

На правах рукописи

Якобовский Михаил Владимирович

**Вычислительная среда для моделирования задач механики
сплошной среды на высокопроизводительных системах**

Специальность: 05.13.18

**Математическое моделирование, численные методы и комплексы
программ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук



Москва – 2006

Работа выполнена в Институте математического моделирования РАН

Официальные оппоненты:

член-корр. РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор Рябов Геннадий Георгиевич,

доктор физико-математических наук,
профессор Крюков Виктор Алексеевич,

доктор физико-математических наук,
профессор Елизарова Татьяна Геннадьевна

Ведущая организация: Российский Федеральный Ядерный Центр - Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Экспериментальной Физики, г. Саров
(РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Защита состоится "21" ноября 2006г. на заседании Диссертационного совета Д002.058.01 в Институте математического моделирования РАН по адресу: 125047, г.Москва, Миусская пл., д.4А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИММ РАН

Автореферат разослан "_____" октября 2006г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Н.В.Змитренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Многопроцессорные системы терафлопной производительности, объединяющие сотни процессоров, позволяют выполнять за короткое время большие объемы вычислений. С их помощью возможно проведение вычислительных экспериментов, направленных на решение с высокой точностью естественнонаучных и технологических задач. Несмотря на это, большая часть современных суперкомпьютеров востребована не в полной мере. Косвенным свидетельством тому служит статистика использования 500 крупнейших многопроцессорных систем мира, согласно которой область применения более половины из них не конкретизирована.

Накопленный опыт применения многопроцессорных систем ориентирован, в первую очередь, на параллельные системы средней производительности, содержащие относительно небольшое число процессоров. При переходе к вычислительным системам, количество процессоров в которых исчисляется сотнями и более, требуется создание адекватных средств обработки больших объемов данных. Необходимы параллельные алгоритмы и средства, поддерживающие всю цепочку действий, требуемых для численного моделирования на подробных сетках прикладных задач. В том числе: методы формирования геометрических моделей высокого качества, генераторы поверхностных и пространственных сеток, средства декомпозиции сеток, библиотеки распределенного ввода-вывода, алгоритмы и библиотеки балансировки загрузки процессоров, средства визуализации результатов крупномасштабных экспериментов и многое другое. Любой из указанных аспектов представляет собой серьезную научную и технологическую проблему. Не менее актуальной и сложной является проблема согласования компонентов и их объединения в рамках единой системы, позволяющей специалисту прикладной области воспользоваться ими для выполнения вычислительного эксперимента.

Полноценная вычислительная среда может быть создана только в условиях тесного взаимодействия специалистов в области разработки параллельных приложений и специалистов в области решения прикладных задач, поскольку создание адекватных средств невозможно без глубокого понимания проблем, присущих основным этапам вычислительного эксперимента, выполняемого на системах массового параллелизма.

Качественный разрыв между технологиями поддержки рабочего места и распределенного вычислительного пространства, обуславливающий возникновение многих проблем практического использования многопроцессорных систем, будет продолжать возрастать. Подтверждением тому служит активное развитие GRID технологий и возможностей метакомпьютинга. В настоящее время нет доступных пакетов, обеспечивающих использование терафлопных вычислительных систем для решения задач механики сплошной среды. Существующие пакеты ориентированы на использование последовательных систем, например FlowVision, либо кластерных систем с ограниченным числом процессоров, например разработанный под руководством А.В.Зибарова пакет GDT, или один из ведущих пакетов численного моделирования двух и трехмерных задач газовой динамики, Fluent. Подобная ситуация складывается и в других областях знаний. Создание пакетов, снимающих с прикладного программиста вопросы, не относящиеся непосредственно к предметной области, является приоритетной задачей, поскольку целесообразность дальнейшего развития самих вычислительных систем непосредственно зависит от наличия адекватно использующего их возможности инструментария.

Актуальность диссертационной работы определяется необходимостью создания средств, обеспечивающих эффективное решение задач механики сплошной среды методами математического моделирования на вычислительных системах терафлопного диапазона.

Работа основана на почти пятнадцатилетнем опыте решения задач с помощью многопроцессорных систем, в том числе на пятилетнем опыте создания алгоритмов и инструментальных средств для пакета моделирования задач механики сплошной среды, разрабатываемого в ИММ РАН при поддержке ряда проектов РФФИ, РАН, Роснауки, Sandia Lab, GMD FIRST, компании «Русский алюминий».

Цель работы состоит в создании алгоритмов и компонентов вычислительной среды, обеспечивающих возможность эффективного решения задач механики сплошной среды методами математического моделирования на многопроцессорных вычислительных системах терафлопного диапазона.

Научная новизна и практическая значимость. Разработаны и изучены новые параллельные алгоритмы рациональной декомпозиции многомерных регулярных и неструктурированных сеток, динамической балансировки загрузки, сжатия триангулированных поверхностей и согласованного формирования на множестве процессоров фрагментов последовательностей псевдослучайных чисел большой длины.

Предложена модель и создана система распределенной визуализации трехмерных результатов вычислительных экспериментов. Система визуализации предназначена для изучения данных, объем которых не оставляет возможности их анализа с помощью последовательных программ, и может быть использована для интерактивного изучения сеточных данных различной природы.

Создана вычислительная среда, обеспечивающая согласованное применение разработанных методов при проведении вычислительных экспериментов с использованием сеток содержащих 10^8 и более узлов на системах терафлопного диапазона и метакомпьютерах. С ее помощью выполнено моделирование задач обтекания тел сложной формы, горения и добы-

чи углеводов на вычислительных системах с большим числом процессоров.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается согласованностью результатов вычислительных экспериментов, выполненных с помощью разработанных методов, с известными экспериментальными данными или результатами, полученными с помощью общепризнанных методов и инструментальных средств.

Апробация диссертации. Результаты работ по диссертации докладывались на научно-исследовательских семинарах Института математического моделирования РАН, на семинаре методического совета факультета ВМиК МГУ им. М.В.Ломоносова, на семинаре ИММ УрО РАН по параллельным вычислениям, на научной сессии ОИТиВС РАН «Проблемы и методы компьютерной визуализации», на научном семинаре НИВЦ МГУ «Разработка пакетов прикладных программ для многопроцессорных суперЭВМ», на заседании Совета РАН «Высокопроизводительные вычислительные системы, научные телекоммуникации и информационная инфраструктура», на VIII ежегодном международном семинаре "Супервычисления и математическое моделирование", на третьем международном научно-практическом семинаре "Высокопроизводительные Параллельные Вычисления на Кластерных Системах", на Всероссийской научной конференции "Высокопроизводительные вычисления и их приложения", на международной конференции Parallel CFD-1996, 2002, 2003, 2005, на VI Международном конгрессе по математическому моделированию, на III международной конференции "Математические идеи П.Л.Чебышёва и их приложение к современным проблемам естествознания", на Всероссийской научно-технической конференции «Параллельные вычисления в задачах математической физики», на семинаре научно-исследовательского и проектно-

конструкторского института горной и химической промышленности (БЕЛГОРХИМПРОМ), на школах-практикумах молодых ученых и специалистов «Технологии параллельного программирования».

Работы поддержаны проектами программы президиума РАН, отделения математических наук РАН, проектом «Визуализация 3D данных на суперкомпьютерах» (GMD/FIRST, ИСП РАН, ИММ РАН), проектом «Параллельное многоуровневое разбиение графов» AP-0642 (Sandia National Laboratories, ИММ РАН) и грантами РФФИ, в ряде которых автор является руководителем: «Визуализация многомерных данных в распределенных многопроцессорных системах» № 99-01-01036-а, «Распределенная обработка результатов широкомасштабных вычислительных экспериментов» № 02-01-00589-а, «Обработка и декомпозиция нерегулярных сеток большого размера на многопроцессорных системах» № 05-01-00750-а. Материалы диссертации использованы при подготовке авторских учебных курсов «Параллельные вычисления», «Параллельные вычисления и распределенные системы», «Распределенные вычисления и сети».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 40 работ, из них 9 статей - в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, перечень которых определен Высшей аттестационной комиссией.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего ___ наименования. Полный объем диссертации составляет ___ страниц.

Содержание работы

Во введении сформулирована цель работы, обоснованы актуальность темы и научная новизна, кратко описано содержание работы.

В первой главе рассматриваются методы рациональной декомпозиции графов, описывающих регулярные и нерегулярные сетки. Обсуждается ряд критериев декомпозиции, рассматривается метод иерархической обработки и хранения больших сеток.

Эффективным методом построения параллельных вычислительных алгоритмов моделирования задач механики сплошной среды является метод геометрического параллелизма. Основная проблема при его использовании связана с необходимостью решения задачи статической балансировки загрузки - выбор такой декомпозиции расчетной сетки, при которой вычислительная нагрузка распределена равномерно между процессорами, а накладные расходы, вызванные возможным дублированием вычислений и необходимостью передачи данных между процессорами малы. Задача сводится к разбиению вершин некоторого графа на заданное число классов эквивалентности – доменов. Задача рационального разбиения графов, наиболее близкой к которой можно считать задачу о разрезании графов (В.А.Евстигнеев), принадлежит классу NP -полных, что заставляет использовать для ее решения эвристические алгоритмы.

Заслуживают упоминания алгоритмы рациональной декомпозиции сеток, основанные на методах рекурсивного координатного разбиения, инерциального и спектрального разбиения, алгоритмы Kernighan-Lin (KL) и Fiduccia-Mattheyses (FM), пузырьковый алгоритм Дейхмана. Обзоры и сравнение методов декомпозиции графов содержатся в работах таких авторов, как В.Hendrickson, R.Leland, François Pellegrini, Chris Walshaw, Robert Preis, Frank Schlimbach, Ralf Diekmann. Доступен ряд пакетов декомпозиции графов, среди которых выделяются последовательные и параллельные версии пакетов CHACO (Hendrickson, Leland) и METIS (G.Karypis, V.Kumar), пакеты PARTY (Preis), JOSTLE (C.Walshaw), SCOTCH (François Pellegrini). Наиболее эффективны иерархические методы рационального разбиения графов (В.Hendrickson, R.Leland, G.Karypis,

V.Kumar и др.), основой которых является следующая последовательность действий: огрубление графа (построение последовательности уменьшающихся в размере вложенных графов), начальная декомпозиция огрубленного графа на заданное число доменов, восстановление графа и локальное уточнение границ доменов.

Начальная декомпозиция может быть выполнена с помощью практически любого алгоритма, вплоть до алгоритма полного перебора, поскольку число вершин огрубленного графа может быть сокращено до достаточно малой величины. Но, как правило, качество такой декомпозиции, будет низким, поскольку оно непосредственно зависит от равномерности процесса огрубления графа. При разбиении огрубленного графа практически неизбежно формируются домены несовпадающих весов, так как веса агрегированных вершин могут иметь значительный разброс. В связи с этим, необходимо выполнять локальное уточнение границ доменов, что позволяет уравновесить веса доменов и уменьшить число ребер, пересекающих их границы, например, с помощью KL и FM алгоритмов, обладающих низкой трудоемкостью.

Для ряда задач актуальны два дополнительных критерия декомпозиции. Минимизация максимальной степени домена, с целью снижения числа актов обмена данными на каждом шагу по времени или уменьшения сложности вычислительного алгоритма, как, например у А.Н.Андрианова. Обеспечение связности каждого из подграфов, соответствующих доменам.

Перечисленные выше алгоритмы не контролируют связность и максимальную степень доменов. В связи с этим, актуальна разработка алгоритмов декомпозиции, отвечающих этим критериям. Одним из привлекательных методов, обеспечивающих формирование начального приближения высокого качества, является алгоритм спектральной бисекции. Применяя его рекурсивно, можно разбить граф на произвольное число частей. Декомпозиция графа на две части может быть выполнена с помощью упо-

рядочивания вершин графа по значениям компонент вектора Фидлера - собственного вектора, соответствующего наибольшему ненулевому собственному значению спектральной матрицы графа (матрицы Лапласа). Разбиение графа на большее число частей согласно компонентам вектора Фидлера может быть использовано для формирования доменов, имеющих малое число соседей. Существенным недостатком метода является сложность определения (например, с помощью метода Ланцоша) компонент вектора Фидлера вырожденной спектральной матрицы графа, что ограничивает число вершин разбиваемого графа.

В качестве альтернативы указанным методам разработан инкрементный метод рационального разбиения графов, наиболее близким аналогом которого, является пузырьковый алгоритм Дейхмана.

Инкрементный алгоритм декомпозиции графа. Домены, содержащие несвязные между собой группы вершин, образуются именно на этапах начальной декомпозиции и локального уточнения, поэтому предлагается заменить первый из них методом получения начального приближения, гарантирующим связность доменов и модифицировать второй из них, запретив нарушение в ходе его выполнения, связности доменов.

Рассматривая множества внутренних и граничных вершин доменов, а так же, определяя согласно Г.Джонсону глубину произвольной вершины, как кратчайшее расстояние от нее до множества граничных вершин, можно ввести понятия ядра заданного уровня домена и слоя. Ядро уровня k определим как подграф, образованный вершинами глубины не менее k и ребрами, инцидентными только этим вершинам. Слой уровня k определим как подграф, образованный множеством вершин глубины k и инцидентными только им ребрами (ребро инцидентно своим вершинам и наоборот, О.Оре). Алгоритм инкрементного роста доменов ориентирован на формирование доменов, ядра заданного уровня каждого из которых связны, что

является более сильным требованием, чем требование связности каждого из доменов. Можно показать, что из связности слоя следует связность соответствующего ядра, что позволяет построить эффективный алгоритм контроля связности ядер.

Итерационный инкрементный алгоритм разбиения графа включает в себя следующие этапы: 1) инициализация доменов – определение p случайно выбранных вершин; 2) распределение вершин по доменам методом инкрементного роста; 3) локальное уточнение границ сформированных доменов; 4) окончание работы, если в каждом домене достигнута связность ядер заданного уровня; 5) перенос части закрепленных за доменами вершин в группу свободных вершин (возможные действия варьируются от отчуждения нескольких внешних слоев *всех* доменов, до отчуждения практически *всех* вершин тех доменов, что не удовлетворяют заданным критериям качества).

На этапе 3 алгоритм локального уточнения выполняется над фрагментами исходного графа, образованными объединением каждого из доменов со множеством инцидентных ему доменов. Существенный выигрыш во времени достигается за счет сокращения числа доменов, обрабатываемых при каждом выполнении процедуры локального уточнения.

Тестирование показывает, что инкрементный алгоритм, сохраняя высокое качество разбиения, позволяет увеличить уровень связности ядер доменов. Как правило, число разрезанных ребер сравнимо в декомпозициях, полученных иерархическими и инкрементными алгоритмами.

Иерархическое хранение больших сеток. При моделировании на многопроцессорных вычислительных системах (МВС) характерно выполнение длительных вычислений с помощью большого количества сравнительно коротких сеансов. Число используемых процессоров может меняться от одного сеанса к другому, что вынуждает многократно решать задачу

балансировки загрузки. Несмотря на высокую эффективность иерархических алгоритмов, разбиение нерегулярных расчетных сеток большого размера занимает значительное время. Для уменьшения потерь целесообразно использовать иерархический метод хранения и обработки больших сеток. В соответствии с ним расчетная сетка предварительно разбивается на множество блоков небольшого размера - микродоменов и хранится в виде набора этих блоков и графа, определяющего связи блоков между собой - макрографа, каждая из вершин которого соответствует микродомену. При каждом сеансе расчета производится разбиение макрографа, и каждому процессору назначается список микродоменов (Рис. 1). Разбиение макрографа требует малого, по сравнению с разбиением исходной сетки, времени и может быть выполнено последовательными алгоритмами. Дополнительный выигрыш времени достигается за счет возможности распределенного хранения больших графов как совокупности микродоменов, что значительно уменьшает накладные расходы на чтение и запись сеток большим числом процессоров.



Рис. 1. Иерархическое представление двумерной сетки

Вторая глава посвящена вопросам динамической балансировки загрузки при моделировании на МВС химически реагирующих многокомпонентных течений. Рассматривается разработанный в соавторстве с М.А.Корнилиной алгоритм серверного параллелизма, обеспечивающий децентрализованное перераспределение элементарных заданий, размещенных на множестве процессорных узлов.

Одной из глобальных экологических проблем современности является рост концентрации метана в атмосфере, значительным источником эмиссии которого являются добыча, переработка и транспортировка природного газа и нефти. При прорыве газа из скважин месторождений для уменьшения экологических последствий газовый фонтан поджигают. Однако горение метана само по себе создает серьезные экологические проблемы, поскольку среди продуктов горения присутствуют высокотоксичные оксиды азота. Используемая для оценки экологических последствий модель химически реагирующих течений предполагает совместное решение уравнений газовой динамики и химической кинетики, описывающих реакции с участием 19 веществ: CH_4 , CH_3 , CH_3O , O_2 , H_2O , H , O , OH , HO_2 , CO , CH_2O , CHO , H_2 , CO_2 , N_2 , N , NO , NO_2 , N_2O .

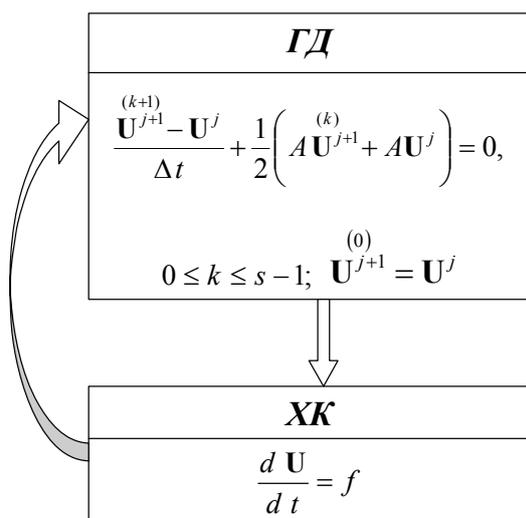


Рис. 2. Блок схема алгоритма моделирования горения

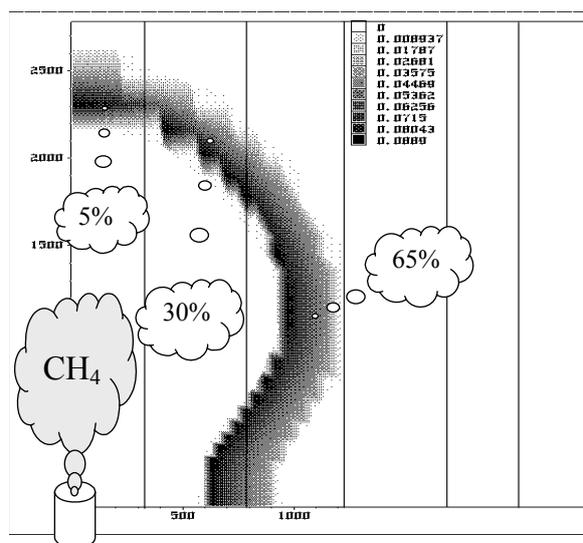


Рис. 3. Разбиение расчетной области по процессорам

Согласно методу суммарной аппроксимации (А.А.Самарский) поочередно рассматриваются газодинамические процессы (блок уравнений ГД, Рис. 2) и процессы, описывающие химическую кинетику горения (блок уравнений ХК). Газодинамические течения описываются полунявными кинетически согласованными разностными схемами, уравнения химической кинетики интегрируются при помощи L-устойчивых методов решения жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Следу-

ет подчеркнуть, что общее время расчета уравнений блока ХК многократно превышает время расчета уравнений блока ГД.

Пусть моделируется горение струи в области, покрытой двумерной решеткой расчетных узлов (Рис. 3). Системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих кинетику горения в разных узлах сетки независимы друг от друга, что позволяет выполнять соответствующие вычисления во всех узлах одновременно – никакие обмены данными между узлами на этом этапе не нужны. Особенностью систем уравнений, описывающих кинетику горения, является их жесткость, приводящая к значительному разбросу времён решения систем ОДУ, соответствующих «горячим точкам», то есть, ячейкам в которых происходят быстрые химические реакции, и ячейкам, расположенным далеко от фронта пламени.

Параллельный алгоритм моделирования ГД блока построен на основе метода геометрического параллелизма и при равномерном распределении точек по узлам вычислительной системы обеспечивает равномерную загрузку процессоров на этом этапе. Распараллеливание блока ХК на основе метода геометрического параллелизма крайне не эффективно. «Горячие точки» расчетной сетки локализованы в сравнительно узкой, меняющей со временем свое положение, зоне - на фронте пламени и непосредственно за ним (Рис. 3). Как правило, они сосредоточены на сравнительно небольшом числе процессоров. В результате, эти процессоры затрачивают на обработку блока ХК значительно больше времени, чем остальные. Дополнительно осложняет ситуацию то, что время решения каждой из систем ОДУ фактически не поддается априорной оценке, поэтому нельзя использовать статические методы их перераспределения в начале каждого шага по времени.

Известный метод динамической балансировки загрузки - метод коллективного решения (processor farm) (Denis Howe, Г.Харп, Д.А.Аляутдинов, А.Н.Далевич) - предполагает наличие некоторого управляющего процессора, содержащего все необходимые исходные данные

(концентрации веществ, температуру и т.д.) для каждой из расчетных точек. Сбор этих данных на каждом шаге, передача на обрабатывающие процессоры, прием полученных результатов и обратная рассылка для проведения очередного газодинамического шага снижают эффективность распараллеливания до неприемлемого уровня. Развитием алгоритма коллективного решения является динамическая децентрализованная балансировка, ориентированная на обработку баз данных (Л.Б.Соколинский), предполагающая выделение нескольких иерархически связанных серверов, распределяющих задания.

Другим широко применяемым методом динамической балансировки загрузки является диффузная балансировка (В.Э.Малышкин, А.П.Карпенко) обеспечивающая перераспределение вычислительной нагрузки между логически соседними процессорами. Метод эффективен при решении задач с квазистационарным распределением вычислительной нагрузки по узлам сетки и позволяет сохранить важное свойство «локальности» вычислительного алгоритма, не требуя непосредственного взаимодействия каждого из процессоров со всеми остальными. Кроме того, можно отметить блочный алгоритм (В.В.Пекунов, Ф.Н.Ясинский), ориентированный на задачи с медленным дрейфом «горячих» областей.

Указанные методы балансировки загрузки не эффективны для распараллеливания блока ХК в силу высокой динамики миграции «горячих точек», в связи с чем разработан алгоритм серверного параллелизма. Он основан на принципах коллективного решения, но в значительной мере свободен от его недостатков благодаря наделению каждого из процессоров управляющими функциями. Алгоритм удовлетворяет следующим основным требованиям: каждым процессором осуществляется преимущественная обработка локальных «горячих точек»; обмен данными выполняется одновременно с обработкой доступных «горячих точек»; обеспечена возможность вторичного перераспределения точек, что позволяет передавать

их большими группами, динамически разбиваемыми, при необходимости, на более мелкие части.

Разработан кластерный алгоритм серверного параллелизма, позволяющий за счет введения процессов-шлюзов, обеспечить высокую эффективность выполнения расчетов на объединении нескольких кластерных систем, соединенных относительно слабыми каналами передачи данных.

В третьей главе рассматривается проблема распределенной визуализации результатов крупномасштабных вычислительных экспериментов.

Проблема визуализации больших объемов научных данных отмечается в публикациях с конца 1980х годов. В это время было сформировано новое научное направление – научная визуализация, в основе которой лежит комбинированный подход, предполагающий интерактивное отображение научных данных в среде виртуального окружения и предоставляющий исследователю возможность непосредственного манипулирования изучаемыми объектами (С.В.Клименко). В рамках этого направления проблеме анализа больших объемов данных уделяется значительное внимание. С ростом числа процессоров, используемых для проведения вычислительных экспериментов, сложность задачи преобразования больших объемов вычисленных данных к виду, пригодному для наглядного отображения, качественно возрастает, поскольку графические станции и компьютеры рабочих мест пользователей уже не обеспечивают её решение. Наиболее естественным путем решения проблемы является использование технологии клиент-сервер. Этот подход широко используется при визуализации трехмерных сцен виртуальной реальности (Ю.М.Баяковский, В.А.Галактионов, С.В.Клименко, П.В.Вельтмандер). В его рамках:

- сервер визуализации, как правило, выполняемый на многопроцессорной системе, обеспечивает обработку большого объема данных;

- клиент визуализации, выполняясь на компьютере рабочего места пользователя, обеспечивает интерфейс взаимодействия с пользователем и непосредственное отображение данных подготовленных сервером, используя при этом аппаратные и программные мультимедийные возможности персонального компьютера, как для построения наглядных визуальных образов (с помощью графических ускорителей, стерео устройств), так и для управления ими (с помощью многомерных манипуляторов).

Сервером готовятся данные, обеспечивающие формирование на стороне клиента именно трехмерного образа объекта, манипулирование которым с целью его изучения с различных направлений возможно уже без дополнительных обращений к серверу. В этом одно из существенных отличий предлагаемого подхода от методов, используемых в большинстве доступных систем визуализации (например, VISIT, EnSight), выполняющих на стороне сервера «рендеринг» - формирование двумерного растрового образа изучаемого объекта.

Созданная система визуализации обеспечивает изучение трехмерных скалярных данных. Одним из наиболее мощных и наглядных методов визуализации трехмерных скалярных данных является визуализация изоповерхностей, в связи с чем поддерживается именно этот метод визуализации. Среди подходов к визуализации поверхностей, обзор которых можно найти, например у А.Семинахина и А.Игнатенко, выделяется метод, основанный на использовании мультитриангуляций (А.В.Скворцов, Н.С.Мирза, Р.В.Чаднов, Е.Purro). Использование относительно простых структур данных - линейных массивов треугольников, позволяет опираться на известные алгоритмы огрубления триангуляций. Кроме того, современные видеоускорители аппаратно поддерживают отображение массивов треугольников, что значительно повышает наглядность визуализации, как за счет высокой скорости вывода данных на экран, так и за счет возможности автоматического формирования стереоизображений.

Ядро системы визуализации представлено рядом алгоритмов фильтрации и сжатия первичных данных, позволяющих аппроксимировать результаты вычислений ограниченным объемом данных, достаточным, однако, для восстановления изучаемого образа с заданным уровнем качества. При сжатии преследуются две основные цели:

- **сжатие непосредственно в процессе визуализации** – сжатие данных *до заданного объема* за короткое время, определяемое требованиями, накладываемыми интерактивным режимом. Основным минимизируемым параметром в этом случае является объем данных, описывающих изучаемый объект – он лимитирован временем, отведенным на передачу данных на компьютер рабочего места пользователя;
- **сжатие данных с целью их долговременного хранения для выполнения визуализации впоследствии** – формирование сжатого образа, описывающего исходные данные *с заданной точностью*. Время сжатия не является в данном случае лимитирующим фактором, основное внимание уделяется увеличению степени сжатия.

Работоспособность системы распределенной визуализации трехмерных скалярных полей определяется, главным образом, качеством алгоритмов сжатия неструктурированных сеток. Именно неструктурированных сеток, поскольку даже при сечении плоскостью простейшей трехмерной кубической решетки, образуется триангулированная поверхность, что вызвано наличием разбиения каждого из кубов сетки на ряд пирамид, упрощающих построение изоповерхности. Число описывающих изоповерхность узлов велико и по порядку величины может совпадать с числом узлов исходной трехмерной сетки, поэтому и необходим этап ее сжатия.

Алгоритмы сжатия изоповерхностей. Обсуждаемые далее алгоритмы предназначены для сжатия триангулированных поверхностей до размеров, допускающих их передачу через медленные каналы связи за короткое время, поэтому все они являются алгоритмами, сжимающими данные с потерей точности. В первую очередь визуально воспринимаются

ные с потерей точности. В первую очередь визуально воспринимаются основные контуры и формы трехмерного объекта, спроецированного на двумерный экран. Таким образом, при изучении объекта «в целом» деталями можно пожертвовать. При необходимости, фрагмент объекта можно рассмотреть с большим увеличением и меньшей потерей точности.

Простейшие алгоритмы сжатия, основанные на уменьшении точности представления вещественных чисел, описывающих сетку, и последующей компрессии с помощью стандартных алгоритмов группового кодирования (RLE), кодирования строк (LZW - A.Lempel, J.Ziv, T.Welch) и им подобных, значительного выигрыша не дают. Основная причина этого в том, что большую часть объема данных о триангуляции составляет целочисленная информация, описывающая ее топологию – связи между узлами. Стандартными алгоритмами сжатия без потерь эта информация практически не сжимается. Существующие специальные методы (их обзор и развитие содержится в работах А.В.Скворцова), среди которых наиболее эффективен метод шелушения, существенно ориентированы на планарность графов и не обобщаются непосредственно на случай триангуляций, расположенных в трехмерном пространстве.

Таким образом, основной интерес представляют алгоритмы, формирующие некоторую новую триангулированную поверхность, аппроксимирующую исходную изоповерхность, но содержащую значительно меньшее количество узлов. В этой связи полезен ряд базовых алгоритмов огрубления триангуляций и многоуровневого описания трехмерных объектов поверхностными сетками (W.J.Schroeder, J.Zarge, W.Lorensen, H.Hope, Shao-zheng Zhou, R.Klette, E.Puppo, R.Scopigno).

Рассматриваемые далее алгоритмы сжатия триангулированных поверхностей можно разделить на методы сжатия синтезом и, разработанные в соавторстве с С.В.Муравьевым, методы сжатия с помощью редукции.

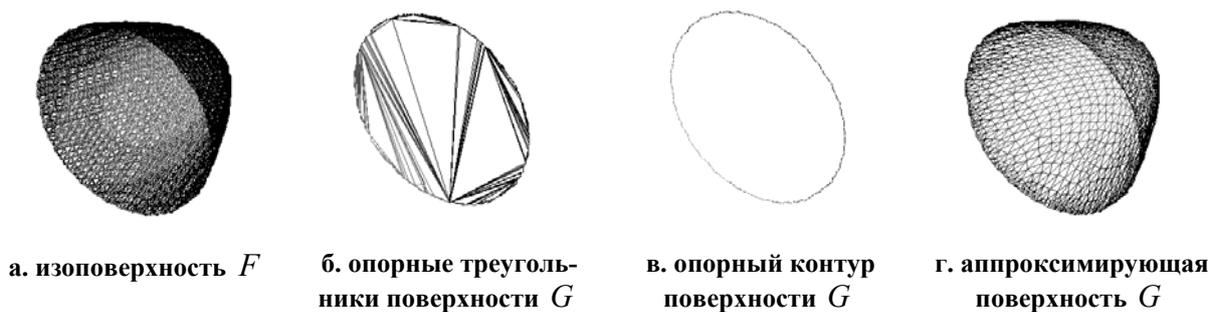


Рис. 4. Этапы сжатия изоповерхности методом синтеза

При сжатии методом синтеза предполагается, что изоповерхность F (Рис. 4а) однозначно проецируется на плоскость, например, (x, y) . Удаление всех внутренних (Рис. 4б) и части граничных точек изоповерхности приводит к формированию опорного контура аппроксимирующей поверхности G (Рис. 4в). Триангуляция внутренней области достигается последовательным добавлением вершин внутрь контура (Рис. 4г). При определении координат очередной вершины используется только информация о координатах (x, y, z) опорных и уже добавленных точек, $z = F(x, y)$. Может быть использован простой алгоритм добавления точек в центр тяжести треугольника максимальной площади с последующей корректировкой триангуляции в соответствии с критерием Делоне (А.А.Мигдал, А.В.Скворцов). Тогда, для восстановления поверхности G достаточно знать координаты опорных точек, связи между ними и значения z в добавленных точках, что значительно снижает объем передаваемых на клиентскую часть данных. Нет необходимости передавать координаты внутренних точек и связи между ними, поскольку при восстановлении поверхности, эта информация будет получена за счет повтора действия, выполненных в ходе сжатия.

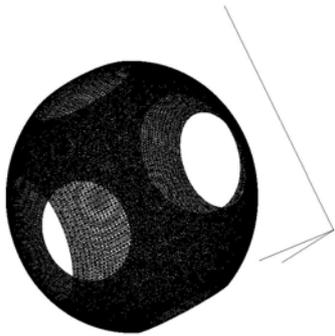


Рис. 5. Триангулированная сфера: точек 98 880, треугольников 195 884

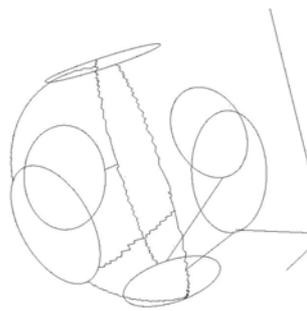


Рис. 6. Линии, разделяющие однозначно проектируемые зоны: точек 3 483

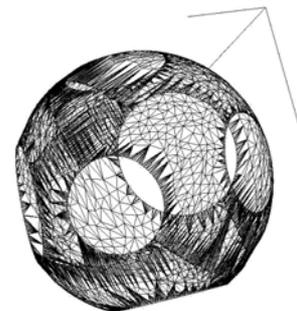


Рис. 7. Результат сжатия алгоритмом синтеза: точек 4 481, треугольников 5 948

Если поверхность нельзя однозначно спроецировать ни на какую плоскость (Рис. 5), то предварительно выполняется разрезание поверхности на связные фрагменты, каждый из которых может быть однозначно спроецирован на некоторую плоскость (Рис. 6). Результат сжатия представлен на рисунке 7.

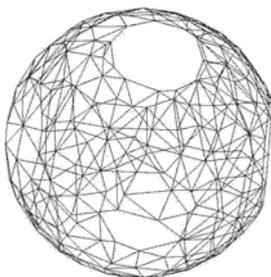


Рис. 8. Сжатие сферы редукцией: точек 215, треугольников 375

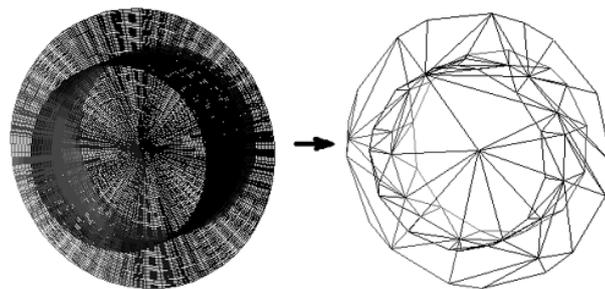


Рис. 9. Сжатие редукцией самопересекающейся поверхности, точность 5%

Основная идея методов сжатия редукцией заключается в удалении из исходной поверхности некоторого количества узлов таким образом, чтобы триангуляция, определенная на оставшихся точках, аппроксимировала исходную поверхность с требуемой точностью. Платой за соблюдение точности аппроксимации и высокое качество получаемых с помощью методов редукции визуальных образов является большее, чем у методов синтеза, время сжатия. На рисунке 8 представлен результат сжатия с помощью редукции сферы с вырезами (Рис. 5). Методы редукции допускают сжатие изоповерхностей, обладающих достаточно сложной структурой, например имеющих самопересечения (Рис. 9).

Параллельный алгоритм построения и сжатия изоповерхности работан на основе метода геометрического параллелизма. Каждый процессор обрабатывает фрагмент сетки (домен, полученный с помощью изложенных ранее методов декомпозиции). Результаты сжатия фрагментов собираются на одном процессоре, на котором выполняется сжатие результата их объединения. Полученная триангуляция передается на персональный компьютер пользователя, где выполняется отображение поверхности.

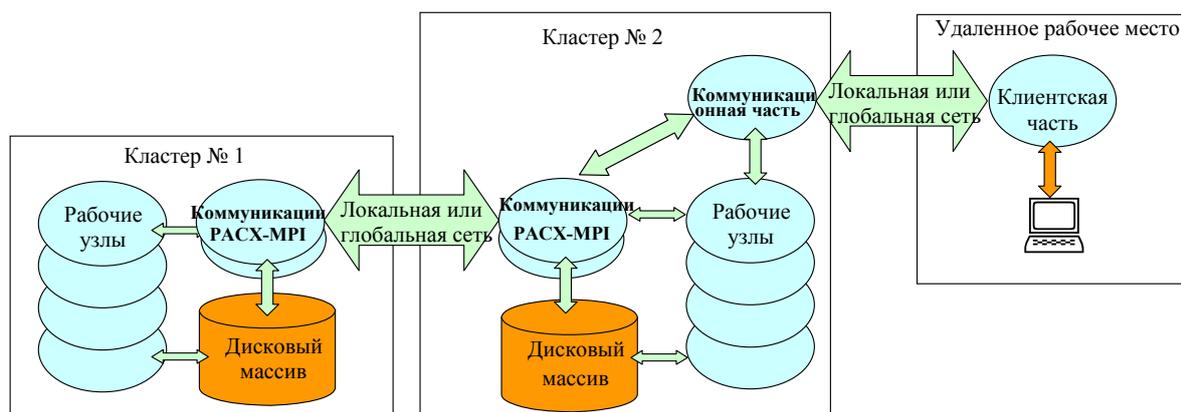


Рис. 10. Структура системы визуализации

Разработанная в соавторстве с П.С.Криновым и С.В.Муравьевым система визуализации успешно функционирует не только на суперкомпьютерах, но и на метакомпьютерах, поскольку объемы передаваемых в ходе ее работы данных относительно невелики (Рис. 10).

Проверка работоспособности системы визуализации выполнялась на примере анализа трехмерных скалярных функций, заданных на регулярных сетках содержащих до 500x500x1000 узлов при запуске сервера визуализации на вычислительной системе МВС-1000М (МСЦ РАН), а клиентской части - в ИММ РАН. Основное время при использовании 200 процессоров было затрачено на операции ввода обрабатываемых данных, что подтверждает высокую эффективность разработанных алгоритмов сжатия.

В четвертой главе рассматриваются вопросы построения среды моделирования сеточных задач на распределенных вычислительных сис-

темах. Возможности среды демонстрируются на примере моделирования задач обтекания трехмерных тел (в соавторстве с С.А.Суковым и И.В.Абалакиным), горения в атмосфере метана (в соавторстве с М.А.Корнилиной) и добычи углеводородов с помощью методов перколяции (в соавторстве с И.И.Антоновой). Предлагается параллельный алгоритм генерации последовательностей псевдослучайных чисел большой длины.

Создание единой среды моделирования, даже при условии, что для каждого ее блока имеются в наличии алгоритмы и программные модули, представляет собой серьезную научную проблему, поскольку требует поиска решений, обеспечивающих согласованное выполнение модулей, взаимную стыковку их интерфейсов. В свою очередь, наличие прототипа вычислительной среды и решение с его помощью задач, имеющих важное прикладное значение, позволяет лучше обозначить проблемы использования многопроцессорных систем и стимулирует поиск путей их преодоления. Именно такой подход, основанный на тесной интеграции методов решения прикладных задач и методов создания параллельного математического обеспечения, позволяет разработать вычислительную среду, обеспечивающую решение с помощью МВС и метакомпьютеров сложных актуальных задач, требующих больших вычислительных мощностей.

Система управление пакетом. Основная цель разработки системы управления пакетом – упрощение процедуры выполнения вычислительного эксперимента на распределенной вычислительной системе. В качестве действий, инициируемых с помощью системы управления, могут выступать вызовы модулей построения геометрической модели, формирования поверхностной и пространственной сетки, подготовки параметров запуска, выполнения расчета, запуск сервера визуализации, клиента визуализации, и так далее.

Основой сеанса работы с вычислительной средой служит проект - описание множества действий, модулей, промежуточных файлов и параметров, относящихся к циклу вычислительных экспериментов, направленных на решение прикладной задачи. Формирование проекта и изменение состава действий, выполняемых в его рамках, обеспечивается средствами системы управления, что предоставляет возможность моделирования широкого круга задач. Предусмотренные при настройке проекта операции могут быть инициированы пользователем непосредственно с помощью динамически формируемых элементов интерфейса системы управления. Поддерживается выполнение локальных заданий – на компьютере пользователя, и заданий, рассчитанных на параллельную обработку – на многопроцессорных серверах и удаленных системах, при этом, с точки зрения пользователя авторизация выполняется только один раз – в начале сеанса. Как правило, между модулями данные передаются с помощью файлов, что упрощает согласование интерфейсов модулей подготовленных разрозненными командами разработчиков. Перечисленные свойства системы управления значительно упрощают работу пользователя с множеством модулей, поддерживающих различные этапы вычислительного эксперимента, в том числе при их выполнении на распределенных вычислительных мощностях.

Моделирование обтекания трехмерных тел сложной формы. В качестве математической модели газодинамического обтекания трехмерных объектов использовалась система безразмерных уравнений Навье-Стокса, описывающая течения вязкого теплопроводного совершенного газа, записанных в дивергентной форме. Пространственная дискретизация выполнялась на тетраэдральных сетках (Рис. 11) с использованием методов конечных объемов (конвективный перенос) и конечных элементов (диффузионная часть). Численный поток через грани барицентрических контроль-

ных объемов определялись с помощью схемы Роу и кинетически согласованной разностной схемы (Б.Н.Четверушкин).

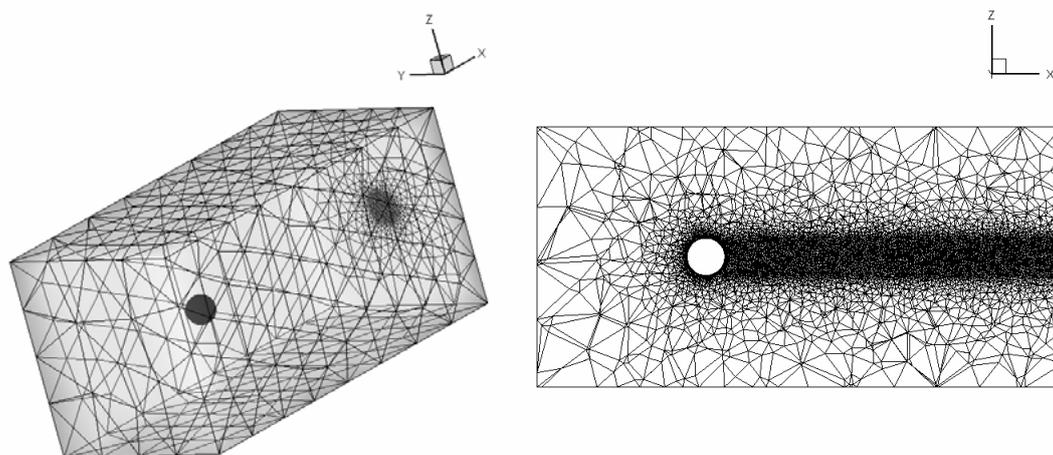


Рис. 11. Поверхностные треугольники и сечение расчетной тетраэдральной сетки, используемой при моделировании газодинамического обтекания сферы

На рисунке 12 приведена фотография, полученная при выполнении натурального эксперимента по обтеканию шара при числе $Re=26.8$ (Ван-Дайк), подтверждающая достаточно точное согласование результатов моделирования (Рис. 13) с экспериментальными данными. Процесс обтекания сферы при различных числах Рейнольдса хорошо изучен теоретически и экспериментально, что делает его удобным тестом. Верифицированный на этом примере пакет в дальнейшем использовался для моделирования обтекания тел более сложной формы.

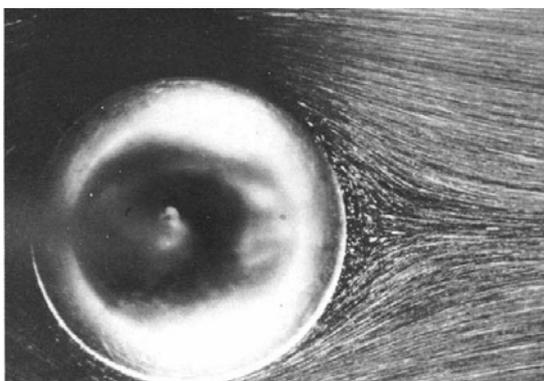


Рис. 12. Обтекание сферы. Эксперимент. $Re=26.8$.

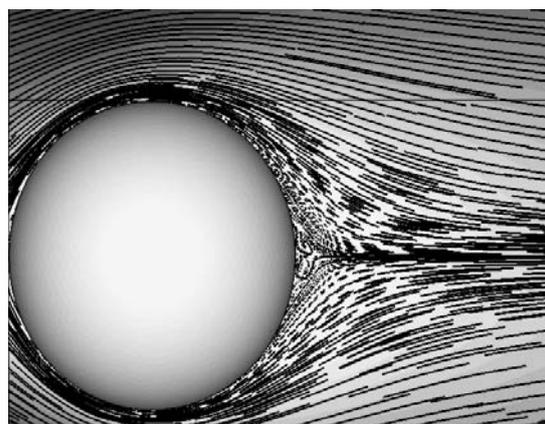


Рис. 13.Траектории отмеченных частиц $Re=25$

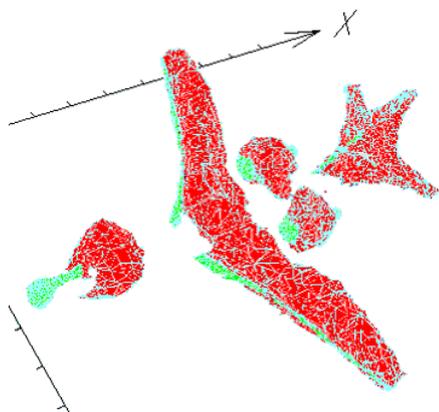


Рис. 14. Исоповерхности поля плотности, визуализация разработанной системой RemoteViewer

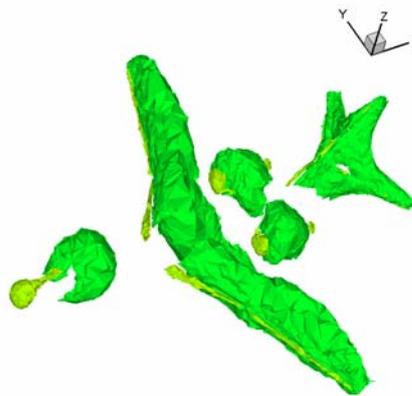


Рис. 15. Исоповерхности поля плотности, визуализация системой Tecplot

На рисунке 14 приведена изоповерхность распределения плотности, полученная при моделировании обтекания летательного аппарата с использованием тетраэдральной сетки, содержащей более 2 млн. узлов и 14 млн. тетраэдров. Эффективность использования вычислительной мощности 24 процессоров превышала 70%. На рисунке 15 приведен результат визуализации изоповерхности плотности, полученные с помощью системы Tecplot, широко используемой для визуализации научных данных на персональных компьютерах. Приведенные на рисунках 14 и 15 результаты показывают хорошее совпадение формы изоповерхностей, полученных разными инструментами, что подтверждает высокое качество образов, формируемых разработанными алгоритмами визуализации.

Моделирование задач горения. Моделирование процессов горения является одной из наиболее сложных с вычислительной точки зрения проблем и требует больших вычислительных ресурсов. Результаты тестирования алгоритма моделирования горения струи метана на многопроцессорной системы МВС-1000М показывают, что алгоритм серверного параллелизма обеспечивает эффективность на уровне 60% при расчете сетки, содержащей 1000x1000 узлов, на 600 процессорах, что подтверждает хорошую масштабируемость метода. Так же высокую эффективность подтвер-

дили расчеты горения метановой струи на объединении двух кластеров. Блок ГД обрабатывался на 30 процессорной системе, блок ХК – на двух системах одновременно (30 и 12-процессорной). Несмотря на медленный канал связи между системами была получена более, чем 90% эффективность.

Моделирование добычи углеводородов с помощью методов перколяции. Актуальность проблемы интенсификации добычи нефти обусловлена истощением месторождений и необходимостью снижения остаточной нефтенасыщенности и обводнённости продукции. Перспективным выглядит использование для этих целей подхода, основанного на методах теории перколяции. Для достоверного описания трехмерного пористого коллектора месторождения с помощью перколяционной модели необходимо использовать решетки содержащие более 10^7 узлов (В.И.Селяков, В.В.Кадет), что стало возможным в последнее время благодаря развитию высокопроизводительных многопроцессорных систем. Изучению методов теории перколяции и свойств, описываемых ими многомерных геометрических структур, посвящены монографии Ю.Ю.Тарасевича и Н.Н.Медведева. Перколяционный подход для описания фильтрации флюидов и активного нефтевытеснения рассматривается в работах А.Р.Кесселя, В.Е.Алемасова, Д.В.Апросина, М.Х.Бренермана, Я.И.Кравцова, Г.О.Берима.

Предложенная А.Р.Кесселем трехфазная динамическая перколяционная модель (ДПМ) хорошо описывает такие эффекты, как наличие порога протекания, кластеров запертой нефти и рукавов прорыва вытесняющего агента, конечное время распространения волн давления. Использование больших вычислительных мощностей позволило обнаружить важное для практических приложений свойство ДПМ: увеличение фильтрационного потока при использовании импульсного режима внешней накачки. На рисунке 16 приведены результаты численного эксперимента, выполненного на пятистах процессорах с использованием трехмерной решетки содержащей $1000 \times 1000 \times 100$ узлов, на которой в шахматном порядке размещена сетка из 25×25 добывающих и нагнетательных скважин. Прослеживается зависимость доли остаточной нефти от отношения времени закачки t_0 к периоду воздействия T .

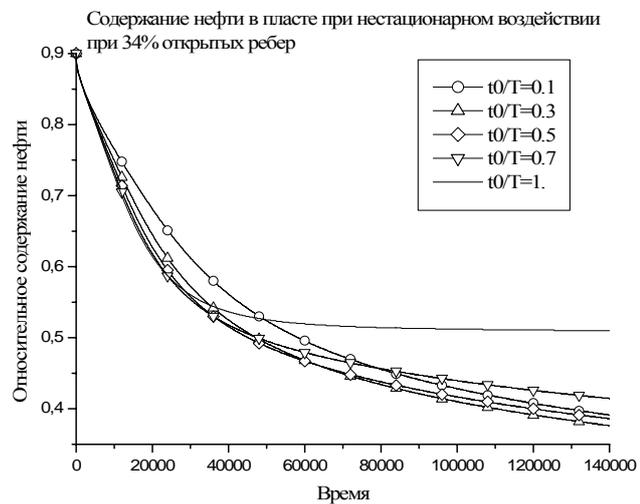


Рис. 16. Содержание нефти при различных воздействиях на пласт (34% открытых ребер)

Наблюдается ярко выраженная разница в долях остаточной нефти при непрерывном ($t_0/T = 1$) и импульсном ($t_0/T < 1$) режимах нагнетания воды, что вполне согласуется с экспериментальными данными. Вычислительный эксперимент показал, что минимум достигается при $t_0/T \approx 1/3$ в широком диапазоне долей открытых ребер.

Параллельный алгоритм генерации последовательностей псевдослучайных чисел. Для формирования на многопроцессорных системах перколяционных решеток, содержащих 10^9 и более узлов, требуются последовательности псевдослучайных чисел (ПСЧ) большой

следовательности псевдослучайных чисел (ПСЧ) большой длины. Кроме того, необходима возможность определения любого члена ПСЧ без вычисления всех предыдущих, что позволяет параллельно формировать размещенные на процессорных узлах части решетки и избежать хранения перколяционных решеток, сохраняя вместо них параметры соответствующих фрагментов последовательности. При моделировании стохастических процессов каждый эксперимент должен быть воспроизведен многократно с различными выборками используемых случайных величин, поэтому возможность непосредственного определения произвольного элемента ПСЧ значительно повышает эффективность расчетов.

Для генерации ПСЧ широко используются линейные конгруэнтные генераторы и генераторы Фибоначчи. Линейные конгруэнтные генераторы позволяют вычислять элемент последовательности с произвольным номером n , используя порядка $O(\log n)$ операций (Richard P. Brent). Однако, как отмечено в работе G. Marsaglia, сформированные с их помощью d -мерные точки располагаются в относительно небольшом числе гиперплоскостей размерности $d-1$, что значительно ограничивает применимость генераторов этого типа, например, в геометрических приложениях.

При построении генератора использован подход, основанный на рекуррентных соотношениях (И.М.Соболь) и аналогичных им генераторах Фибоначчи, общий вид которых исследован в работе (Richard P. Brent). Там же указано, что формируемые рекуррентными соотношениями последовательности могут быть получены и с помощью соотношения $U_n = U_0^n \bmod G(x)$, где $G(x)$ - характеристический полином, что легло в основу алгоритма генерации. Низкая трудоемкость вычисления элементов последовательности с произвольными номерами достигается применением полиномов вида $G(x) = \sum_{i=0}^k a_i x^{2^i - 1}$ и алгоритма бинарного умножения (Д.Кнут). При определении коэффициентов $G(x)$ использованы таблицы

факторизации чисел вида $2^{2^n-1}-1$, приведенные в работе (John Brillhart, D.H.Lehmer, J.L.Selfridge, Bryant Tuckerman, and S.S.Wagstaff). Разработаны алгоритмы формирования ПСЧ длины $2^{255}-1$, $2^{511}-1$, $2^{1023}-1$ бит, что соответствует 10^{76} , 10^{153} , 10^{307} вещественных чисел.

Основные результаты работы

- Разработана вычислительная среда, включающая алгоритмы и программы обработки на многопроцессорных вычислительных системах сеточных данных, средства распределенного ввода-вывода, декомпозиции, сжатия и визуализации нерегулярных сеток.
- Предложена модель и создана система распределенной визуализации трехмерных результатов вычислительных экспериментов.
- Предложен и изучен ряд алгоритмов декомпозиции нерегулярных графов. Предложенные алгоритмы обеспечивают выполнение статической и динамической балансировки загрузки процессоров при моделировании сеточных задач на МВС с общей и распределенной памятью.
- На примере численного моделирования ряда задач механики сплошной среды показана эффективность применения предложенных методов на многопроцессорных системах и метакомпьютерах.

Публикации по теме диссертации

1. *Якововский М.В.* Обработка сеточных данных на распределенных вычислительных системах. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2004. Вып.2. с. 40-53.
2. *Якововский М.В.* Инкрементный алгоритм декомпозиции графов. // Вестник Нижегородского Университета им. Н.И.Лобачевского. Серия

- «Математическое моделирование и оптимальное управление». 2005. Вып. 1(28). Нижний Новгород: Издательство ННГУ. с. 243-250.
3. *Корнилина М.А., Якобовский М.В.* Моделирование эволюции сложных нелинейных систем на многопроцессорных вычислительных комплексах // М.:Журнал физической химии. 1995. Т.69. N 8. МАИК «Наука» С.1533-1536.
 4. *Дородницын Л.В., Корнилина М.А., Четверушкин Б.Н., Якобовский М.В.* Моделирование газовых течений при наличии химически активных компонентов // М.: Журн. физ. химии. 1997. Т.71, N 12. МАИК «Наука» с. 2275-2281.
 5. *Лапушкин С.С., Бренерман М.Х., Якобовский М.В.* Моделирование динамических процессов фильтрации в перколяционных решетках на высокопроизводительных вычислительных системах. // М.: Математическое моделирование. 2004. Т. 16, № 11. с. 77-88.
 6. *Абалакин И.В., Бабакулов А.Б., Музафаров Х.А., Якобовский М.В.* Моделирование течений умеренно разреженного газа на транспьютерных системах. // Математическое моделирование. 1992. Т.4. N 11. с. 3-18.
 7. *Самарская Е.А., Четверушкин Б.Н., Чурбанова Н.Г., Якобовский М.В.* Моделирование на параллельных вычислительных системах процессов распространения примесей в горизонтах подземных вод // Математическое моделирование. 1994. Т.6. N 4. С.3-12.
 8. *Корнилина М.А., Самарская Е.А., Четверушкин Б.Н., Чурбанова Н.Г., Якобовский М.В.* Моделирование разработки нефтяных месторождений на параллельных вычислительных системах // М.: Математическое моделирование. 1995. Т.7. N 2. с. 35-48.
 9. *Четверушкин Б.Н., Гасилов В.А., Поляков С.В., Карташева Е.Л., Якобовский М.В., Абалакин И.В., Бобков В.Г., Болдарев С.А., Болдырев С.Н., Дьяченко С.В., Кривов П.С., Минкин А.С., Нестеров И.А., Ольховская О.Г., Попов И.В., Суков С.А.* Пакет прикладных программ

- GIMM для решения задач гидродинамики на многопроцессорных вычислительных системах. // М.: Математическое моделирование. 2005. Т. 17 N 6. 2005. с. 58-74.
10. *Якобовский М.В., Суков С.А., Четверушкин Б.Н.* Программа обеспечения оптимального распределения загрузки процессоров в распределенной вычислительной среде на основе методов статической и динамической балансировки. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005613021 от 21 ноября 2005 года.
 11. *Iakobovski M.V.* Parallel Sorting of Large Data Volumes on Distributed Memory Systems. // В кн.: Mathematical modeling: modern methods and applications. The book of scientific articles/edited by Lyudmila A.Uvarova. - Moscow: Yanus-K. 2004. с.153-163.
 12. *Якобовский М.В.* Распределенные системы и сети. Учебное пособие. // М.: МГТУ “Станкин”, 2000, 118 с, ил
 13. *Кулькова Е.Ю., Якобовский М.В.* Решение задач на многопроцессорных вычислительных системах с разделяемой памятью. Учебное пособие. // М.: «Янус-К», 2004. – 32 с.
 14. *Chetverushkin B.N. Kornilina M.A. , Iakobovski M.V.* Parallel Simulation of Oil Extraction Parallel CFD'96 Algorithms and results using advanced computers. Proc. of the Int. Conf., May 20-23 1996, Capri, Italy, (Eds. P.Schiano et al.), Elsevier, Amsterdam. - 1997. - pp. 282-288
 15. *Chetverushkin B.N. Kornilina M.A. Malikov K.Yu. Romanukha N.Yu. , Iakobovski M.V.* Ecological after-effects numerical modelling under methane combustion In: Mathematical Models of Non-Linear Excitations, Transfer, Dynamics, and Control in Condensed Systems and Other Media. Proc. of a Symp., June 29 – July 3 1998, Tver, Russia (Ed. by L.A Uvarova, A.E. Arinstein, and A.V. Latyshev), Kluwer Academic // Plenum Publishers. –

- New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow. ISBN 0-306-46133-1. – 1999, pp.147-152.
16. *Abalakin I.V. Boldyrev S.N. Chetverushkin. B.N. Zhokhova A.V., Iakobovski M.V.* Parallel Algorithm for Solving Flow Problems on Unstructured Meshes 16th IMACS World Congress 2000. Proceedings. Lausanne - August 21-25, Switzerland, 2000
 17. *Karasev D.E. Krinov P.S. Polyakov S.V. , Iakobovski M.V.* Visualisation of grand challenge data on distributed systems Mathematical Models of Non-Linear Excitations, Transfer, Dynamics, and Control in Condensed Systems and Other Media. Proc. of a Symp. , June 27 - July 1 2000, Moscow, Russia (Ed. by L.A. Uvarova), Kluwer Academic // Plenum Publishers. - New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow. ISBN 0-306-46664-3, 2001, pp. 71-78
 18. *B.Chetverushkin, N.Churbanova, N.Romanyukha, M.Iakobovski.* Simulation of combustion problems using multiprocessor computer systems. Parallel Computational Fluid Dynamics: New Frontiers and Multi-disciplinary Applications. Proc. of the Parallel CFD 2002 Conference. Kansai Science City, Japan (May 20-22, 2002). (Ed. By K.Matsuno et al.), Elsevier, Amsterdam. 2003. pp. 141-148.
 19. *Boldyrev S.N., Sukov S.A., Iakobovski M.V.* Big Unstructured Mesh Processing on Multiprocessor Computer Systems. Parallel Computational Fluid Dynamics: Advanced numerical methods software and applications. Proc. of the Parallel CFD 2003 Conference Moscow, Russia (May 13-15, 2003) (Ed. By B.Chetverushkin et al.), Elsevier, 2004. – pp. 73-79
 20. *Krinov P.S., Muravyov S.V., Iakobovski M.V.* Large Data Volume Visualization on Distributed Multiprocessor Systems. Parallel Computational Fluid Dynamics: Advanced numerical methods software and applications. Proc. of the Parallel CFD 2003 Conference Moscow, Russia (May 13-15, 2003) (Ed. By B.Chetverushkin et al.), Elsevier, Amsterdam, 2004. – pp.433-438

21. *Корнилина М.А., Леванов Е.И., Романюха Н.Ю., Четверушкин Б.Н., Якобовский М.В.* Моделирование газового течения с химическими реакциями на многопроцессорной системе. В кн.: Применение математического моделирования для решения задач в науке и технике. Сб. трудов междунар. конф. «Математическое моделирование в науке и технике» (ММНТ'98). Отв. ред. М.Ю.Альес. Изд-во ИПМ УрО РАН. Ижевск, 1999, С.34 - 48
22. *Корнилина М.А., Четверушкин Б.Н., Якобовский М.В.* Моделирование фильтрации двухфазной жидкости в водонапорном режиме на высокопроизводительном модуле POWER PC-601 Препринт ИММ, 1995. N 12. 17 с.
23. *Chetverushkin B.N., Kornilina M.A., Sukov S.A., Iakobovski M.V.* Methane combustion simulation on multiprocessor computer systems Mathematical Modeling. Problems, methods, applications, Proc. of the Fourth International Mathematical Modeling Conference, June 27 - July 1 2000, Moscow, Russia (Ed. by L.A. Uvarova, A.V. Latyshev), Kluwer Academic, Plenum Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow. ISBN 0-306-46664-3, 2001, pp. 53-59
24. *Якобовский М.В.* Параллельные алгоритмы сортировки больших объемов данных. В сб. "Фундаментальные физико-математические проблемы и моделирование технико-технологических систем", вып. 7, под ред. Л.А. Уваровой. М., Изд-во "СТАНКИН", 2004. с. 235-249
25. *Samarska J.A. Czetwierszkin B.N. Lewanow J.I. Jakobowski M.W. Czurbanowa N.G., Iakobovski M.V.* Modelowanie matematyczne rozchodzenia sie zanieczyszczen w wodach podziemnych. (The mathematical modeling of pollution spreading in the subsoil water.) Zeszyty Naukowe politechniki rzeszowskiej. Elektrotechnika z.16. Nr 141. 1996. p. 111-129
26. *Карасев Д.Е., Якобовский М.В.* Визуализация газодинамических течений на многопроцессорных системах в распределённых компьютерных

- сетях. В кн.: *Фундаментальные физико-математические проблемы и моделирование технико-технологических систем: Сб. науч. тр. / Под ред. Л.А. Уваровой.* - М.: МГТУ "Станкин", 1998, - с. 55-57
27. *Карасев Д.Е., Якобовский М.В.* Визуализация газодинамических течений на многопроцессорных системах в распределённых компьютерных сетях. *Фундаментальные физико-математические проблемы и моделирование технико-технологических систем: Сборник научных трудов. Вып. 3. Под редакцией Л.А.Уваровой.* М.: Изд. «Станкин», 2000, с.160-168
28. *Абалакин И.В., Болдырев С.Н., Жохова А.В., Четверушкин Б.Н., Якобовский М.В.* Параллельный алгоритм расчета газодинамических течений на нерегулярных сетках. В кн.: *Фундаментальные физико-математические проблемы и моделирование технико-технологических систем: Сб. науч. тр. Вып. 3. Под ред. Л.А. Уваровой.* - М.: Издательство "Станкин", 2000. с. 41-45
29. *Абалакин И.В., Болдырев С.Н., Жохова А.В., Леванов Е.И., Четверушкин Б.Н., Якобовский М.В.* Применение иерархических методов разбиения нерегулярных сеток в расчетах газодинамических течений на многопроцессорных системах *Теория сеточных методов для нелинейных краевых задач. Материалы Третьего Всероссийского семинара. Казань-2000.* – изд-во Казанского общества. – 2000. с. 7-10
30. *Корнилина М.А., Якобовский М.В.* Динамическая балансировка загрузки процессоров при моделировании задач горения *Материалы Всероссийской научной конференции "Высокопроизводительные вычисления и их приложения". Черноголовка-2000: Москва, МГУ, 2000.* с. 34-38. <http://parallel.ru/ftp/chg2000/>
31. *Корнилина М.А., Якобовский М.В.* Метод построения параллельных алгоритмов моделирования задач газовой динамики с химическими процессами. *Труды четвертой международной конференции по математи-*

- ческому моделированию, Москва, 27 июня-1 июля 2000. М.: Изд. «Станкин», 2001., с. 115-125
32. *Кринов П.С., Поляков В.С., Якобовский М.В.* Визуализация в распределённых вычислительных системах результатов трёхмерных расчётов. Труды четвертой международной конференции по математическому моделированию, Москва, 27 июня-1 июля 2000. М.: Изд. «Станкин», 2001., с. 126-133
33. *Суков А.И., Суков С.А., Якобовский М.В.* Использование многопроцессорных систем с распределенной памятью для математического моделирования поля внутри безэховой камеры прямоугольной формы с однородным покрытием стенок В кн.: *Фундаментальные физико-математические проблемы и моделирование технико-технологических систем: Сб. науч. тр., Выпуск 4 / Под ред. Л.А. Уваровой.* – М.: Издательство "Станкин", 2001. с. 183-191
34. *Болдырев С.Н., Леванов Е.И., Суков С.А., Якобовский М.В.* Обработка и хранение нерегулярных сеток большого размера на многопроцессорных системах Сеточные методы для краевых задач и приложения. Материалы четвертого Всероссийского семинара. Казань: Издательство Казанского математического общества. – 2002. с. 33-39
35. *Кринов П.С., Якобовский М.В.* Визуализация в распределенных вычислительных системах результатов численных экспериментов. Сеточные методы для краевых задач и приложения. Материалы четвертого Всероссийского семинара. Казань: Издательство Казанского математического общества. – 2002. стр.69-74
36. *Кринов П.С. Муравьев С.В., Якобовский М.В.* Сжатие и визуализация триангулированных поверхностей // VI-я научная конференция МГТУ "Станкин" и "Учебно-научного центра математического моделирования МГТУ "Станкин" – ИММ РАН". Программа, сборник докладов. - М.: Янус-К, ИЦ МГТУ "Станкин", 2003, с. 32-42.

37. *Кринов П.С., Муравьев С.В., Якобовский М.В.* Визуализация данных большого объёма в распределённых многопроцессорных системах. В кн.: Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах. Материалы 3-го Международного научно-практического семинара. 13-15 ноября 2003. Изд.-во Нижегородского Госуниверситета. Нижний Новгород. - 2003, с. 81-88
38. *Суков С.А., Якобовский М.В.* Обработка трехмерных неструктурированных сеток на многопроцессорных системах с распределённой памятью. В сб. "Фундаментальные физико-математические проблемы и моделирование технико-технологических систем", вып. 6, под ред. Л.А. Уваровой. М., Изд-во "СТАНКИН", 2003. с. 233-239
39. *Кринов П.С., Якобовский М.В.* Визуализация результатов численных экспериментов на многопроцессорных системах и метакомпьютерах. В сб. "Фундаментальные физико-математические проблемы и моделирование технико-технологических систем", вып. 7, под ред. Л.А. Уваровой. М., Изд-во "СТАНКИН", 2004. с. 229-234
40. *Четверушкин Б.Н., Гасилов В.А., Поляков С.В., Абалакин И.В., Карташова Е.Л., Попов И.В., Кринов П.С., Суков С.А., Бобков В.Г., Минкин А.С., Якобовский М.В.* Пакет прикладных программ GIMM для решения больших задач гидродинамики на многопроцессорных вычислительных системах. В кн.: Параллельные вычисления в задачах математической физики. Ростов-на-Дону. (ред. Б.Н.Четверушкин, Л.А.Крукиер) Сб. Трудов Всероссийской Научно-Технической конференции. Изд-во РГУ, 2004, с 141-158.