

Проект

Иванов Евгений Геннадьевич

**АВТОМАТИЧЕСКАЯ ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ  
НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ РАСЧЁТНЫХ СЕТОК ДЛЯ  
ЗАДАЧ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ**

05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Новосибирск – 2007

Работа выполнена в Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск).

Научные руководители: кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
Кудрявцев Алексей Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Лисейкин Владимир Дмитриевич

доктор физико-математических наук  
Попов Владимир Николаевич

Ведущая организация: Институт математического моделирования РАН,  
г. Москва.

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2007 г. в \_\_\_\_\_  
на заседании диссертационного совета Д 003.046.01 при Институте Вы-  
числительных Технологий СО РАН по адресу: пр. ак. Лаврентьева, 6,  
630090, г. Новосибирск, Россия.

С диссертацией можно ознакомиться в специализированном читальном  
зале вычислительной математики и информатики ГПНТБ СО РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2007 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
Д 003.046.01, д.ф.-м.н., профессор

Чубаров Л.Б.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Важным элементом численного решения уравнений в частных производных методом конечных элементов или конечно-разностными методами является расчётная сетка, представляющая физическую область в дискретной форме.

Точность и эффективность численного исследования задачи существенно зависят от свойств используемой расчётной сетки. При численном решении задач в многомерных областях широко используются два типа сеток: структурированные и неструктурированные (состоящие обычно из треугольников в двумерном случае и из тетраэдров — в трёхмерном). Каждый из этих двух подходов имеет свои достоинства и недостатки.

Во многих задачах, представляющих практический интерес, форма расчётной области очень сложна, так что построение структурированной расчётной сетки становится чрезвычайно трудоёмким даже при использовании многоблочного подхода. В таких случаях применение неструктурированных сеток является единственно разумным решением.

В то же время, использование неструктурированных сеток обычно усложняет численный алгоритм и требует дополнительной памяти для хранения информации о связях ячеек сетки. Ещё один недостаток неструктурированных сеток, который является причиной дополнительной вычислительной работы, связан с увеличением числа ячеек, граней ячеек и рёбер по сравнению с шестигранными сетками. Например, тетраэдральная сетка из  $N$  узлов имеет примерно  $6N$  ячеек,  $12N$  граней,  $7N$  рёбер, в то время как шестигранная сетка примерно состоит из  $N$  ячеек,  $3N$  граней,  $3N$  рёбер. В результате численные алгоритмы, основывающиеся на неструктурированной топологии сетки, являются наиболее трудоёмкими в плане количества операций на шаг времени и памяти на узел сетки.

Появление масштабируемых параллельных компьютеров и развитие параллельных вычислений позволило сократить время получения решения на неструктурированных сетках, но, в то время как многие программы, решающие уравнения механики, уже перенесены на параллельные компьютеры, программы построения сеток остались далеко позади. Предварительный процесс построения сетки всё ещё остаётся узким местом, где вычисления должны быть выполнены последовательно.

В настоящее время сетки с размером, превышающим  $10^7$  элементов,

уже становятся обычными для промышленного моделирования в вычислительной механике, аэрогидродинамике и электродинамике. Ожидается, что в скором будущем могут потребоваться сетки с числом узлов порядка  $10^8 - 10^9$  элементов.

При таком увеличении размера сетки процесс её построения на одном последовательном компьютере становится затруднительным, а зачастую и просто невозможным в плане вычислительного времени и требований к памяти. Это особенно верно для тех случаев, когда сетку приходится перестраивать в процессе решения, часто на каждой итерации или шаге по времени расчётного алгоритма. Таким образом, построение сетки на одном процессоре становится препятствием на пути к получению решения многих практически важных задач.

Подводя итог, можно сказать, что актуальность параллелизации процесса автоматического построения неструктурированных расчётных сеток обусловлена необходимостью решения практически важных задач в областях сложной формы, и невозможностью эффективного построения таких сеток на одной последовательной ЭВМ из-за неизбежных ограничений, связанных с требуемой памятью и быстродействием. Развитие параллельных алгоритмов и программ для построения неструктурированных расчётных сеток позволит не только решить проблему нехватки памяти и сокращения времени вычисления, но и сделает возможным решение таких задач, которые в принципе не могли быть решены раньше из-за невозможности создания соответствующей сетки по техническим (невозможность сохранения) и временным (очень длительное время построения) причинам.

Разработки параллельных алгоритмов для решения различных задач ведутся во многих институтах Академии наук. Наиболее известные — это работы О.М. Белоцерковского, Б.Н. Четверушкина, А.В. Забродина, Ю.А. Кузнецова и их учеников. Методам разложения расчётной области были посвящены работы Ю.А. Кузнецова и П.Н. Вабищевича и др.

**Целями** данной работы являются:

1. Разработка алгоритма параллельного автоматического построения неструктурированных тетраэдральных сеток и параллельной организации вычислений.
2. Сравнение и анализ алгоритмов параллельного построения тетраэдральных сеток.
3. Исследование методов и критериев декомпозиции расчётной области для достижения наилучшего баланса загрузки процессоров.
4. Создание комплекса программ для параллельного построения нес-

структурированных сеток, основанного на разработанном алгоритме.

5. Численное исследование и анализ эффективности алгоритма на примерах решения практических задач вычислительной механики.

**Научная новизна.** Фактически проблема параллельного построения сетки возникла совсем недавно. По сведениям автора наиболее серьезные работы по параллельной генерации расчетных сеток ведутся только в двух отечественных организациях — в ИММ РАН, где в рамках проекта GIMM под руководством Б.Н. Четверушкина был создан параллельный генератор тетраэдральных сеток, использующий метод, основанный на грубом начальном разбиении области, и в ИПМ УрО РАН С.П. Копысовым и др., давшими краткое описание основных методов параллельного построения сеток.

В представленной работе:

1. Разработан новый алгоритм автоматического параллельного построения трёхмерных неструктурированных тетраэдральных сеток методом геометрической декомпозиции расчетной области. Построение поверхностных и объемных расчетных сеток происходит с гарантированным качеством.

2. Исследованы различные методы априорной декомпозиции трёхмерных расчетных областей и критерии разделения, такие как декомпозиция вдоль одного направления, рекурсивное разделение, свёрхразложение, критерий равенства объёмов подобластей, критерий равенства моментов инерции подобластей.

3. Разработан новый алгоритм улучшенного формирования разделяющего контура, играющий ключевую роль в качестве получаемого разбиения.

4. Исследованы различные методы априорной декомпозиции трёхмерных расчетных областей и критерии разделения, такие как декомпозиция вдоль одного направления, рекурсивное разделение, свёрхразложение, критерий равенства объёмов подобластей, критерий равенства моментов инерции подобластей и т.д.

5. Разработан новый алгоритм улучшенного формирования разделяющего контура, играющий ключевую роль в качестве получаемого разбиения.

6. Составлен параллельный расчетный код, производящий автоматическую генерацию сеток.

7. Решён ряд практических задач построения пространственной сетки — в цилиндрической области (как примере объекта простой формы), для компонента коленного протеза и крышки подшипника автомобиля. При построении сеток использовалось до 128-ми процессоров. Сетка,

построенная для крышки подшипника использовалась при численном исследовании напряжённо-деформированного состояния детали под влиянием сил, действующих на неё в двигателе.

8. Проведён численный анализ влияния количества узлов сетки и числа используемых процессоров (подобластей) на суммарную площадь поверхностей сопряжения и вычислительные затраты.

**Обоснованность и достоверность результатов.** Достоверность результатов работы алгоритма параллельного построения трёхмерных расчётных сеток основывается на сравнении результирующей пространственной сетки с сеткой, полученной традиционным последовательным образом, а также соответствии решений практических задач вычислительной механики на параллельно и последовательно построенных сетках.

**Теоретическая и практическая ценность.** Теоретическая ценность работы состоит в разработке нового алгоритма автоматического параллельного построения трёхмерных неструктурированных тетраэдральных сеток методом геометрической декомпозиции расчётной области, включающего: априорный алгоритм рекурсивной декомпозиции методом инерциальной бисекции, алгоритм улучшенного формирования разделяющего контура, алгоритм построения интерфейса. Исследованы различные методы априорной декомпозиции трёхмерных расчётных областей и критерии разделения, такие как декомпозиция вдоль одного направления, рекурсивное разделение, сверхразложение, критерий равенства объёмов подобластей, критерий равенства моментов инерции подобластей и т.д. Проведено сравнение эффективности алгоритмов и влияния количества узлов сетки на суммарную площадь поверхностей сопряжения и вычислительные затраты.

Практической ценностью является то, что предложенный алгоритм реализован в виде программного комплекса, включающего общедоступные пакеты, который является полностью автоматическим (не требуется вмешательство пользователя на всём этапе от начала до конца) и направлен на использование с различными программами, решающими уравнения механики, как с последовательными (позволяя более быстрое построение сетки), так и с параллельными, предоставляя готовую подобласть для каждого процессора.

Выполненная работа вносит теоретический и практический вклад в развитие параллельных вычислений и построение сеток, так как она призвана не только решить проблему нехватки памяти и сокращения времени вычисления при построении расчётной сетки, но и сделать

возможным решение задач, которые в принципе не могли быть решены раньше из-за невозможности создания соответствующей расчётной сетки по техническим (невозможность сохранения) и временным (очень долгое время построения) причинам.

**На защиту выносятся:**

— Алгоритм автоматического параллельного построения трёхмерных неструктурированных тетраэдральных сеток, основанный на методе геометрической декомпозиции расчётной области и позволяющий эффективно и с гарантированным качеством генерировать большие расчётные сетки для областей сложной формы.

— Программный комплекс, позволяющий производить автоматическое построение тетраэдральных сеток на многопроцессорных ЭВМ.

— Применения созданного программного комплекса к расчёту практических задач: построение расчётной пространственной сетки для компонента коленного протеза и для крышки подшипника автомобиля, использованных далее при численном исследовании напряжённо-деформированного состояния данных деталей.

— Результаты исследования поведения эффективности алгоритма, вычислительных затрат и времени счёта при изменении количества узлов сетки и количества процессоров (подобластей).

**Апробация работы.** Результаты, представленные в работе, докладывались на:

— Всемирном конгрессе по вычислительным наукам, компьютерной инженерии и прикладным вычислениям 2007 (WORLDCOMP07), Международная конференция по параллельным и распределённым методам обработки и приложениям (PDPTA 07), Лас Вегас, Невада, США

— Всероссийской конференции «Численная геометрия, построение расчётных сеток и высокопроизводительные вычисления», ВЦ им. А.А. Дородницына РАН, г. Москва, Россия;

— Конференции по вычислительной гидродинамике Европейского сообщества по вычислительным методам в прикладных науках (ECSOMAS), Эгмонд аан Зее, Голландия;

— Молодёжной конференции «Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей», ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия;

— IV Международной конференции Научно-технической ассоциации развития образования, базирующегося на интернет-технологиях (IAST-ED), г. Гриндельвальд, Швейцария;

— Корейско-японском университетском симпозиуме по инженерным

наукам (JSSME), г. Йокогама, Япония;  
 — Международной конференции Корейского общества прикладной вычислительной аэрогидродинамики, г. Тэгу, Южная Корея,  
 а также на научных семинарах в России и за рубежом, включая:  
 — семинар Института математики им. С.Л. Соболева СО РАН (Новосибирск) «Постановки задач, допускающих распараллеливание на многопроцессорных вычислительных системах» под руководством академика РАН С.К. Годунова;  
 — семинар Института математического моделирования РАН (Москва) под руководством чл.-корр. РАН Б.Н. Четверушкина;  
 — семинар «Математическое моделирование в механике» ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН (Новосибирск) под руководством академика РАН В.М. Фомина, проф. А.В. Фёдорова;  
 — семинар «Информационно-вычислительные технологии», Институт Вычислительных Технологий СО РАН под руководством академика Ю.И. Шокина, проф. В.М. Ковени  
 — семинар отдела компьютерных наук, Эрланген-Нюрнберг университет под руководством проф. У. Рюде — семинар «Аэрогазодинамика» ИТПМ им. С.А.Христиановича СО РАН (Новосибирск) под руководством проф. А.А. Маслова;  
 — семинар «Механика вязкой жидкости и турбулентность» ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН (Новосибирск) под руководством проф. В.В. Козлова;  
 — семинар Института индустриальной математики им. Фраунгофера (отдел высокопроизводительных вычислений), г. Кайзерслаутерн, Германия;  
 — семинар факультета математики Технического университета г. Кайзерслаутерн, Германия;  
 — семинар компании DISTENE (Национальный институт исследований по информатике и автоматике, Франция);  
 — семинар компании NUMECA (приложения вычислительной механики, Бельгия), г. Брюссель, под руководством проф. Шарля Хирша.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе (в скобках в числителе указан общий объём этого типа публикаций, в знаменателе - объём, принадлежащий лично автору), 1 статья в издании рекомендованном ВАК для представления результатов докторских диссертаций (1.0/1.0 печ. л.), 1 - в международных рецензируемых журналах (1.0/0.5 печ. л.), 2 - в трудах всероссийских конференций (0.9/0.5 печ. л.), 6 - в трудах



международных конференций (4.6/2.6 печ. л.), 2 - в других печатных международных изданиях (2.0/1.3 печ. л.)

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю к.ф.-м.н. А.Н. Кудрявцеву за постоянное внимание и ценную помощь, академику РАН С.К. Годунову за проявленный интерес к работе и ряд важных замечаний, члену-корреспонденту РАН Б.Н. Четверушкину за обсуждение результатов и тематики параллельного построения сеток, к.ф.-м.н. В.А. Гаранже за полезные замечания по улучшению алгоритма, а также Димитару Стоянову, Роберту Циллиху, Олегу Илиеву. Отдельная благодарность Францу-Йозефу Пфройндту, благодаря которому стало возможным появление этой работы.

Диссертационная работа выполнена при поддержке DAAD (Немецкая служба академических обменов) в рамках программы «Sandwich PhD in Industrial Mathematics» при сотрудничестве Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск), Института индустриальной математики им. Фраунгофера (Fraunhofer ITWM, Германия) и Технического университета г. Кайзерслаутерна (Германия).

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, сорока семи параграфов, заключения, списка литературы, содержит 45 рисунков и одну таблицу. Объем работы 115 страниц. Библиографический список включает 149 наименований.

## Содержание работы

**Первая глава** посвящена основным понятиям и принципам построения расчётных сеток. Здесь приведена классификация расчётных сеток на структурированные и неструктурированные и описаны преимущества и недостатки последних. Сделано краткое описание методов построения неструктурированных сеток, особое внимание уделено методам, основывающимся на критерии Делоне. Дана обзорная сравнительная таблица различных реализаций алгоритмов построения триангуляции Делоне. Обсуждается вопрос существования триангуляции в двумерном и трёхмерном случаях и приводятся примеры нетриангулируемых многогранников. Затем сделан исчерпывающий обзор методов построения неструктурированных сеток.

Во **второй главе**, посвящённой параллелизации и методам декомпозиции расчётной области, дано объяснение причин

параллелизации этапа построения сетки. Выделено два типа декомпозиции расчётной сетки: априорная и апостериорная. Обсуждаются недостатки и преимущества этих типов. Приведены различные критерии разбиения и способы установки разделяющих плоскостей, такие как декомпозиция вдоль одного направления, рекурсивное и сверхразделение, критерий равенства объёмов подобластей, критерий равенства моментов инерции подобластей и т.д. Затем сделан обзор параллельных вычислений, в частности, касающихся параллельного построения сеток.

**Третья глава** даёт подробное описание разработанного алгоритма. В начале главы формулируются цели и задачи алгоритма. Затем дан обзор шагов алгоритма с последующим подробным описанием в соответствующих параграфах: установка разделяющих плоскостей и балансировка загрузки процессоров, формирование разделяющего контура, построение интерфейса и его триангуляции Делоне, разделение объекта вдоль контура рёбер, параллельное построение пространственной сетки. Так как на каждом этапе существует множество различных способов, то по ходу изложения каждого шага объясняются причины выбора именно этого метода, его преимущества и недостатки.

Представленный подход использует метод геометрической декомпозиции расчётной области на подобласти для параллельного построения сетки. Алгоритм состоит из следующих основных шагов:

- 1. Сбалансированное разделение объекта на непересекающиеся подобласти;**
  - (а) вычисление центра масс и тензора инерции для установки режущей плоскости;
  - (б) сглаживание контура поперечного сечения для последующего проецирования;
  - (в) проецирование контурных узлов на плоскость для дальнейшей триангуляции;
- 2. Построение двумерной ограниченной триангуляции Делоне внутри спроецированного контура;**
- 3. Возвращение контурных узлов триангуляции на исходные позиции;**
- 4. Построение замкнутой и совместимой поверхностной сетки для каждой подобласти;**
- 5. Независимое параллельное построение пространственной сетки (без обмена данными) внутри каждой области на основе поверхностного описания;**

Блок-схема алгоритма параллельного генератора сеток изображена на рисунке 1.

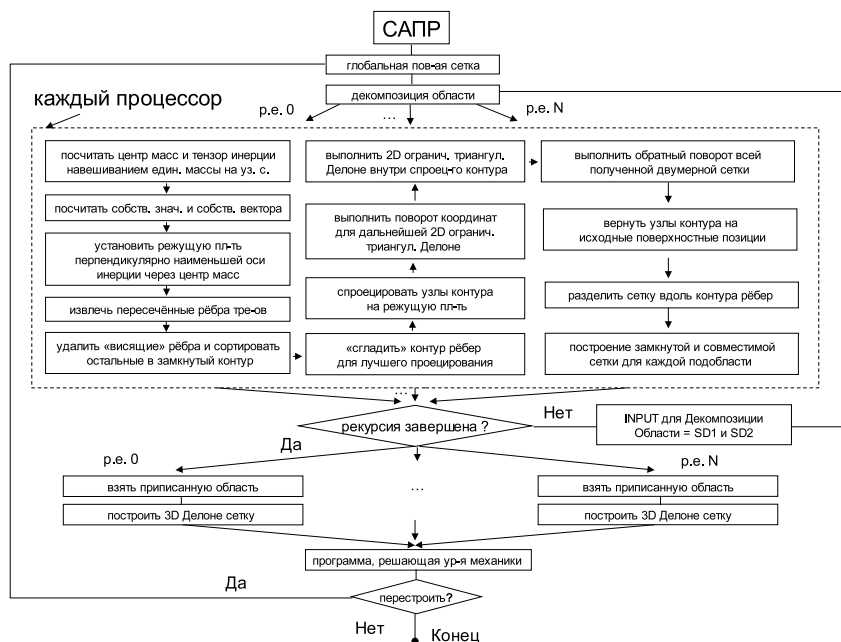


Рис. 1. Блок-схема параллельного генератора сеток.

В **четвёртой** главе обсуждается программная реализация предложенных алгоритмов. Приводятся принятые в работе модель параллельных вычислений (модель обмена сообщениями) и модель программирования (одна программа — много данных). Описываются используемые свободно распространяемые программные пакеты для двумерной (Triangle) и трёхмерной (TetGen) триангуляций, подключаемые в качестве библиотек к разработанному расчетному коду.

Приводится организация межпроцессорных коммуникаций на основе библиотеки MPI (Message Passing Interface), а также краткое описание используемых процедур пакета LAPACK (Linear Algebra Package). Уделено внимание описанию программы решения задач механики деформируемого твердого тела DDFEM (Domain Decomposition Finite Element Method) и её интеграции с параллельным генератором сеток.

**Пятая глава** посвящена анализу результатов расчётов практических задач, где в качестве примеров рассмотрены реальные объекты, такие как компонент коленного протеза, крышка подшипника и др. Для крышки подшипника продемонстрирована декомпозиция для построения пространственной сетки на 128-ми процессорах (см. рисунок 2 и 3).

Были построены сетки с различным количеством элементов ( $3 \cdot 10^5$ ,  $4 \cdot 10^6$  и  $3.1 \cdot 10^7$ ). В первом случае построение сетки на одном процессоре занимало 15 – 18 секунд, во втором — несколько минут. В обоих этих примерах время построения было уменьшено в несколько десятков раз за счёт использования разработанного параллельного генератора сеток.

На рисунке 4 дан график ускорения построения пространственной сетки для  $4 \cdot 10^6$ . Здесь ускорение — это отношение времени работы на одном процессоре ко времени работы на  $N$  процессорах.

Наиболее показательным является третий случай, где было построено 30953355 тетраэдральных элементов. Построение такой сетки обычным последовательным образом на одном процессоре (Xeon 2.4 GHz / 4Gb RAM) оказывается невозможным: после получаса работы триангулятор выдаёт ошибку о переполнении памяти. Зато параллельный генератор выполняет построение этой сетки на восьми процессорах не более чем за четыре минуты (237.17 секунд).

Особое внимание уделено оценке и контролю качества поверхностной и пространственной сеток. На рисунке 5 даны результаты сравнения качества пространственной сетки, построенной параллельным (справа) и последовательным (слева) образом. Здесь показано распределение тетраэдральных элементов по качеству — единице соответствуют правильные тетраэдры, с ухудшением формы тетраэдра значение коэффициента уменьшается.

Проведён анализ вычислительного времени и оценки трудоёмкости, а также суммарной площади интерфейсов, определяющей объём впоследствии пересылаемых данных. Разработанный параллельный генератор был использован для численного исследования напряжённо-деформированного состояния крышки подшипника под влиянием сил, действующих на неё в двигателе, с помощью кода DDFEM, разработанного в Институте индустриальной математики им. Фраунгофера. На рисунке 6 приведены результаты расчётов нагрузки (вверху) и деформации (внизу). При этом решение показано на недеформированной (слева) и деформированной (справа) сетке, где множитель деформации 436.812 был использован для лучшего зрительного восприятия изменения формы крышки подшипника.

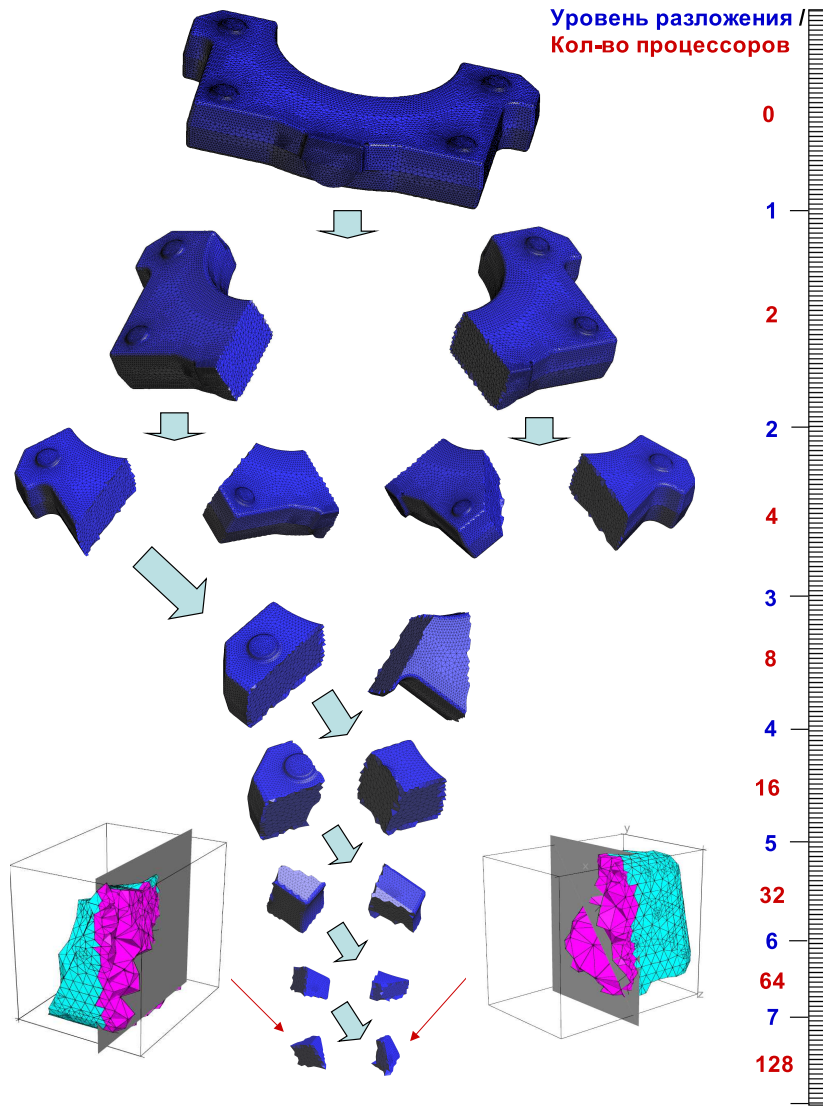


Рис. 2. Априорная декомпозиция крышки подшипника для 128-ми процессоров.

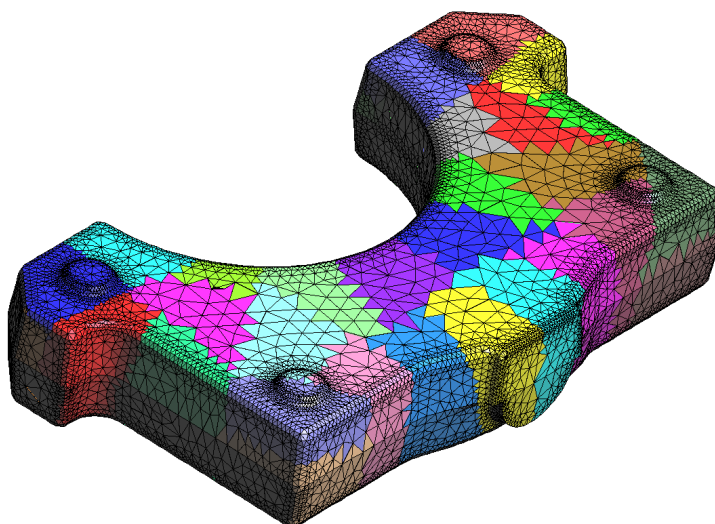


Рис. 3. Декомпозиция и параллельное построение пространственной сетки крышки подшипника на 32-х процессорах (показано разными цветами).

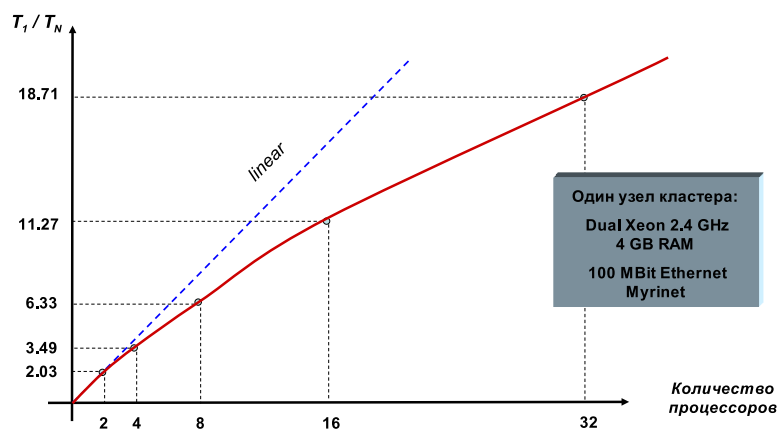
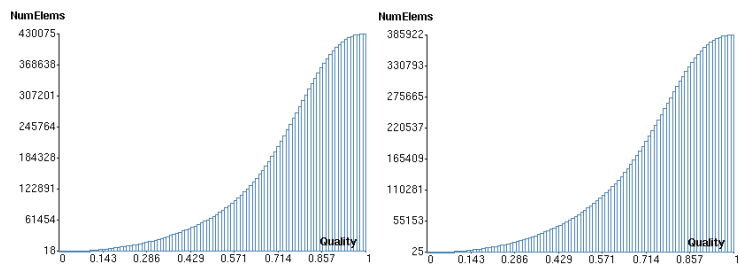
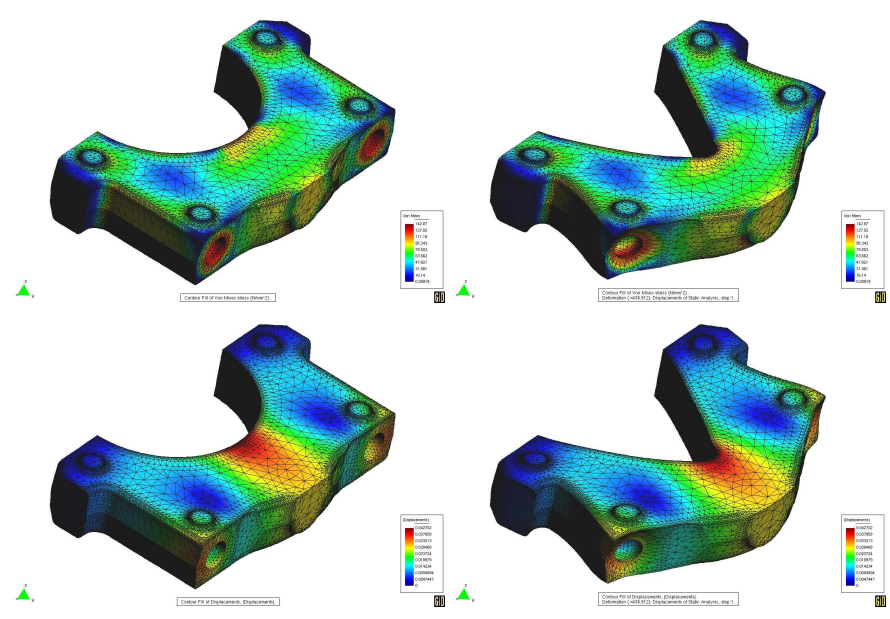


Рис. 4. Ускорение времени построения объёмной сетки для крышки подшипника (показано красным) без времени разделения. Более 4 000 000 тетраэдральных элементов.



**Рис. 5.** Распределение элементов по качеству формы в сетке, построенной традиционным последовательным образом (слева), и в сетке, построенной параллельным генератором на восьми процессорах (справа).



**Рис. 6.** Нагрузка крышки подшипника на недеформированной и деформированной сетке; смещение узлов сетки крышки подшипника на недеформированной и деформированной сетке. (Множитель деформации 436.812).

В конце главы отмечены преимущества разработанного алгоритма и перспективы его развития.

— Алгоритм выгодно отличается временем, необходимым для вычисления, и требованиями к памяти от библиотек для декомпозиции сеток, таких как METIS, использующих апостериорные алгоритмы разложения, так как апостериорные методы производят декомпозицию уже построенной пространственной сетки, в то время как априорные вначале разбивают поверхностную сетку, а затем строят объёмную внутри каждой подобласти.

— В отличие от сложных алгоритмов, используемых в других методах построения сеток, предложенный алгоритм состоит из последовательности простых шагов.

— Параллелизация основывается на геометрическом разделении области на подобласти, что является естественным процессом.

— Алгоритм позволяет использование проверенных и хорошо отлаженных последовательных двумерных и трёхмерных триангуляторов, которые широко доступны. Таким образом, параллельный генератор сеток может быть легко реализован и / или модифицирован.

— Алгоритмом достигается 100% вторичного использования программного кода, а также полностью устраняется необходимость коммуникации и синхронизации процессов.

— Несмотря на все преобразования и декомпозицию, сохраняет неизменной исходную поверхностную сетку.

— Генерирует почти плоские интерфейсы, т.е. границы раздела с малыми возмущениями между подобластями, что немаловажно для размера площади интерфейса.

— Использует критерий декомпозиции, который минимизирует площадь интерфейса и чувствителен как к форме объекта, так и к разрешению сетки.

## Основные результаты работы

1. Разработан новый алгоритм автоматического параллельного построения трёхмерных неструктурированных тетраэдральных сеток методом геометрической декомпозиции расчётной области. Предложен метод формирования разделяющего контура, сохраняющий исходную поверхностную сетку.

2. Исследованы различные методы априорной декомпозиции трёх-



мерных расчётных областей (вдоль одного направления, рекурсивное разложение, свёрхразложение) и критерии разделения (деление равноудалёнными плоскостями, равенство объёмов подобластей, равенство моментов инерции подобластей). Было показано, что из рассмотренных методов рекурсивное разделение плоскостью по критерию равенства инерции даёт наилучший результат, так как минимизирует площадь поверхности сопряжения и чувствительно как к форме объекта, так и к разрешению расчётной сетки.

3. Создан программный комплекс на основе предложенного алгоритма, включающий свободно распространяемые пакеты, который является полностью автоматическим и может быть использован с различными программами, решающими уравнения механики сплошной среды.

4. Проведена сравнительная оценка качества пространственных расчётных сеток, построенных параллельным и последовательным образом, получена оценка суммарной площади поверхностей сопряжения, используемой памяти и времени построения пространственной сетки при изменении количества узлов сетки и количества процессоров (подобластей). Показано, что различия в качестве являются незначительными, время построения сокращается в десятки раз, а при малом количестве процессоров достигается эффективность более 100%.

5. Разработанный алгоритм построения пространственных сеток был применён при решении практических задач — исследования компонента коленного протеза и напряжённо-деформированного состояния крышки подшипника автомобиля (с использованием 128 процессоров). При этом следует отметить, что размер полученных расчётных сеток достигал  $10^7 - 10^8$  элементов. Построение сеток такого размера традиционным последовательным образом является крайне затруднительным.

### **Список основных работ по теме диссертации**

#### **публикации в издании, рекомендованном ВАК**

1. Ivanov E.G. Automatic Parallel Generation of Three-Dimensional Unstructured Grids for Computational Mechanics // Вычислительные технологии - 2006. - Т.11 - № 1. - С. 3-17.

#### **публикации в международных рецензируемых журналах**

2. Ivanov E.G., Andrä H., Kudryavtsev A.N. Domain Decomposition Approach for Automatic Parallel Generation of Tetrahedral Grids // Comput. Meth. in Applied Mathematics - 2006. - V.6. - № 2. - P. 178-193.

#### **публикации в трудах всероссийских конференций**

3. Ivanov E.G., Andrä H., Kudryavtsev A.N. Automatic Parallel Gener-

ation of Tetrahedral Grids by Using a Domain Decomposition Approach // Труды Конференции «Численная геометрия, построение расчётных сеток и высокопроизводительные вычисления», Москва, Россия - 2006. - С.115-124.

4. Иванов Е.Г. Автоматическое параллельное генерирование трёхмерных неструктурированных сеток // Труды X конференции «Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей», Новосибирск - 2005. - С. 79-82.

**публикации в трудах международных конференций**

5. Ivanov E.G., Gluchshenko O.N., Andrä H., Kudryavtsev A.N. Efficient parallel algorithm and software for automatic generation of 3D computational tetrahedral meshes // Proceedings of the 2007 World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing, PDP-TA 07 - International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications), Las Vegas, Nevada, USA, 2007. - P. 285-292.

6. Ivanov E.G., Andrä H., Kudryavtsev A.N. Domain Decomposition Approach for Automatic Parallel Generation of Three-Dimensional Unstructured Grids // Proc. «European Conference on CFD (ECCOMAS CFD 06)», Egmond aan Zee, The Netherlands - 2006. - Paper No.295.

7. Ivanov E.G., Song D.J. Implementation of Preprocessor for CSCM code by using Graphic User Interface // Proc. Conf. «Korean Society of Computational Fluids Engineering», Daegu, South Korea - 2003. - P. 69-75.

8. Juraeva M., Ivanov E.G., Song D.J. Teaching Computational Fluid Dynamics via Internet // Proc. 4th IASTED Intern. Conference on Web-Based Education, Grindelwald, Switzerland - 2005. - Paper No. 461-016.

9. Ivanov E.G., Lim S., Song D.J. Implementation of Preprocessor for CSCM Navier - Stokes code by using Graphic User Interface // Joint Symposium between Sister Universities in Mechanical Engineering (JSSME), Yokohama, Japan - 2004. - P. 75-91.

10. Ivanov E.G., Juraeva M., Song D.J. Implementation of Full Web-based Graphic User Interface Processor for CFD software // Proc. Conference of «Korean Society of Computational Fluids Engineering», South Korea - 2004. - P. 121-125.

**другие печатные издания**

11. Ivanov E.G., Andrä H., Kudryavtsev A.N. Domain Decomposition Approach for Automatic Parallel Generation of Tetrahedral Grids // Fraunhofer ITWM Bericht - 2006. - №. 87.

12. Ivanov E.G., Gluchshenko O.N., Andrä H., Kudryavtsev A.N. Parallel Software Tool for Decomposing and Meshing of 3D Structures // Fraunhofer ITWM Bericht - 2007. - №. 110.

