

В диссертационный совет Д 801.02.06
при ФГАУ ВО «Южный федеральный
университет»

**ОТЗЫВ
ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
ЛЕГАЛОВА АЛЕКСАНДРА ИВАНОВИЧА,**

доктора технических наук,
профессора департамента программной инженерии
факультета компьютерных наук

Национального исследовательского университета
«Высшая школа экономики»,

на диссертационную работу Дордопуло Алексея Игоревича на тему
«Теоретические основы технологии ресурснезависимого
программирования гибридных вычислительных систем»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических
наук по специальности 2.3.5 — Математическое и программное
обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных
сетей, технические науки

1. Актуальность темы исследования

Параллельные вычислительные системы используются в государственных, промышленных и научно-технических организациях при решении задач, требующих большого объёма сложных вычислений, в таких областях как гидро- и газодинамика, ядерная физика, вычислительная химия и биология, прогнозирование погоды и моделирование различных процессов естественного и техногенного характера. Постоянно возрастающие требования к повышению производительности вычислительных систем и расширению областей их эффективного применения сформировали такое направление в области высокопроизводительных вычислений как гибридные вычислительные системы, являющиеся композицией вычислительных узлов с различной архитектурой: универсальных процессоров, графических ускорителей, систем на кристалле, программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Гибридные вычислительные системы (ГВС) занимают ключевые позиции в списке TOP500, что подтверждает их перспективность для параллельных вычислений.

Развитие архитектуры и элементной базы высокопроизводительных вычислительных систем сопровождается совершенствованием технологий программирования. При этом создание программ, сочетающих эффективное

использование специфики целевой архитектуры с возможностью эффективной адаптации к различным параллельным вычислительным архитектурам является актуальной задачей. Программирование гибридных вычислительных систем осложняется отсутствием обобщающей технологии программирования для вычислительных узлов, в которых используются различные архитектурные и структурные решения. Это ведет к разработке программ программных модулей для каждой подсистемы, что затрудняет перенос ранее созданных параллельных программ к новым архитектурам и конфигурациям ГВС. Одной из основных причин сложного программирования ГВС является отсутствие теоретической, методической и технологической основы для описания вычислений, свободных от архитектурных ограничений, а также от особенностей конфигурации вычислительной системы и производительности ее отдельных подсистем. Поэтому исследование теоретических основ программирования гибридных вычислительных систем, обеспечивающих сокращение времени адаптации параллельных программ к различным архитектурам и конфигурациям ГВС, является актуальной научной проблемой. Наличие технологии программирования гибридных вычислительных систем позволит существенно сократить сроки и стоимость разработки и корректировки программ при изменении конфигурации системы и улучшить ее технико-экономические и эксплуатационные показатели.

2. Научная новизна положений, выводов и рекомендаций диссертационного исследования

В диссертации предложены новые научные понятия и положения, разработаны принципы и методы, позволяющие повысить переносимость параллельных программ между архитектурами ГВС с различной конфигурацией. В ходе решения сформулированной научной проблемы проведены теоретические и практические исследования. Полученные результаты обладают научной новизной. Среди них можно отметить:

- 1) модель параллельных вычислений для гибридных вычислительных систем на основе информационного графа задачи, отличающаяся от известных единой для различных вычислительных архитектур формой описания вычислений в виде кадровой структуры;
- 2) новое представление кадровой структуры с использованием вычислительного ресурса как параметра параллельно-конвейерной реализации задачи на не заданном заранее ресурсе гибридной вычислительной системы;
- 3) принципы преобразования кадровой структуры к архитектуре и конфигурации гибридной вычислительной системы с помощью редукции производительности;

4) теоремы о применении методов редукции производительности для преобразования кадровой структуры к архитектуре и конфигурации гибридной вычислительной системы;

5) метод преобразования кадровой структуры и сокращения аппаратных затрат с помощью редукции производительности, отличающийся использованием доступного аппаратного ресурса гибридной вычислительной системы как параметра портации;

6) метод преобразования и сокращения аппаратных затрат кадровой структуры на основе синтеза последовательности микро-кадров, выполняющих вычисления структурно с сокращенной степенью параллелизма на ограниченном доступном ресурсе (меньшем ресурса аппаратной реализации базового подграфа);

7) метод преобразования задач, содержащих связанные информационной зависимостью подзадачи с разной степенью параллелизма, отличающийся от известных согласованной редукцией производительности различных по вычислительной трудоемкости кадровых структур с синтезом сбалансированного по интервалу обработки данных решения;

8) основы теории ресурснезависимого программирования гибридных вычислительных систем, объединяющие совокупность предложенных научных понятий и положений, выявленных закономерностей и принципов, разработанных методов и алгоритмов портации в достаточную для синтеза рационального решения задачи методику;

9) алгоритмы функционирования инструментальных программных средств технологии ресурснезависимого программирования гибридных вычислительных систем.

3. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

При решении поставленной в диссертации проблемы использовались известные и хорошо зарекомендовавшие себя методы исследования. Научные положения, выводы и рекомендации обоснованы и в достаточной мере аргументированы. Достоверность предложенных теоретических моделей подтверждается экспериментальными результатами, полученными при апробации разработанных программных средств и подтвержденными актами внедрения в различных организациях и предприятиях.

4. Значимость результатов диссертации для науки и практики

Диссертация вносит вклад в развитие теории программирования параллельных вычислительных систем. Предложенные теоретические основы, разработанные методы и алгоритмы портации прикладных программ и

программные средства представляют технологию ресурсонезависимого программирования гибридных вычислительных систем для решения задач различных классов. Практическая значимость технологии ресурсонезависимого программирования гибридных вычислительных систем состоит в возможности создания автоматического распараллеливающего компилятора для систем с распределенной памятью, позволяющего сократить время портации программ.

5. Оценка содержания диссертации

Материал диссертационного исследования хорошо структурирован и логично изложен. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 248 наименований и приложений. Работа содержит 348 страниц, 87 рисунков, 17 таблиц и три приложения.

Во введении представлена общая характеристика работы: обоснована актуальность, сформулированы цель, объект, предмет и задачи диссертации.

Первая глава посвящена рассмотрению основных вычислительных архитектур, используемых в гибридных вычислительных системах, и технологий их программирования, по результатам которого сформулированы основные теоретические принципы, необходимые для ресурсонезависимого программирования гибридных вычислительных систем.

Во второй главе рассмотрено представление вычислений для гибридных вычислительных систем, для разных целевых архитектур предложена единая модель и правила ее преобразования к ресурсонезависимому представлению в виде кадровой структуры. Дано определение портации как зависящего от доступного ресурса ГВС преобразования параметров параллелизма кадровой структуры, определены локальная и глобальная цели портации и предложены способы их достижения.

В третьей главе предложены методы и механизмы преобразования кадровой структуры к целевым архитектурам гибридной вычислительной системы. Основным способом являются редукционные преобразования производительности кадровой структуры (по числу подграфов, устройств, разрядности, интервалу обработки данных и частоте). Сформулированы и доказаны три теоремы о применении редукций и оценено их количество при достижении локальной и глобальной целей портации, разработаны методика и алгоритмы преобразования кадровой структуры.

Четвертая глава посвящена методам и алгоритмам преобразования прикладных задач. Выделено несколько типов задач, для которых предложены методы портации и алгоритмы для согласованного преобразования информационно-зависимых подзадач с различной степенью параллелизма.

В пятой главе представлено описание разработанных программных средств технологии ресурсонезависимого программирования. Приведены

результаты портации задач с различными типами информационной зависимости на гибридные вычислительные системы разных архитектур и конфигураций.

Заключение содержит основные выводы, полученные при решении научной проблемы, и рекомендации по возможным направлениям дальнейших исследований. В приложениях рассмотрена специфика редукционных преобразований для типовых кадровых структур, представлены акты внедрения результатов работы и результаты портации ряда прикладных задач.

6. Подтверждение достаточной полноты публикаций основных положений, результатов, выводов и заключения диссертации

Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись на международных и всероссийских конференциях. По теме работы опубликовано 170 работ, из которых 29 индексируется в международных базах Web of Science и Scopus, 36 работ – в журналах из списка ВАК РФ, 15 свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ. Использование результатов диссертационного исследования в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах подтверждается актами внедрения.

7. Соответствие диссертации критериям, установленным в разделе 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в ЮФУ в редакции от 30.11.2021 №260-ОД

Полученные при проведении исследований результаты и выводы оригинальны и актуальны. Практическое воплощение разработанных методов и алгоритмов в программных средствах технологии ресурснезависимого программирования позволили сократить время портации прикладных задач для гибридных вычислительных систем различных архитектур и конфигураций при заданном уровне реальной производительности. Диссертация соответствует критериям, установленным в разделе 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в ЮФУ в редакции от 30.11.2021 №260-ОД.

8. Замечания

К содержанию работы имеются следующие замечания:

1. Предложенный термин «ресурснезависимое программирование гибридных вычислительных систем» содержит внутреннее противоречие, объединяя независимость от ресурсов и конфигурации вычислительной системы с ориентацией на определенный класс – гибридных вычислительных систем.

2. Не обоснован приоритет применения редукции по подграфам по сравнению с редукцией по числу устройств и разрядности для преобразования максимально параллельной кадровой структуры.

3. Автор утверждает, что все индукционные и редукционные преобразования независимы и ортогональны, но в диссертации не описано взаимное влияние редукционных и оптимизационных преобразований, например, взаимодействие редукции по устройствам с вложенным конвейером в общем виде.

4. Не представлены примеры портации задач на архитектуру графических ускорителей.

Перечисленные замечания не влияют на полученные теоретические и практические результаты, не снижают уровень и значимость проведённого автором научного исследования.

Заключение

Диссертация Дордопуло Алексея Игоревича является завершённой научно-квалификационной работой, в которой представлено решение актуальной для параллельных вычислений научной проблемы, имеющей важное научное и хозяйственное значение. Сформулированные положения и выводы обоснованы, а результаты достоверны. Содержание основных научных трудов и автореферата соответствует диссертации. Диссертация соответствует критериям, установленным в разделе 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в ЮФУ в редакции от 30.11.2021 №260-ОД.

Полученные соискателем научные результаты диссертационной работы по уровню проведенных исследований, актуальности, новизне и практической ценности соответствуют требованиям п. 1 («Модели, методы и алгоритмы проектирования, анализа, трансформации, верификации и тестирования программ и программных систем») в части «Модели, методы и алгоритмы проектирования и трансформации программ» и п.8 («Модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования») в части «модели и методы создания программ для параллельной обработки данных», а также «инструментальные средства параллельного программирования» паспорта специальности 2.3.5 «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей».

Считаю, что автор диссертационной работы, Дордопуло Алексей Игоревич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.5 - Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей, технические науки.

Официальный оппонент,
доктор технических наук,
профессор
департамента программной
инженерии
факультета компьютерных наук
Национального исследовательского
университета
«Высшая школа экономики»



Легалов Александр Иванович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ),

109028, г. Москва, Покровский б-р, 11
Телефон: +7 (495) 531-00-00, (28240)
E-mail: alegalov@hse.ru

«3» 09 2023 г.