

На правах рукописи

Григоренко Дмитрий Алексеевич

**Комплекс программ для реализации  
семейства вихревых методов и его  
применение**

Специальность 05.13.18 — математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2008

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научные руководители: доктор физико-математических наук,  
профессор  
*Васенин Валерий Александрович*  
кандидат физико-математических наук,  
с.н.с.  
*Гувернюк Сергей Владимирович*

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
доцент,  
*Сетуша Алексей Викторович*  
кандидат физико-математических наук,  
доцент,  
*Щеглов Георгий Александрович*

Ведущая организация: Институт математического моделирова-  
ния РАН

Защита диссертации состоится 4 июля 2008 года в 17 часов на засе-  
дании диссертационного совета Д 501.002.09 в Научно-исследовательском  
вычислительном центре Московского государственного университета име-  
ни М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, дом 1,  
стр. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИВЦ МГУ.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2008 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
канд. физ.-мат. наук

В. В. Суворов

## Общая характеристика работы

Объект исследования и актуальность темы. Вихревые методы математического моделирования процессов аэрогидромеханики — одно из бурно развивающихся в последние десятилетия направлений. Идея этих методов базируется на фундаментальном свойстве завихренности: её независимости от таких динамических параметров, как давление. В моделях идеальной среды уравнения эволюции завихренности описывают условие сохранения циркуляции скорости на замкнутых жидких контурах (теоремы Гельмгольца). Указанное свойство легло в основу большого количества так называемых вихревых методов, которые позволяют удобно сформулировать задачу расчёта гидродинамических характеристик в лагранжевых координатах. Вихревые методы актуальны в ряде фундаментальных и прикладных направлений механики: аэрогидродинамика авторотации тел, машущего полёта, динамика парашюта, запылённые среды.

Среди вихревых методов можно выделить метод вязких вихревых доменов (метод ВВД; Г.Я. Дынникова, С.В. Гувернюк, П.Р. Андронов). Этот метод основывается непосредственно на уравнениях Навье-Стокса и позволяет корректно учитывать вязкость, сохраняя все преимущества вихревого подхода для решения плоских задач. По сравнению с наиболее близким к нему методом диффузионной скорости метод ВВД предлагает более удачный способ вычисления диффузионной скорости, который позволяет более точно описывать взаимодействие вихрей, предотвращая их чрезмерное слипание и поддерживая взаимное влияние дальних вихрей, а также предоставляет возможность обоснованно вычислять диффузионную скорость вихревых доменов, находящихся вблизи поверхности. Последнее обстоятельство, в свою очередь, позволяет рассчитывать силу трения, действующую на обтекаемые тела. Важным преимуществом используемой в методе модели является отсутствие неопределённых параметров.

Препятствием для широкого распространения метода является отсут-

ствие реализующего его программного пакета. Такой программный пакет должен преследовать две актуальные цели. Во-первых, он должен обеспечить возможность анализа самой методологии на основе ВВД, став инструментарием для исследования вихревого подхода. Во-вторых, он должен предусматривать возможность проведения расчётов широкого класса задач, позволяя, тем самым, применять метод ВВД на практике. Большинство программных реализаций созданы непосредственно «предметниками» — специалистами по вихревым методам — и предназначены для решения определённых, «фиксированных», задач аэрогидродинамики. Такие реализации направлены на удовлетворение узких функциональных требований и во многом упускают из рассмотрения другие, не менее важные требования.

В настоящее время программные средства должного уровня, реализующие метод ВВД, отсутствуют. В связи с изложенными выше обстоятельствами, объектом исследования являются вычислительные вихревые методы и математические модели взаимодействия тел со средой. Предметом исследования — вопросы их программной реализации. Целью диссертационной работы является эффективное отображение задач и методов аэрогидродинамики на современную вычислительную архитектуру. В соответствии с целью на пути её достижения были поставлены следующие конкретные задачи:

- составление обобщённого алгоритма решения сопряжённой задачи аэрогидродинамики и динамики твёрдых тел;
- формулировка требований к реализации программного комплекса;
- разработка программной архитектуры;
- разработка программного комплекса, реализующего метод ВВД;
- тестирование комплекса и проведение исследовательских расчётов.

#### Научная новизна:

- составлен обобщённый алгоритм, объединяющий метод дискретных вихрей (для идеальной среды), включая его модификацию с крат-

ными цепочками вихрей (Х. Исванд и др.), и метод вязких вихревых доменов (для вязкой среды);

- на примере разработанного программного комплекса показана применимость средства автоматизированного динамического распараллеливания на основе Т-подхода (А.Н. Водомеров и др.) к задачам, представляющим практический интерес; проведено сравнение с решением на основе библиотеки параллельного программирования MPI;
- получены новые численные решения задач нестационарного взаимодействия твёрдых тел со средой, в том числе сопряжённых задач динамики и аэрогидродинамики: моделирование отбора мощности оперённых цилиндров, сравнение скоростей вращения пластины и ротора Савониуса, моделирование вращения гладких эллиптических цилиндров, сравнение трёхлопастной вертушки и тандема из пары вертушек.

#### Научная и практическая значимость:

- обобщённый алгоритм может быть использован как основа для разработки более совершенных реализаций метода ВВД;
- реализованный программный комплекс позволяет решать сопряжённые задачи динамики и аэрогидродинамики; комплекс применим в научных и инженерных расчётах, в частности, для исследования ветроустановок роторного типа;
- программный комплекс используется в качестве тестовой задачи для демонстрации возможностей системы автоматизированного распараллеливания программ;
- полученные с помощью программного комплекса результаты расчётов могут быть использованы в инженерных целях, а также для сравнения с другими методами.

#### На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Составлен алгоритм решения широкого класса связанных задач динамики твёрдых тел и аэрогидродинамики. Алгоритм обобщает метод вязких вихревых доменов, метод дискретных вихрей и метод кратных вихревых цепочек.
2. На основе алгоритма разработан программный комплекс, удовлетворяющий соответствующим требованиям по эффективности, модифицируемости и способности к взаимодействию.
3. На примере вычислительного ядра комплекса проведено сравнение библиотеки MPI и системы автоматизированного параллельного программирования T-системы (версия NewTS). Показана применимость T-системы к представляющим практический интерес задачам.
4. Получены численные результаты по моделированию обтекания оперённых цилиндров (вертушек) и их тандемов, гладких эллиптических цилиндров, ротора Савониуса и пластины конечной толщины.

Личный вклад соискателя. Основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Работы [2–8] опубликованы без соавторов. Формулировка сопряжённой задачи динамики и аэрогидродинамики, а также составление алгоритма выполнены совместно с авторами метода вязких вихревых доменов. Разработка архитектуры и программной реализации программного комплекса, а также описанные серии расчётов по моделированию сопряжённых задач выполнены соискателем самостоятельно.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Четвёртая Международная школа-семинар «Модели и методы аэродинамики», МЦНМО, Москва, 2004;
- Научная конференция «Ломоносовские чтения», секция механики, 19–28 апреля 2004 года, Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова;

- Конференция-конкурс молодых учёных, 12 октября – 14 октября 2004 года, Москва, НИИ механики МГУ;
- Научная конференция «Ломоносовские чтения», секция механики, 2005 год, Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова;
- XIII Школа-семинар «Современные проблемы аэрогидродинамики» под руководством академика РАН Г.Г. Чёрного, 5–15 сентября 2005 года, Сочи, «Буревестник», МГУ им. М.В. Ломоносова;
- Конференция-конкурс молодых учёных, 12 – 17 октября 2005 года, Москва, НИИ механики МГУ;
- XVII Международная Интернет-конференция молодых учёных и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС-2005), 2005 год, Москва, ИМАШ РАН;
- Международная конференция «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность», 2006 год, Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова;
- Научная конференция «Ломоносовские чтения», секция механики, 12–28 апреля 2006 года, Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова;
- IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, 22–28 августа 2006 года, Нижний Новгород, Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского;
- XIV Школа-семинар «Современные проблемы аэрогидродинамики» под руководством академика РАН Г.Г. Чёрного, 6–16 сентября 2006 года, Сочи, «Буревестник», МГУ им. М.В. Ломоносова;
- Конференция-конкурс молодых учёных, 1 – 18 октября 2006 года, Москва, НИИ механики МГУ;
- XVIII Международная Интернет-конференция молодых учёных и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС-2006), 27–29 декабря 2006 года, Москва, ИМАШ РАН;
- XVIII Школа-семинар «Аэродинамика летательных аппаратов», 2007 год, пос. Володарка, ЦАГИ;

- XV Международная конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМ-СППС'2007), 25–31 мая 2007 года, г. Алушта, Крым;
- Конференция-конкурс молодых учёных, 10 – 16 октября 2007 года, Москва, НИИ механики МГУ.

Кроме того, результаты докладывались и обсуждались в МГУ имени М.В. Ломоносова на семинаре «Проблемы современных информационно-вычислительных систем» под руководством д.ф.-м.н., проф. В. А. Васенина и на семинаре кафедры газовой и волновой динамики под руководством академика РАН Е. И. Шемякина. Работа докладывалась на семинаре Института математического моделирования РАН.

Программный комплекс официально зарегистрирован под названием «Ротор» («Vortex») в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007612503).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 статей, 3 отчёта по научно-исследовательской работе НИИ механики МГУ. Основные результаты содержатся в работах [1, 3, 5, 7–9, 12].

Структура работы. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и четырёх приложений. Общий объем диссертации — 135 страниц (вместе с приложениями — 150 страниц). Список литературы включает 91 наименование.

## Краткое содержание работы

Во **введении** описываются цели работы, обосновывается её актуальность и практическая значимость, перечисляются основные результаты.

**Первая глава** является вводной, в ней формулируется рассматриваемая постановка связанной задачи динамики тел и аэрогидродинамики,



кратко описываются вихревые методы её решения, приводятся требования к программной реализации.

Рассматриваемые характерные скорости малы по сравнению со скоростью звука, тепловые эффекты незначительны, влияние силы тяжести на сжимаемость также пренебрежимо мало. В данных предположениях в качестве модели для тел выбрана классическая модель недеформируемого твёрдого тела. Среда считается вязкой Ньютоновской (или, в частном случае, идеальной) жидкостью постоянной плотности.

Задача механики ставится в безразмерном виде. Движение считается плоскопараллельным, для двумерных векторов подразумевается нулевая аппликата. Ортогональные к плоскости движения векторы отождествляются со своими аппликатами. В этом смысле векторное произведение двумерных векторов есть скаляр. Введём характерную постоянную плотность среды  $\rho$ . Характерная скорость тела  $u$  при переходе в сопутствующую систему координат соответствует скорости  $u$  потока на бесконечности. Характерное расстояние  $d$  будет соответствовать половине диаметра тела, если не сказано иное. При таком обезразмеривании число Рейнольдса выражается формулой:  $Re = \frac{ud}{\nu}$ , где  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости.

Эволюция среды описывается двумерными уравнениями Навье-Стокса и неразрывности (в предположении об отсутствии внешних сил):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} - \vec{V} \times \vec{\Omega} &= -\nabla \left( p + \frac{V^2}{2} \right) + \frac{\Delta \vec{V}}{Re}; \\ \nabla \cdot \vec{V} &= 0; \quad \vec{\Omega} = \nabla \times \vec{V}. \end{aligned}$$

Здесь  $\vec{V}$  — скорость потока;  $t$  — время;  $\vec{\Omega}$  — завихренность поля скоростей;  $p$  — давление;  $\nabla$  — оператор Гамильтона. Уравнение Навье-Стокса переписывается в виде:

$$\frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} = \nabla \times \left( (\vec{V} + \vec{V}_d) \times \vec{\Omega} \right); \quad \vec{V}_d = -\frac{1}{Re} \frac{\nabla \Omega}{\Omega}.$$

Величина  $\vec{V}_d$  называется **диффузионной скоростью** (Y. Ogami, T. Akamatsu).

В средѹ погружены недеформируемые тѳвѳдые тела. Движение каждого тела описывается движением некоторой его точки  $\vec{R}_r$  и вращением вокруг этой точки. Каждое тело может иметь произвольное число степеней свободы (двигаться по заданным законам, иметь вращательную степень свободы либо двигаться свободно). Если соответствующие законы движения не заданы, имеют место уравнения динамики:

$$\begin{aligned} I\dot{\omega} + m \left( \vec{R}_m - \vec{R}_r \right) \times \frac{d\vec{V}_r}{dt} &= M_{\text{ext}} + M_{\text{aer}} - f\omega; \\ m \frac{d\vec{V}_r}{dt} &= \vec{F}_{\text{ext}} + \vec{F}_{\text{aer}}. \end{aligned}$$

Здесь  $I$  — момент инерции тела относительно его выделенной точки  $\vec{R}_r$ ;  $\vec{V}_r$  — скорость этой точки;  $\omega = \dot{\alpha}$  — угловая скорость тела;  $\vec{R}_m$  — центр масс тела;  $f$  — коэффициент вязкого трения в оси закрепления. Аэродинамический момент ( $M_{\text{aer}}$ ) и моменты внешних ( $M_{\text{ext}}$ ) сил также вычисляются относительно выделенной точки. Внешние силы приложены к заданным жѳстко связанным с телами точкам по заданным законам  $\vec{F}_{\text{ext}} = \vec{F}_{\text{ext}}(t)$ . В частности, можно рассматривать силу тяжести или задачу без внешних сил. Аэродинамический момент и аэродинамическая сила вычисляются по известным формулам (Г.Я. Дынникова, С.В. Гувернюк, П.Р. Андронов):

$$\begin{aligned} \vec{F}_{\text{aer}} &= m_f \dot{\vec{V}}_r - \omega^2 m_f \vec{R}_m + 3\dot{\omega} \times \vec{R}_m + \frac{1}{\text{Re}} \oint_L \left( \Omega \vec{e}_l - \frac{\partial \Omega}{\partial \vec{n}} \vec{r} \times \vec{e}_z \right) dl; \\ \vec{M}_{\text{aer}} &= \frac{\vec{e}_z}{2} \oint_L r^2 J dl - \frac{\vec{e}_z}{\text{Re}} \oint_L \Omega \vec{r} \vec{n} dl + 2I_f \dot{\omega} - m_f \dot{\vec{V}}_r \times \vec{R}_m - \frac{4m\vec{\omega}}{\text{Re}}; \\ J &= \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial \Omega}{\partial \vec{n}}. \end{aligned}$$

Здесь  $\vec{n}$  — нормаль, направленная от жидкости внутрь тела;  $\vec{e}_l = \vec{n} \times \vec{e}_z$  —

единичный касательный вектор;  $L$  — контур тела;  $m_f$  — масса вытесненной жидкости;  $I_f$  — её момент инерции.

Начальное состояние механической системы — покой во всем пространстве. В начальный момент система мгновенно переходит в движение с заданными скоростями.

Для решения задачи используются вихревые методы: метод дискретных вихрей, метод кратных вихревых цепочек, метод вязких вихревых доменов. Основная идея методов состоит в дискретизации задачи по времени и моделировании динамики жидкости через эволюцию поля завихренности. Завихренность рождается на поверхности тел и дискретизируется. В идеальной постановке задачи завихренность «вморожена» в среду. В случае наличия вязкости имеется дополнительная составляющая скорости завихренности, соответствующая диффузионной скорости  $\vec{V}_d$ .

В первой главе обоснованы и сформулированы основные требования к программной реализации: модифицируемость (возможность решения различных задач механики, возможность варьирования численного алгоритма, возможность использования реализации на различных операционных системах), эффективность (минимизация времени расчёта), контролепригодность (возможность проверки достоверности результатов), способность к взаимодействию с другим программным обеспечением.

**Вторая глава** полностью посвящена численному алгоритму решения задачи. Алгоритм составлен совместно с авторами метода вязких вихревых доменов и позволяет в единых обозначениях и терминах полностью описать решение поставленной общей задачи механики различными методами. Алгоритм в первую очередь нацелен на последующую программную реализацию. По этой причине требовалось единообразие и полнота описания, а также рассмотрение различных предельных, «тонких», случаев, непредвиденное возникновение которых могло бы приводить к ошибкам в программе. Например, при моделировании эволюции завихренности в отсутствие тел следует особым образом оговорить выбор шага по времени, который, вообще говоря, зависит от мелкости разбиения

контуров тел.

Автором получено аналитическое выражение для потока вектора скорости, индуцируемой вихрем, через отрезок. Трудность состоит в том, что в зависимости от расстояния от данной точки до вихря индуцированная скорость определяется либо по закону Био-Савара, либо по линейному закону. Обозначим концы отрезка  $AB$ :  $A(x_1, y_1)$ ,  $B(x_2, y_2)$ . Пусть вихрь расположен в точке  $R$ . Требуется посчитать поток  $I$  по отрезку от проекции индуцированной скорости  $\vec{V}$  на нормаль. Для различных выражений индуцированной скорости введём обозначения:  $\vec{V}(\vec{r}) = \vec{V}_1$ , если  $|\vec{R} - \vec{r}| \geq \varepsilon_s$ ; и  $\vec{V}(\vec{r}) = \vec{V}_2$ , если  $|\vec{R} - \vec{r}| \leq \varepsilon_s$ . Имеем:

$$\vec{V}_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{(\vec{R} - \vec{r}) \times \vec{e}_z}{|\vec{R} - \vec{r}|^2};$$

$$\vec{V}_2 = \frac{1}{2\pi\varepsilon_s^2} (\vec{R} - \vec{r}) \times \vec{e}_z.$$

После перемещения  $A \mapsto A'(0, 0)$ ;  $B \mapsto B'(r, 0)$ , где  $r = |AB| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$  имеем:

$$I = \int_0^r \vec{V} \cdot (0, -1)^T dx.$$

Это выражение вычисляется аналитически в зависимости от расстояний от концов отрезка  $AB$  до точки  $R$ .

Автором доказательно определён вклад угловой скорости тела в условие непротекания. Следующее утверждение устанавливает значение этого вклада.

**Утверждение 1.** Пусть отрезок  $AB$  совершает вращение вокруг точки  $C$  с угловой скоростью  $\omega$ ;  $\vec{V}$  — скорость точки отрезка;  $\vec{n}$  такая нормаль к отрезку, что пара  $(\vec{n}, \vec{AB})$  — правая. Тогда значение инте-

графа  $I = \int_A^B \vec{V} \cdot \vec{n} dl$  определяется по формуле:

$$I = \omega \left( \vec{AC} \cdot \vec{AB} - \frac{1}{2} AB^2 \right).$$

На рис. 1 представлена общая схема алгоритма. Пунктирной линией обозначен один шаг по времени.

В начале моделирования решается предварительная задача, позволяющая определить присоединённую завихренность, соответствующую скачку тангенциальной скорости с внутренней стороны контура тела в том случае, если тело вращается. Алгоритмически решение предварительной задачи соответствует решению рассматриваемой ниже системы линейных алгебраических уравнений для тел, вращающихся с единичной угловой скоростью. Далее выполняется цикл. Одна итерация алгоритма выглядит следующим образом.

Составляется и решается система алгебраических уравнений. Выписываются закон сохранения суммарной циркуляции, условие непротекания на стенках тел, уравнения моментов и уравнения импульсов. Особенность используемого метода состоит в отыскании неизвестных рождающихся на данном шаге вихревых элементов совместно с динамическими параметрами тел, а именно — приращениями их скоростей. Такой подход позволяет решать задачи с малыми моментами инерции тел. Для решения системы линейных алгебраических уравнений используется метод вращений.

Завихренность на контуре тела, определённая из решения системы уравнений, разделяется на присоединённую (остающуюся на контуре), и свободную. Алгоритм содержит все необходимые расчётные формулы, определяющие переход сходящей завихренности в вихревые элементы. Завихренность может быть распределена на несколько вихревых элементов для предотвращения схода вихрей с чрезмерно большой циркуляцией.

После схода свободной завихренности текущий шаг по времени считается полностью определённым. Происходит сохранение результатов (вихревых картин, положений тел, а также полей скоростей, сил, давлений).

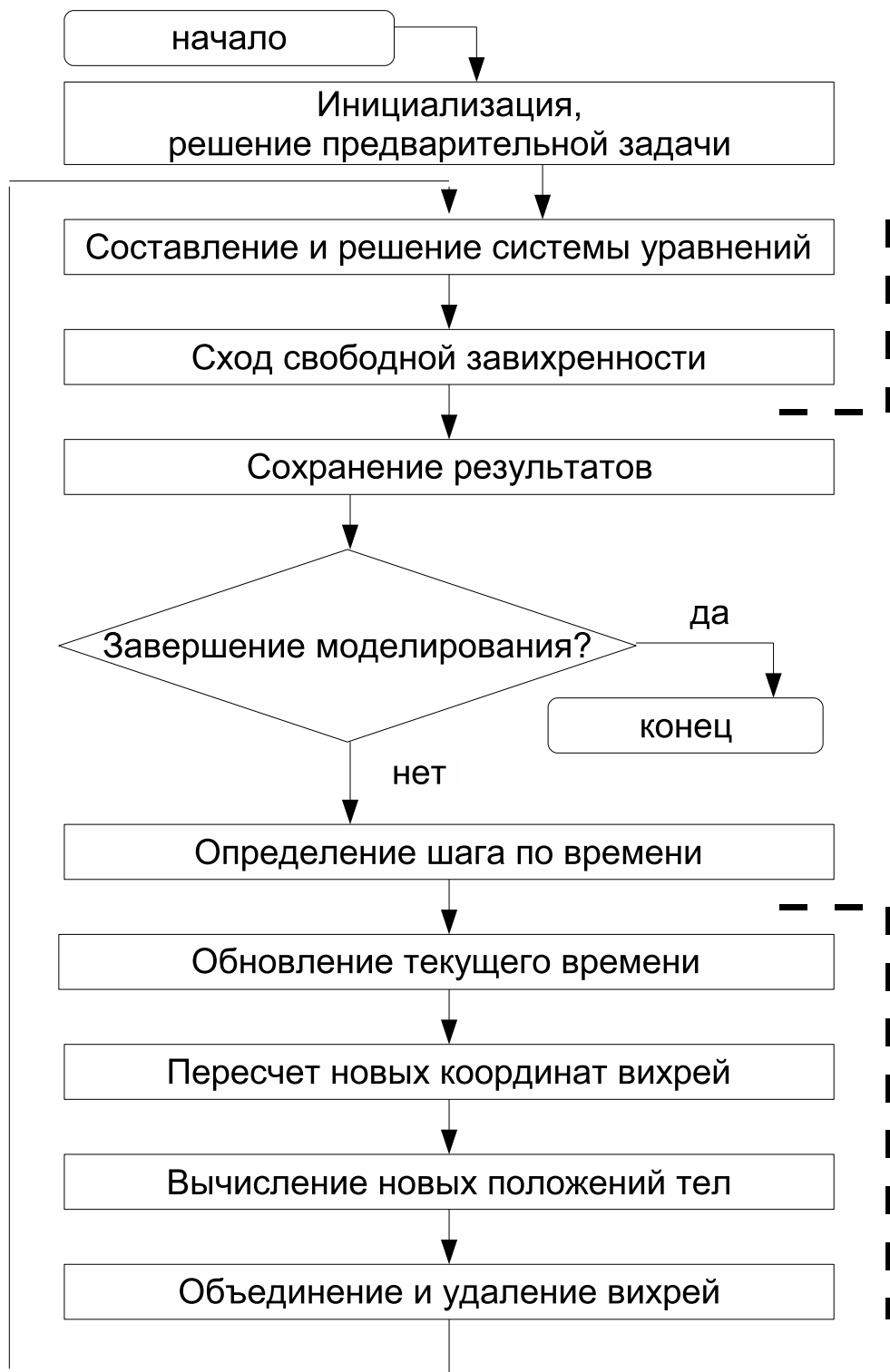


Рис. 1: Блок-схема алгоритма моделирования. Пунктиром обозначен один шаг по времени.

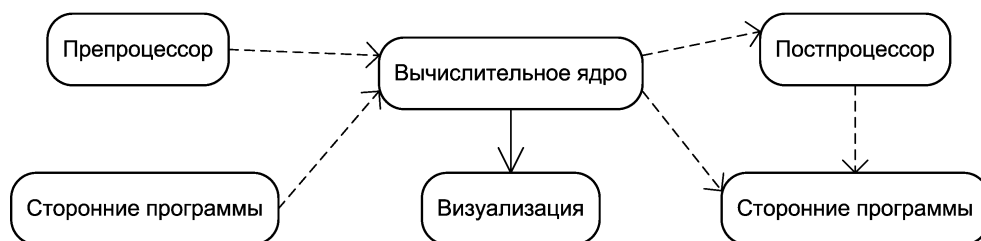


Рис. 2: Схема взаимодействия процессов при работе с программным комплексом. Пунктирными стрелками обозначены передачи данных через файлы, сплошной — через сеть.

В случае необходимости моделирование завершается. Для продолжения расчёта определяется следующий шаг по времени, согласованный с принятой дискретизацией по пространству и с текущими скоростями тел. С этого момента начинается переход на новый временной слой.

Вычисляется новое положение вихревых элементов и тел. Уравнения движения интегрируются методом Эйлера:  $\vec{R}_{n+1} = \vec{R}_n + \vec{v}_n \Delta t_n$ .

Вихри, попавшие внутрь тел, удаляются. Некоторые достаточно близкие вихри объединяются. Представлены необходимые формулы, учитывающие различные варианты конфигурации вихрей. После выполнения этой операции происходит переход на следующую итерацию алгоритма. Следует обратить внимание, что момент перехода на следующую итерацию не совпадает с моментом перехода на следующий шаг по времени, поскольку постановка задачи механики содержит неполную информацию о начальном моменте времени. Например, неизвестная в начальный момент рождающаяся завихренность находится уже в процессе решения задачи.

**Третья глава** содержит сведения об архитектуре программной реализации и некоторых технических особенностях. Принята стандартная декомпозиция задачи на препроцессор, вычислительное ядро и постпроцессор; дополнительно спроектирован модуль визуализации расчётов в процессе их выполнения (см. рис. 2). Такая декомпозиция позволяет говорить о создании **программного комплекса**.

Решена задача о выборе форматов для входных и выходных данных.

Трудность состоит в том, описание различных постановок задач требует различной структуры входных параметров. Кроме того, одни и те же геометрии тел оказываются полезными в различных задачах. Учитывая указанные факты, для входных параметров выбран формат XML. Геометрии тел описываются в отдельных XML-файлах. Основное назначение препроцессора — создание соответствующих описаний геометрий для различных рассматриваемых в данной работе тел: круглых, оперённых и эллиптических цилиндров, пластин и других тел. При создании геометрии того или иного тела требуется указать только основные, характерные для него, параметры. Например, оперённый цилиндр задаётся числом лопастей, отношением длины лопасти к радиусу, а также шагом дискретизации.

Выходные данные имеют простую структуру и сохраняются в текстовом формате data-файлов. В задачи постпроцессора входит типичная для большинства расчётов обработка результатов. Например, по сохранённым мгновенным вихревым картинам можно получить видеофильм, показывающий движение тела и эволюцию завихренности. Для этой задачи в состав постпроцессора включён сценарий, позволяющий сделать такую обработку одной командой.

Основная задача при проектировании ядра состояла в поддержании той модифицируемости постановки задачи механики (а также методов решения этой задачи) которая была заложена в алгоритме.

Рассматриваются основные модули вычислительного ядра: модули разбора командной строки, чтения файла задания; соответствующие моделируемым сущностям модули: «пространство», «среда», «контейнер тел», «тело»; дополнительные модули: система уравнений, сохранение результатов, вещественные числа.

Обосновывается выбор конкретных языков программирования и библиотек для создания комплекса. В качестве основного выбран язык C++, также используется python. Для модуля визуализации использована библиотека Qt. Вычислительное ядро потребовало привлечения сто-



ронных библиотек для разбора командной строки (port), анализа XML-документов (xmlParser), разработки собственной библиотеки синтаксического анализа средствами программы bison. В качестве средства распараллеливания вычислительного ядра были использованы стандартная библиотека параллельного программирования MPI и система автоматизированного динамического распараллеливания «Т-система» (версия NewTS).

Одной из технических задач, решённых при создании комплекса, является аппроксимация контуров определённых тел ломаными линиями. В третьей главе приводятся расчётные формулы для определения вершин ломаных при дискретизации цилиндров, оперённых цилиндров (вертушек), эллиптических цилиндров, роторов Савониуса, пластин конечной толщины. Эти результаты могут быть использованы при построении аналогичных программных комплексов или для решения аналогичных задач механики, а также для воспроизведения численных результатов, полученных в данной работе.

**Четвёртая глава** посвящена результатам применения программного комплекса. Приводится сравнение расчётов обтекания цилиндра, толстой пластины с известными результатами. Выполнено моделирование вихря Ламба (Lamb) методами диффузионной скорости и вязких вихревых доменов.

Автором решён ряд задач, возникших при сравнении численных решений для вихря Ламба с аналитическим. Предложена дискретизация вихря, позволяющая задать корректные начальные данные для использованных численных методов. В момент времени  $t$  вихрь промоделирован набором вихревых элементов, расположенных на концентрических окружностях. Для задания циркуляций этих элементов доказано следующее утверждение.

**Утверждение 2.** *Циркуляция  $\delta$  при выбранной дискретизации пред-*

ставляется в виде:

$$\delta = \frac{1}{n} \left( \Gamma_0 - \Gamma_0 \exp \left( \frac{-(R + \frac{\varepsilon}{2})^2}{4\nu t} \right) - G \right).$$

Здесь  $G$  — суммарная циркуляция вихревых элементов на окружностях, вложенных в данную;  $R$  — радиус данной окружности;  $\Gamma_0$  — суммарная циркуляция;  $\varepsilon$  — параметр дискретизации;  $n$  — количество вихревых элементов на данной окружности.

В качестве критериев для сравнения выбраны величина усреднённого радиуса и распределение завихренности. Для усреднённого радиуса используется аналитическое выражение, справедливость которого доказана.

**Утверждение 3.** В момент времени  $t$  усреднённый радиус  $R$  вихря Ламба выражается по формуле  $R = \Gamma_0 \sqrt{\pi \nu t}$ .

Получено согласование численного и аналитического решений. Показана работоспособность программного комплекса.

Большое внимание уделено решению связанных задач о движении вертушек в потоке вязкой и идеальной среды. Исследованы режимы авторотации вертушек при различном числе лопастей, варьировании их длины, наличии вязкости и трения в оси закрепления. Показано, что наличие вязкости оказывает тормозящий эффект, а более длинные лопасти, наоборот, способствуют вращению. Получены значения критических коэффициентов трения, вплоть до которых вертушки выходят на режим самовращения. Обнаружено, что с увеличением числа лопастей влияние вязкости уменьшается. Приводятся результаты расчётов нагрузок для жёстко закреплённых вертушек.

Выполнено сравнение одиночной трёхлопастной вертушки и тандема из пары вертушек. Известно, что пара пластин, закреплённых одна под другой, обладают большей способностью к самовращению, чем одиночная пластина. Для трёхлопастных вертушек обнаружен обратный эффект:

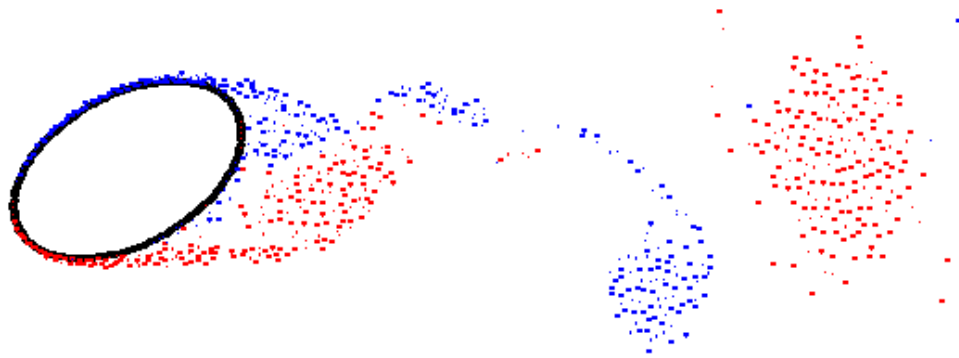


Рис. 3: Пример мгновенной вихревой картины при моделировании обтекания эллиптического цилиндра. Точками обозначены вихревые домены, их размеры пропорциональны интенсивности.

наличие второй вертушки оказывает тормозящий эффект, особенно сильный при сонаправленном вращении вертушек в тандеме.

На примере эллиптических цилиндров показана способность программного комплекса к моделированию гладких тел (см. рис. 3). Режим авторотации эллипсов наблюдается только в случае достаточно большого эксцентриситета.

Выполнено предварительное сравнение пластины и ротора Савониуса. Получено качественное согласование с экспериментальными данными (эксперимент проводился в НИИ механики МГУ): пластина достигает в полтора раза большей скорости вращения. Этот эффект требует дальнейшего изучения.

Особый интерес представляет сравнение T-системы (версии NewTS) и MPI в контексте программного комплекса, поскольку вычислительное ядро комплекса является одной из первых задач, распараллеленных средствами T-системы и имеющих практическую значимость. Известные ранее результаты замеров эффективности T-системы дополнены данными об эффективности MPI. Получено, что MPI-версия ядра работает несколько быстрее. Этот факт объясняется техническими особенностями реализации алгоритма средствами T-системы, требующими дополнитель-

ного копирования данных.

В **заключении** кратко перечисляются основные результаты диссертации.

- Разработан вычислительный алгоритм, обобщающий методы вязких вихревых доменов, дискретных вихрей и кратных вихревых цепочек.
- Разработан параллельный программный комплекс «Ротор», позволяющий решать вихревыми методами широкий класс сопряжённых задач аэрогидродинамики и динамики твёрдого тела. Обеспечена переносимость и модифицируемость программного комплекса, способность к взаимодействию с другим программным обеспечением.
- Показана применимость системы автоматизированного динамического распараллеливания «Т-система» (версия NewTS) к решению практически значимых задач. Установлено, что эффективность Т-системы соизмерима с эффективностью библиотеки MPI.
- Проведенная серия расчетов позволила установить факторы, влияющие на режимы нестационарного обтекания и авторотации ветроприемных устройств вертикально-осевого типа (толстых пластин, гладких и оперенных цилиндров и их тандемов, ротора Савониуса).

В **приложении А** приведено формальное определение формата файла задания для программного комплекса «Ротор». В **приложении В** приведено формальное определение формата файла геометрии тела. **Приложение С** содержит пример файла задания, а **приложение Д** — пример описания геометрии тела. Для представленных в настоящей работе расчётов задания основывались на этих примерах.

## Публикации по теме диссертации

1. Алгоритм численного моделирования методами дискретных вихрей и вязких вихревых доменов: отчет 4831 / С. В. Гувернюк, Д. А. Григоренко, П. Р. Андронов и др. — М.: Институт механики МГУ, 2006. — 49 с.
2. *Григоренко Д. А.* Отображение задач моделирования динамики плоскообтекаемых тел на массово-параллельную архитектуру // Труды конференции-конкурса молодых ученых. 12 октября – 14 октября 2004 г / Под ред. академика РАН Г.Г. Черного, профессора В.А. Самсонова. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. — С. 92–97.
3. *Григоренко Д. А.* Разработка обобщенного алгоритма и программной реализации лагранжевых вихревых методов // Труды конференции-конкурса молодых ученых. 12–17 октября 2005 г / Под ред. академика РАН Г.Г. Черного, профессора В.А. Самсонова. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. — С. 151–157.
4. *Григоренко Д. А.* Вопросы программной реализации лагранжевых вихревых методов // XVII Международная Интернет-конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС-2005). Избранные труды конференции. — М.: ИМАШ РАН, 2006. — С. 121–124.
5. *Григоренко Д. А.* Опыт построения программного комплекса для моделирования авторотации тел // *Информационные технологии моделирования и управления.* — 2007. — № 8(42). — С. 902–909.
6. *Григоренко Д. А.* Программная реализация бессеточного численного лагранжева метода моделирования вихревых течений // Труды конференции-конкурса молодых ученых 11 октября – 16 октября 2006 г. / Под ред. академика РАН Г.Г. Черного, профессора В.А. Самсонова. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007. — С. 116–121.

7. **Григоренко Д. А.** Реализация и применение программного комплекса моделирования авторотации оперенного тела // *Системы управления и информационные технологии*. — 2007. — № 3.3(29). — С. 337–341.
8. **Григоренко Д. А.** Реализация и применение программы моделирования авторотации оперенного тела // XVIII Международная Интернет-конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС-2006). Избранные труды конференции. 27–29 декабря 2006. — М.: ИМАШ РАН, 2007. — С. 43–50.
9. Использование многопроцессорных вычислительных систем для моделирования автоколебаний и авторотации тел, движущихся в сплошной среде: отчет 4676 / П. Р. Андронов, С. Н. Баранников, А. И. Гирча и др. — М.: Институт механики МГУ, 2003. — 48 с.
10. Моделирование вязких вихревых течений в нестационарных задачах гидродинамики и свободной тепловой конвекции / П. Р. Андронов, Д. А. Григоренко, С. В. Гувернюк, Г. Я. Дынникова // Труды XIII Международного симпозиума „Методы дискретных особенностей в задачах математической физики“ (МДОЗМФ-2007). — Харьков-Херсон: Харьковский Государственный Университет, 2007. — С. 13–16.
11. Моделирование нестационарных нагрузок при движении тел в вязкой жидкости: отчет 4775 / С. В. Гувернюк, Г. Я. Дынникова, П. Р. Андронов и др. — М.: Институт механики МГУ, 2005. — 93 с.
12. **Численное моделирование самовращения пластин в потоке вязкой жидкости / П. Р. Андронов, Д. А. Григоренко, С. В. Гувернюк, Г. Я. Дынникова // *Изв. РАН. МЖТ*. — 2007. — № 5. — С. 47–60.**
13. *Grigorenko D. A., Guvernnyuk S. V.* The research of stream energy

transformation mechanisms in wind energy constructions // International Summer School “Computer technologies of engineering mechanical problems”. — Institute of Mechanics of the Lomonosov MSU (Russia), Ching-Yun University (Taiwan), September 27, 2007. — Pp. 107–113.