирование процессов диффузии и конвекции на примере задачи о перемещении под воздействием набегающего потока вихря Озеена для различных коэффициентов кинематической вязкости. Наряду с методом Д-АМП применяется метод интегрирования с разными шагами по времени (ИРШ) для процессов конвекции и диффузии. Сравнение численного и аналитического решений показало, что при стремлении шага по времени к нулю в методе «вихрь в ячейке» со схемой Д-А вязкая диффузия отсутствует, в то время как при применении Д-АМП или ИРШ решение стремится к точному. Численная схема метода Д-А накладывает жесткие ограничения на расчетную сетку, которые сложно выполнить при малых ν.

На примере задачи Блазиуса производится совместная верификация моделирования процессов диффузии и конвекции, а также аппроксимации граничных условий для завихренности. Приводится математическая постановка задачи о продольном обтекании плоской пластины конечной длины в методе «вихрь в ячейке», сравниваются полученные результаты численного моделирования с решением задачи Блазиуса и результатами численного моделирования других авторов. Результаты расчета для числа Рейнольдса $Re = 10^3$ показывают, что наблюдается неплохое соответствие с решением Блазиуса в окрестности поверхности пластины для продольной компоненты скорости, хотя в верхней части пограничного слоя наблюдается больший «разгон» потока (рис. 4а). Такое же поведение решения наблюдается и в работе Wu. Профиль скорости, полученный Ota, имеет хорошее согласование с решением Блазиуса в верхней части пограничного слоя, но имеет заметное отклонение около поверхности пластины. При Re = 10 ^{3} результаты для схем Д-А и ИРШ совпадают, а для случая схемы Д-АМП наблюдается большее расхождение с решением Блазиуса для профиля продольной скорости. Профиль вертикальной скорости, полученный в настоящей работе, хорошо согласуется с результатами решения Блазиуса только для первого сечения вверх по потоку (рис. 4б). Для последнего сечения наблюдается область с отрицательной поперечной скоростью, что качественно отличается от решения Блазиуса. Отмечается, что в работах других авторов профиль вертикальной компоненты скорости не приводится. Для чисел Рейнольдса Re = 10 ^{2} и 10 ^{4} согласование с решением Блазиуса сильно ухудшается. Измельчение расчетной сетки к положительному результату не приводит. В работах других авторов результаты численного моделирования для этих чисел Рейнольса не приводятся.



а) б)

Рис. 4 Профиль продольной и вертикальной скоростей на плоской пластине

(Re = 10 ^{3}, $_\Delta t_c = {}_\Delta t_d = 0.021$, t = 16.8, h = 0.01, Д-А);

— - профиль Блазиуса, — - Wu ($x_п = 0.5$),

...... - Ota ($x_п = 0.9$), настоящая работа:

◇ - $x_п = 0.25$, + - $x_п = 0.5$, □ - $x_п = 0.75$, × - $x_п = 0.9$.

<u>Глава 4</u> посвящена разработке схемы расщепления завихренности для метода «вихрь в ячейке», описывается численная схема метода. Основная идея МРЗ состоит в раздельном рассмотрении членов, входящих в определение завихренности,

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}.$$

Приводится численная схема расчета скорости при использовании МРЗ. Для определения скорости данный метод использует схему интегрирования вдоль координатных линий, при этом двумерная задача сводится к нескольким одномерным. Схема расчета процесса диффузии в методе расщепления завихренности получается из метода Д-А, используемого отдельно для величин

Δ_{vx} и Δ_{uy}, где

$$\Delta_{uy}(x_i, y_j) = \int\limits_{x_i - h/2}^{x_i + h/2} \int\limits_{y_j - h/2}^{y_j + h/2} \frac{\partial u(x,y)}{\partial y} dx\, dy\,,$$

$$\Delta_{vx}(x_i, y_j) = \int\limits_{x_i - h/2}^{x_i + h/2} \int\limits_{y_j - h/2}^{y_j + h/2} \frac{\partial v(x,y)}{\partial x} dx\, dy\,.$$

Компоненты скорости между ячейками могут быть найдены следующим образом:

$$u\left(i, j+0.5\right) = u(i, j-0.5) + \Delta_{uy}(i, j) / h_x\,,$$
$$v(i+0.5, j) = v(i-0.5, j) + \Delta_{vx}(i, j) / h_y\,.$$

Диффузия в свободном потоке для схемы МРЗ рассчитывается с использованием метода Д-А аналогично ВЯ, однако диффузия для величин Δ_{vx} и Δ_{uy} рассматривается отдельно.

Диффузия с поверхности обтекаемого тела определяется следующим образом:

$$\Delta_{uy}(x_i, y_j) = u(y_i, +0) h_s \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y_j + h/2}{\sqrt{4\nu_\Delta t}} \right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y_j - h/2}{\sqrt{4\nu_\Delta t}} \right) \right],$$
$$\Delta_{vx}(x_i, y_j) = 0\,.$$

Описывается моделирование процесса конвекции для МРЗ. В отличие от метода ВЯ частицы переносят вместо циркуляции две компоненты, ее составляющие Δ_{vx} и Δ_{uy}.

Предлагается вертикальную компоненту скорости находить из уравнения неразрывности для несжимаемого течения. Тогда для ячеек, расположенных над пластиной, вертикальная компонента скорости определяется как

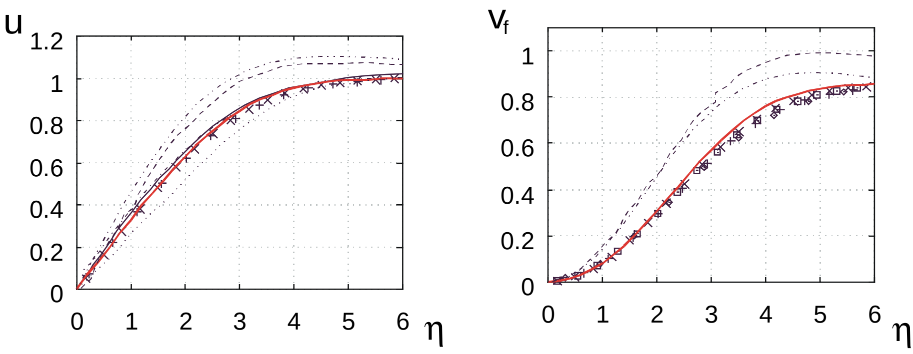
$$v_{i,j} = v_{i,j-1} - 0.5 h_y \left(\left\langle \frac{\partial u}{\partial x} \right\rangle_{i,j} + \left\langle \frac{\partial u}{\partial x} \right\rangle_{i,j-1} \right),$$

где для аппроксимации производных в правой части использовалась центральная конечно-разностная схема.

Формулируются основные этапы алгоритма метода МРЗ.

На примере задачи о бесконечной плоской пластине, внезапно приведенной в движение из состояния покоя (первая задача Стокса), проводится верификация численных схем методов ВЯ и МРЗ. Данное исследование позволяет протестировать совместно части алгоритмов методов ВЯ и МРЗ, отвечающих за диффузию скорости в свободном потоке и с поверхности тела. Описывается математическая постановка модельной задачи и дается ее аналитическое решение, рассматриваются особенности численного моделирования с помощью различных схем вычисления скорости в методах ВЯ и МРЗ. Приводятся результаты численного моделирования первой задачи Стокса с помощью упомянутых выше схем в сравнении с аналитическим решением. Расчеты проводились для двух размеров ячейки сетки. Результаты представлены для нескольких моментов времени. Сделаны выводы о точности и трудоемкости использованных численных схем. Далее даются математические и геометрические обоснования причины, по которой происходит искажение поля скорости сдвигового течения в вихревых методах.

Затем рассматривается моделирование продольного обтекания плоской пластины конечной длины. Проводится выбор параметров численного моделирования (размера ячейки сетки, шагов по времени для процессов диффузии и конвекции), приводятся результаты численного моделирования задачи Блазиуса с помощью схемы МРЗ в диапазоне чисел Рейнольдса от 10 до 10^6. Некоторые результаты этих расчетов приводятся на рис. 5.



а) б)

Рис. 5 Профили продольной и вертикальной скоростей ламинарного пограничного слоя в сравнении с результатами других авторов (Re = 10^3, $_\Delta t_c = {_\Delta t_d} = 0.021$, t = 16.8, h = 0.01, Д-А);

— - профиль Блазиуса, —— - Wu (x = 0.5), . _ . _ . - Ota (x = 0.9),

.... - Nakamura (x = 0.5), _ _ _ _ - Ansys 8.0, . . _ . . _ - Star CD,

настоящая работа: ◇ - x = 0.25, + - x = 0.5, □ - x = 0.75, × - x = 0.9.

Проводится сравнение полученных с помощью МРЗ профилей продольной компоненты скорости в спутном течении позади плоской пластины конечной длины для четырех сечений с точным решением Гольдштейна.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Для метода дискретных вихрей показано, что при исключении задания отрыва потока на входе в узкие сквозные каналы происходит снижение максимальной относительной ошибки решения по коэффициентам аэродинамических сил в четыре раза.

2. Получены коэффициенты подъемной силы и сопротивления для оперения нетрадиционной формы летательного аппарата в зависимости от угла атаки.

3. Предложено правило для выбора шага по времени в схеме «донор-акцептор», применяемой для расчета диффузии, и определена константа для этого правила ($k_d^{опт} = 0.21$ для $n_d = 1$).

4. Адаптирована схема интегрирования с разными шагами по времени, известная в теоретической механике, для моделирования процессов диффузии и конвекции.

5. Результаты верификации схем Д-АМП и ИРШ на примере задачи о конвекции – диффузии вихря Озеена показали точность достаточную для инженерных целей.

6. Результаты прямого численного моделирования методом ВЯ ламинарного пограничного слоя (в нестационарной постановке задачи) показали точность достаточную для инженерных целей только для продольного профиля скорости и только при числе Рейнольдса 10^3.

7. Разработан метод расщепления завихренности для прямого численного моделирования ламинарного пограничного слоя.

8. Проведено сравнение полей скорости для течения чистого сдвига, вычисленных методами ВЯ и МРЗ, для диапазона изменения безразмерного коэффициента кинематической вязкости $0.1 \leq \nu \leq 10^{-8}$ ($\nu = 1/Re$). Обоснована причина, по которой с использованием метода ВЯ не удается получить удовлетворительные результаты для данной задачи.

9. Получена точность, достаточная для инженерных целей при сравнении с решением Блазиуса результатов прямого численного моделирования пограничного слоя на плоской пластине методом МРЗ в диапазоне чисел Рейнольдса $10 \leq Re \leq 10^6$ с применением схемы ИРШ.

10. Полученные результаты моделирования пограничного слоя методом МРЗ подтвердили методические рекомендации, что размер ячейки сетки должен быть обратно пропорционален корню квадратному из числа Рейнольдса, шаг по времени для процесса диффузии определяется по правилу предложенному в данной работе и шаг по времени для процесса конвекции находится из условия аналогичного условию Куранта.

11. Результаты расчетов профилей продольной скорости в аэродинамическом следе плоской пластины с помощью схемы МРЗ в диапазоне чисел Рейнольдса $10 \leq Re \leq 10^6$ в сравнении с решением Гольдштейна имеют точность достаточную для инженерных целей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Никонов, В.В. Моделирование отрывного обтекания цилиндра методом дискретных вихрей [Текст] / В.В. Никонов // Сборник тезисов международной научной конференции студентов и аспирантов «Современные аспекты гидроаэродинамики – 98».- СПМТУ, С.-Пб.- 1998.- с. 8.
2. Никонов, В.В. Исследование двумерных отрывных течений методом дискретных вихрей [Текст] / В.В. Никонов // Тезисы докладов международной молодежной конференции «XXV Гагаринские чтения».- М., Изд. «ЛАТМЕС».- 1999.- т. 1.
3. Никонов, В.В. Разработка модели отрывного обтекания группы цилиндрических тел [Текст] / В.В. Никонов, В.Г. Шахов // Тезисы докладов научной конференции «Самолетостроение России: проблемы и перспективы – 2 конф.».- СГАУ, Самара.- 2000.
4. Никонов, В.В. Исследование моделирования двумерного вихревого нестационарного течения в многосвязной области [Текст] / В.В. Никонов, В.Г. Шахов // ИВУЗ «Авиационная техника».- Казань.- ISSN 0579-2975.- 2002, №1, с. 24-26.
5. Никонов, В.В. Об использовании асимптотического ряда для моделирования процесса диффузии завихренности [Текст] / В.В. Никонов // Сборник трудов 3й международной конференции молодых учёных и студентов «Актуальные проблемы современной науки». Естественные науки. – ч. 1-2. - Самара. - 2002. с. 59-60.
6. Nikonov, V. The Ratio between Spatial and Time Resolutions for the Diffusion Substep in 2D Computational Vortex Methods [Text] / V. Nikonov, N. Kornev, A. Leder // Schiffbauforschung.- 2002.- vol. 41.- N 3/4.- pp. 5-12.
7. Никонов, В.В. Модификация схемы «донор-акцептор» для расчета диффузии завихренности и ее применение в методе «вихрь в ячейке» [Текст] / В.В. Никонов, В.Г. Шахов // Вестник СГАУ, Самара.- 2003.- N 1 (3).- с. 38-46.
8. Никонов, В.В. О применении различных методов интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений в методе «вихрь в ячейке» [Текст] / В.В. Никонов, В.Г. Шахов // Сборник трудов 11-го Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов.- СГАУ, Самара.- 2003.- с. 268-271.
9. Никонов, В.В. Об использовании схемы интегрирования с разными шагами по времени в методе «вихрь в ячейке» [Текст] / В.В. Никонов // Сборник трудов 1-го Международного форума "Актуальные проблемы современной науки".- Самара.- 2005.- с. 64-65.
10. Никонов, В.В. Схема расчета скорости для метода «вихрь в ячейке» применительно к моделированию двумерного ламинарного пограничного слоя [Текст] / В.В. Никонов, В.Г. Шахов // Известия СНЦ РАН.- Самара.- т.7.- № 2.- 2005.- с. 392 - 398.
11. Никонов, В.В. Нестационарные граничные условия для метода расщепления завихренности [Текст] / В.В. Никонов // Сборник трудов 2-го Международного форума "Актуальные проблемы современной науки".- ч. 1 - 3.- Самара.- 2006.- с. 194-197.