

## АННОТАЦИЯ

диссертационной работы Сақыпбековой Меруерт на тему: «Оптимальные раскладки памяти и коммуникационные шаблоны для параллельных неструктурированных CFD-кодов», представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «6D075100 – Информатика, вычислительная техника и управление»

**Актуальность темы исследования.** Высокоточное гидродинамическое моделирование, как правило, связано с большими вычислительными требованиями, острыми с каждым новым поколением суперкомпьютеров. Тем не менее, в настоящее время необходимы значительные исследования, чтобы раскрыть вычислительную мощность передовых систем, называемых ранее экафлопсовыми системами, основанными на более совершенных архитектурах. На вычислительной машине распараллеливание кода собственной разработки для численных вычислений становится обычным явлением. По мере развития численных решателей и сложности задач растут и возможности параллельных вычислений. Различные предложенные схемы используются для распараллеливания с помощью центральных процессоров и графических процессоров.

Ранее высокопроизводительные вычисления производились в больших кластерах компьютеров, каждый из которых мог выполнять небольшое количество параллельных потоков. Однако в последнее десятилетие графические процессоры общего назначения (GPU) продемонстрировали большой рост производительности. Каждый графический процессор может одновременно выполнять тысячи потоков с более низкими издержками. Хотя этот тип производительности изначально был разработан для поддержки видеоприложений, они стали необходимы для научных вычислений и ускорения работы алгоритмов машинного обучения.

В настоящее время заслугой CFD является разработка новых и усовершенствованных устройств и системных структур, а также оптимизация существующего оборудования за счет компьютерного моделирования, что приводит к повышению эффективности и снижению эксплуатационных расходов. С быстрым развитием компьютерных технологий вычислительная гидродинамика (CFD) играет важную роль в анализе аэродинамических характеристик, эффективном проектировании и исследовании сложного механизма потока.

Высокопроизводительные вычисления на графических процессорах общего назначения (GPGPU) со сложными связанными симуляциями с нетривиальными разложениями в области реализуются с помощью заполнения пространства кривой Гильберта (SFC) при использовании неструктурированных вычислительных сеток.

**Цель диссертационной работы:** Целью настоящей работы является применение схемы заполнения пространства кривой Гильберта при использовании неструктурированной вычислительной сетки для различных

ресурсоемких физико-технических задач на графических процессорах общего назначения. Предложенная схема позволяет повысить эффективность комплексного моделирования на основе измерений производительности во время моделирования. Подход позволяет автоматизировать распределение вычислительной сетки на одномерные массивы, которые можно использовать для эффективного распределения рабочей нагрузки.

**Задачи исследования**, реализующие цель диссертационной работы:

- численное исследование эффективности высокопроизводительных вычислений на графических процессорах общего назначения для циркуляционного несжимаемого вязкого течения в каверне;
- численное исследование эффективности высокопроизводительных вычислений на графических процессорах общего назначения для задач несжимаемого вязкого течения за обратным уступом при использовании структурированных вычислительных сеток;
- численное исследование эффективности высокопроизводительных вычислений на графических процессорах общего назначения для задач несжимаемого вязкого течения за обратным уступом с помощью заполнения пространства кривой Гильберта при использовании неструктурированных вычислительных сеток.

**Объект исследования** являются высокопроизводительные вычисления на графических процессорах общего назначения со схемой заполнения пространства кривой Гильберта для неструктурированных вычислительных сеток для различных ресурсоемких физических задач.

**Методы исследования.** В данной диссертационной работе предлагаются методы, которые являются новым инструментом в исследовании распределения нагрузки на различные процессоры при использовании неструктурированных вычислительных сеток. Схема заполнения пространства кривой Гильберта позволяет повысить эффективность при разложении вычислительной сетки на домены.

Для численных расчетов в работе применяются параллельные численные алгоритмы на графических процессорах общего назначения, а полученные результаты сравниваются с расчетными и экспериментальными данными других известных авторов.

**Предметом исследования** являются эффективные высокопроизводительные вычисления на графических процессорах общего назначения (GPU) с применением технологии CUDA для численного решения уравнения Пуассона, циркуляционного несжимаемого вязкого течения в каверне и задач несжимаемого вязкого течения за обратным уступом.

**Теоретическая и практическая ценность.** Результаты, представленные в настоящей работе, могут быть широко применены при решении важных прикладных задач, которые связаны с численным моделированием на графических процессорах общего назначения с применением технологии CUDA. Разработанные схемы и численные алгоритмы предназначены для численного моделирования на графических процессорах общего назначения

(GPU) вносят непосредственный вклад в развитие науки и в сфере информационных технологий страны.

Практическая ценность данной диссертационной работы состоит в том, что используемая схема заполнения пространства кривой Гильберта для неструктурированных вычислительных сеток на графических процессорах общего назначения (GPU), позволяет не только получать существенно «быстрый», по сравнению с последовательными вычислениями результат, но и расширяет возможности реализации трудоемких методов и алгоритмов для решения важных прикладных и фундаментальных задач.

**Научная новизна.** В работе разработана оптимальная раскладка памяти и коммуникационные шаблоны распараллеливания для неструктурированных вычислительных сеток на графических процессорах общего назначения для повышения эффективности производительности массивно-параллельных вычислений. Таким образом, данный подход применяется для различных ресурсоемких физических задач при использовании неструктурированной вычислительной сетки с помощью заполнения пространства кривой Гильберта.

**Положения, выносимые на защиту:**

– результаты численного исследования эффективности высокопроизводительных вычислений на графических процессорах общего назначения для различных ресурсоемких физических задач;

– обоснование использования различных раскладов памяти и коммуникационных шаблонов на графических процессорах общего назначения для различных ресурсоемких физических задач;

– эффективное использования схемы высокопроизводительного вычисления на графических процессорах общего назначения со сложными связанными симуляциями с нетривиальными разложениями в области с помощью заполнения пространства кривой Гильберта при использовании неструктурированных вычислительных сеток.

**Объем и структура работы.** Общий объем работы – 90 страниц. Диссертационная работа состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка используемых источников из 84 наименований, 2 приложения, включая 46 рисунков и 7 таблиц.

**Основное содержание работы.** Данная работа представлена в следующем порядке.

**Во введении** обсуждаются актуальность выбранной темы диссертационной работы, цель, объект, предмет и задачи исследования. Описаны полученные результаты проведенных исследований, их научная новизна и практическая значимость.

**Первый раздел** был посвящен анализу современных систем высокопроизводительных вычислений для прикладных задач. Описаны расчеты с помощью многоядерных CPU и основные принципы расчетов на GPU. В конце этой главы мы представляем анализ и оценку эффективности высокопроизводительных вычислений на CPU и GPU.

**Во втором разделе** представлена математическая модель для

моделирования. В этой главе обобщаются основные уравнения гидродинамики: уравнение неразрывности, уравнение движения сплошной среды. Описаны обезразмеривание и дискретизация уравнений Навье-Стокса.

**В третьем разделе** рассматривалось решение уравнения Пуассона в некоторой прямоугольной области, охватывающего широкий класс прикладных задач. Применяя данное уравнение был представлен численный расчет на CPU и GPU, на основании данного расчета был сделан сравнительный анализ, который показал эффективность параллельного численного алгоритма.

**В четвертом разделе** рассматривается задача несжимаемого вязкого течения в каверне. На основе данной задачи получен результат эффективности на GPU с применением разных размеров блока. Сделан сравнительный анализ времени процессора и графического процессора производительности, показавший значительное увеличение скорости графического процессора. Данное сравнение вычислительного времени показывает преимущество технологии GPU в решении инженерных задач, требующих интенсивных численных вычислений. Анализ числа потоков в блоке, возможно, наиболее важного параметра распараллеливания в CUDA, показывает наличие оптимального значения. Этот результат является простым, но мощным методом оптимизации CUDA, который значительно влияет на общее время обработки.

**В пятом разделе** представлены результаты смешанно-конвективного теплопереноса в процессе ламинарного двумерного течения в вертикальном канале в структурированных и неструктурированных сетках. Численно исследуется широкий диапазон условий течения на входе и температур стенки, охватывающий область от чисто вынужденного конвективного течения. В данном разделе показан результат использования задач несжимаемого вязкого течения за обратным уступом на структурированных и неструктурированных сетках, на основе применения распараллеливания в технологии CUDA с использованием схемы заполнения пространства кривой Гильберта. Результаты данного исследования, которые применялись для неструктурированной сетки впервые, показали совпадения на структурированных и неструктурированных сетках.

**В заключении** представлены выводы данной диссертационной работы.

**Список публикации:**

1. Issakhov, A., Zhandaulet, Y., Abylkassyomova, A., Sakypbekova, M., & Issakhov, A. (2021). Mixed convection in a channel with buoyancy force over backward and forward facing steps: The effects of inclination and geometry. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 101152
2. Issakhov, A., Abylkassyomova, A., Sakypbekova, M. (2019). Applications of Parallel Computing Technologies for Modeling the Flow Separation Process behind the Backward Facing Step Channel with the Buoyancy Forces. *Communications in Computer and Information Science, CITech 2018, CCIS 998*, 2019, pp. 97–113,

3. Исахов А.А., Сақыпбекова М.Ж. Құрылымды емес торды қолдануда есептеу гидродинамикасындағы параллельді технологиялардың теориялық негізі. Конференция «XLI Международная научно - практическая конференция на тему; «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика»», уровень Международный, КАЗАХСТАН, КазАТК имени Тынышпаева, г. Алматы, 03.04.2017-04.04.2017

4. Сақыпбекова М.Ж. CPU және GPU негізіндегі гетерогенді жүйелердің есептеу қуатына қолжетімділікті жеңілдету үшін оренасс-ты пайдалану// «Төртінші өнеркәсіптік революция жағдайындағы дамудың жаңа мүмкіндіктері» атты ҚР Президенті Н. Назарбаевтың Жолдауын іске асыру шеңберінде «Көліктегі инновациялық технологиялар: білім, ғылым, тәжірибе» атты ХЛІІ Халықаралық ғылыми-практикалық конференцияның материалдары. 18 сәуір 2018 жыл, 2 том, 87-90.

5. Сақыпбекова М.Ж. Эллиптикалық типтегі тендеуді сандық және компьютерлік шешу. Вестник КазНУ, КАЗАХСТАН, рекомендуемый ККСОН МОН РК, 2017 г., №3,

6. Исахов А.А., Абылкасымова А.Б., Сақыпбекова М.Ж. Применение параллельных вычислительных технологий для моделирования процесса отрыва течения за обратным уступом в канале с учетом сил плавучести// Вестник КазНУ имени аль-Фараби. Серия математика, механика, информатика, № 1(97) 2018: 143-158.

7. Исахов А.А., Абылкасымова А. Б., Сақыпбекова М.Ж. Applications of parallel computing technologies for modeling the mixed convection in backward-facing step flows with the vertical buoyancy forces. «International Journal of Mathematics and Physics», КАЗАХСТАН, рекомендуемый ККСОН МОН РК, издательство: «International Journal of Mathematics and Physics 8», №2, 43(2017)

8. Issakhov, A. Abylkassymova, M. Sakypbekova. Applications of parallel computing technologies for modeling of the wind flow around the architectural obstacles with the vertical buoyancy forces. «Известия НАН РК. Серия физико-математическая», №4(320), июль – август 2018 г. 48-57

9. Сақыпбекова М.Ж. Екі өлшемді ағынды модельдеуде гидродинамиканың негізгі тендеуін сандық шешу. Вестник КазНУ, КАЗАХСТАН, рекомендуемый ККСОН МОН РК, 2018 г., №3, 482-486

10. Сақыпбекова М.Ж. Разработка эффективного высокопроизводительного вычисления для решения уравнения Пуассона. Вестник ЕНУ, Серия технические науки и технологии, КАЗАХСТАН, рекомендуемый ККСОН МОН РК, №2(139)/2022, 24-29

11. Сақыпбекова М.Ж., Исахов А.А. Разработка эффективного высокопроизводительного вычисления для задачи несжимаемого вязкого течения за обратным уступом. Авторлық құқықпен қорғалатын объектілерге құқықтардың мемлекеттік тізілімге мәліметтерді енгізу туралы куәлік. №25762, 4 мамыр 2022 жыл.