ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Востокина Сергея Владимировича

на диссертацию Рыбакова Алексея Анатольевича

«Методы и средства повышения производительности программ для моделирования объектов со сложной геометрией»,

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.5. «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей»

Актуальность темы

В настоящее время при решении современных расчетных задач компьютерного моделирования крайне актуальным является обработка сложных геометрических форм, в частности это касается проектирования современных образцов техники, где форма существенно влияет на ключевые характеристики разрабатываемого изделия. Работа Рыбакова Алексея Анатольевича рассматривает вопросы моделирования объектов со сложной геометрией, которая в процессе проведения расчетов претерпевает изменение. В работе делается акцент на задачу моделирования обледенения поверхности летательного аппарата, которая в настоящее время обладает высокой актуальностью в применении к стратегическому приоритету по освоению Арктики и обеспечению безопасности полетов. В работе решаются задачи, направленные на повышение производительности программ, используемых на современных высокопроизводительных системах для моделирования объектов со сложной геометрией. Создание новых методов и инструментов ускорения таких программ также обладает актуальностью, так как позволяет повысить эффективность использования высокопроизводительных вычислительных систем в задачах проектирования новых образцов современной техники.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов, их научная новизна

В работе получены новые результаты, которые использованы при создании программных средств, применяемых для моделирования объектов со сложной геометрией. Предложены новые методы обработки поверхностных расчетных сеток, описывающих сложную эволюционирующую границу расчетной области. Проанализированы известные методы перестроения поверхностной сетки, выявлен

недостаток этих методов, заключающийся в развитии возникающих локальных дефектов при перестроении, разработан и теоретически обоснован новый лишенный этого недостатка метод перестроения. Предложены другие новые решения, относящиеся к выполнению расчетов с использованием поверхностных неструктурированных сеток. Выполнено исследование методов повышения производительности программ с помощью распараллеливания вычислений на распределенной памяти, на общей памяти и с помощью объединения инструкций в векторные команды, предложены и теоретически обоснованы новые методы повышения производительности программ при распараллеливании вычислений. Выполнена апробация результатов в программных инструментах «Кристалл», «Кристалл 2023», GridMaster и других, которые внедрены в работу таких организаций, как НИЦ «Курчатовский институт», ЦИАМ им. П.И. Баранова, Национальный центр вертолетостроения имени М.Л. Миля и Н.И. Камова.

Степень обоснованности научных положений и достоверность результатов

В работе приведены сведения, подтверждающие достоверность полученных результатов. Так, предложенный метод перестроения поверхностной неструктурированной сетки, способный сглаживать локальные дефекты, был разработан с целью повышения надежности перестроения, что и было продемонстрировано в результате вычислительных экспериментов. Эффективность разработанных методов и алгоритмов повышения производительности программ при распараллеливании на распределенной и общей памяти и на уровне отдельных инструкций подтверждена экспериментами, проведенными на высокопроизводительных вычислительных системах Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН и НИЦ «Курчатовский институт», в ходе которых было зафиксировано существенное повышение производительности программ при выполнении расчетов по моделированию процесса обледенения, газодинамических процессов и других программных кодов.

Апробация результатов работы и общая характеристика публикаций автора

Основные положения исследования отражены в 42 научных публикациях, из них 30 статей в изданиях, рекомендованных ВАК (20 статей индексировано в RSCI, 5 статей категории К-1 Перечня ВАК, 10 работ индексировано в базах данных Web of Science и Scopus). Результаты диссертации реализованы в программных кодах, на которые получено 8 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и содержание диссертации

Структура диссертационной работы: введение, пять глав, заключение, список сокращений, а также список литературы, насчитывающий 383 наименования. Работа содержит 337 страниц, дополненных 126 иллюстрациями, 9 таблицами и 17 фрагментами кода (листингами).

Введение содержит обоснование актуальности темы, формулировку цели и задач исследования, а также описание теоретической и практической значимости результатов и положений, выносимых на защиту.

Первая глава содержит обзор темы исследования, описываются существующие решения, ставится конкретная практическая задача, представляющая собой моделирование тел со сложной геометрией – моделирование ледяного покрова на поверхности обтекаемого тела.

Вторая глава содержит результаты и положения работы, относящиеся к геометрической составляющей моделирования тел со сложной геометрией. Сформулирована проблема изменения геометрии поверхности тела во время выполнения расчетов, приведены постановка, обоснование и реализация метода перестроения поверхностной сетки, позволяющего повысить надежность вычислений при моделировании обледенения. Также в главе приведены методы удаления самопересечений поверхностной сетки и метод погруженной границы в трехмерной постановке с фиктивными ячейками.

Третья глава посвящена распараллеливанию вычислений между узлами вычислительной системы для блочно-структурированной сетки, для которой поддержан функционал дробления блоков.

Четвертая глава посвящена распараллеливанию вычислений между узлами вычислительной системы, а также между параллельными потоками для поверхностной неструктурированной сетки.

Пятая глава посвящена распараллеливанию вычислений путем объединения скалярных инструкций в векторные аналоги для микропроцессоров с поддержкой векторных инструкций с векторными масками.

В заключении подводится итоговый вывод работы. Перечислены основные полученные результаты, которые легли в основу программного обеспечения компьютерного моделирования. Перечислены разработанные программные инструменты и организации, в которых эти инструменты внедрены.

По автореферату можно судить о содержании диссертации: он позволяет достоверно оценить основные результаты и степень их научной обоснованности.

Замечания

Работа отличается высоким качеством и научной ценностью, однако в ней можно отметить ряд недостатков.

1. В работе в явном виде не указаны технические ограничения предложенных методов пересчета положения пространственной сетки. В частности, не указано, пригодны ли они для случая уменьшения поверхности зоны обледенения при включении противообледенительной системы.

2. Исследуемые в работе алгоритмы балансировки вычислений путем дробления расчетных областей базируются на схеме вычислений с чередованием фаз обмена границ и расчета области. В тексте диссертации без рассмотрения остался вопрос о совмещении во времени фаз обмена и расчета.

3. Методы устранения конфликтов при обращении к общей памяти при обновлении состояния смежных ячеек (п. 4.2) гарантированно улучшают производительность. Однако по приведенным экспериментальным данным (на рис. 4.19) сложно судить, на сколько улучшение существенно. Это связанно с тем, что производительность распараллеливания цикла (например, директивой #pragma omp for) для рассматриваемой задачи может сильно зависеть от способа распределения итераций по потокам (выбора параметра schedule) и от типа процессора.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение

Диссертация Рыбакова Алексея Анатольевича «Методы и средства повышения производительности программ для моделирования объектов со сложной геометрией», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук, является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения в области разработки математического и программного обеспечения для моделирования объектов со сложной геометрией на высокопроизводительных вычислительных системах, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне и соответствует: пунктам 1, 3, 8 паспорта специальности 2.3.5. «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей»; квалификационным критериям, которым должны отвечать диссертация на соискание ученой степени доктора наук, изложенным в пунктах 9-11, 13 и 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением

Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 в действующей редакции; требованиям ВАК при Минобрнауки России. Автор диссертации Рыбаков Алексей Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.5. «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей».

Доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры программных
систем федерального государственного
автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Самарский национальный
исследовательский университет имени
академика С.П. Королева»

Востокин Сергей Владимирович

«24» сентября 2026 г.