# ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Баранова Антона Викторовича «Методы и средства управления вычислительными ресурсами в суперкомпьютерных системах коллективного пользования», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей.

**Актуальность темы исследования**

В представленной работе А.В. Баранова рассмотрена актуальная задача исследования, разработки, развития и применения методов и средств управления суперкомпьютерными ресурсами в центрах коллективного пользования. Суперкомпьютеры являются сложными и дорогостоящими системами, построенными на базе новейших архитектурных и технических решений. Жизненный цикл суперкомпьютерных систем сравнительно короток, как правило, моральное устаревание высокопроизводительного вычислительного оборудования наступает раньше физического износа. Постоянное усложнение архитектуры суперкомпьютеров, увеличение числа процессорных узлов и ядер, повышение степени их разнородности, короткий жизненный цикл обуславливают необходимость эффективного использования дорогостоящих вычислительных ресурсов. Решение этой задачи за счет разработки комплекса архитектурных, технических и технологических решений для управления суперкомпьютерными ресурсами соискатель обозначил как цель своей работы.

Поскольку суперкомпьютеры эксплуатируются преимущественно в режиме коллективного пользования, соискатель рассматривает процессы управления вычислительными ресурсами в рамках иерархической системы обработки потоков пользовательских заданий. Под заданиями в контексте диссертации понимаются запросы пользователей на предоставление суперкомпьютерных ресурсов для выполнения прикладных программ. В качестве главной научной задачи диссертации определено создание отечественной системы управления заданиями, обладающей качественными и количественными характеристиками на уровне мировых систем-лидеров. Создаваемая система должна базироваться на новой архитектуре, отражающей иерархический характер процессов управления суперкомпьютерными ресурсами. В условиях ограничений доступа к зарубежным технологиям и разработкам сохранение научно-технических компетенций в области создания и развития систем управления заданиями видится актуальной научной задачей, решение которой способствует сохранению технологического суверенитета Российской Федерации.

В рамках создания системы управления заданиями для достижения цели работы соискатель формулирует и решает ряд актуальных научных задач. Рассматривая разнородность потоков пользовательских заданий различных классов, разнообразие требований пользователей к вычислительным ресурсам при решении ими прикладных задач, соискатель

формулирует и решает задачу разработки методов и средств планирования заданий, обеспечивающих эффективное распределение заданий по вычислительным ресурсам суперкомпьютера. Говоря о необходимости повышения быстродействия прикладных программ, автор диссертации предлагает решение задачи оптимизации отображения прикладных программ на структуру вычислительных узлов суперкомпьютера. Отмечая сложность и высокие накладные расходы процессов организации параллельных вычислений с распараллеливанием по данным, соискатель ставит задачу автоматизации этих процессов за счет разработки соответствующих методов и средств, обеспечивающих снижение накладных расходов по сравнению с известными решениями.

Таким образом, следует признать актуальными и важными представленные в диссертации как общее направление исследований, так и сформулированные соискателем частные научные задачи.

**Структура и содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации – 295 страниц, в том числе 79 рисунков, 22 таблицы и список литературы из 242 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи исследования. Представлены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна работы, приведены сведения о примененных методах исследования, теоретической и практической значимости результатов диссертации. Представлен перечень 30 научных конференций, на которых производилась апробация результатов работы.

**В первой главе** в п. 1.1 автор представил типовую архитектуру суперкомпьютерной системы коллективного пользования, в рамках этой архитектуры в п. 1.2 рассмотрел понятие задания и его жизненный цикл, в п. 1.3 – основные задачи управления вычислительными ресурсами в типовой суперкомпьютерной системе коллективного пользования. В п. 1.4 сформулированы основные требования к разрабатываемой системе управления заданиями, краткий обзор ведущих систем управления заданиями представлен в п. 1.5.

Центральными разделами первой главы являются пп. 1.6-1.7, в которых автором предложены иерархическая модель управления вычислительными ресурсами суперкомпьютера, состоящая из пяти уровней принятия решений, и основанная на этой модели архитектура отечественной Системы управления прохождением параллельных заданий (СУППЗ). Соответствие предложенной архитектуры выдвинутым требованиям показано в п. 1.8. П. 1.9 демонстрирует историческую преемственность архитектуры СУППЗ с момента ее первого применения в суперкомпьютерах серии МВС-1000.

П. 2.1 **второй главы** посвящен обзору технических и технологических решений для управления вычислительными ресурсами суперкомпьютерных систем коллективного пользования, предложенных и реализованных автором в составе СУППЗ на разных уровнях иерархической модели. В п. 2.2

произведено сравнение СУППЗ с ведущими мировыми системами управления заданиями по набору качественных характеристик. В п. 2.3 определены количественные показатели эффективности систем управления заданиями, и по набору этих показателей в п. 2.4 представлено экспериментальное сравнение СУППЗ и лидирующей системы SLURM. Приведенные в пп. 2.2, 2.4 результаты сравнения показали соответствие СУППЗ мировому уровню. П. 2.5 содержит результаты эксплуатации СУППЗ на ведущих отечественных суперкомпьютерах различной архитектуры. Результаты представляют собой обобщенные статистические данные о числе пользователей, научных и образовательных организаций, применивших суперкомпьютеры под управлением СУППЗ для реализации своих исследовательских проектов.

**Третья глава** посвящена предложенным соискателем методам планирования заданий разных классов. П. 3.1 содержит обзор существующих методов планирования для разных классов заданий. Рассмотрены задания с фиксированными требованиями к ресурсам, адаптивные задания, которые могут изменять свои требования исходя из наличия и объема свободных ресурсов, а также нестандартные задания в виде виртуальных машин и контейнеров. В п. 3.2 задача планирования заданий рассмотрена в свете теории массового обслуживания.

В п. 3.3 рассмотрен предложенный соискателем новый метод планирования заданий с фиксированными параметрами. В соответствии с методом все поступающие задания делятся на классы ординарных (пакетных), отладочных и фоновых заданий. Фоновые задания могут периодически прерываться системой управления и возвращаться в очередь. За счет фоновых заданий реализуется возможность проведения длительных по времени расчетов, при этом в среднем фоновые задания проходят очередь быстрее ординарных. Для отладочных заданий рассмотрен механизм плавающего резерва, за счет которого удается обеспечить одновременно высокий темп обработки отладочных заданий и сохранить высокую загрузку суперкомпьютера.

П. 3.4 посвящен обработке адаптивных заданий методом постпланирования, предложенным соискателем. За счет оперативного отслеживания и заполнения адаптивными заданиями динамических окон в расписании запусков заданий основного потока метод позволяет максимизировать загрузку суперкомпьютера при незначительном ухудшении других показателей качества. При помощи имитационного моделирования автор определил границу применения метода постпланирования – загрузка суперкомпьютера основным потоком заданий не должна превышать 0,85.

В п. 3.5 рассмотрены методы совмещения управления суперкомпьютерными ресурсами с облачными платформами. За счет предложенных методов автору удалось обеспечить совместную обработку потоков стандартных заданий и заданий, представленных в виде виртуальных машин и контейнеров.

**В четвертой главе** рассмотрена задача отображения параллельной программы на вычислительные узлы суперкомпьютера. В п. 4.1 задача формально сформулирована как поиск отображения информационного графа параллельной программы на граф свободных узлов суперкомпьютера. П. 4.2 содержит обзор существующих решений задачи отображения.

В п. 4.3 рассмотрен предложенные соискателем двухэтапный метод и алгоритмы поиска отображения программного графа на граф свободных узлов. На первом этапе при помощи разработанного автором алгоритма разрезания графа свободных узлов на два минимально связанных друг с другом подграфов производится выбор требуемого числа узлов. Выбранные узлы задействуются на втором этапе для выполнения предложенного соискателем параллельного эвристического алгоритма поиска оптимального отображения информационного графа программы на граф выбранных узлов. Двухэтапный метод и алгоритмы отображения были применены для выполнения тестовых и прикладных программ на суперкомпьютере МВС-1000, где позволили заметно увеличить быстродействие расчетов.

П. 4.4 посвящен развитию параллельного эвристического алгоритма. За счет циклической смены фаз имитации отжига и генетического отбора автору удалось добиться точности и быстродействия алгоритма, превосходящих известные решения.

**В пятой главе** в п. 5.1 сформулирована задача организации параллельных вычислений с распараллеливанием по данным. Обзор известных технологий распараллеливания по данным приведен в п. 5.2. В п. 5.3 рассмотрен предложенный соискателем метод иерархического разделения данных, а в п. 5.4 – архитектура программного комплекса (ПК) «Пирамида», реализующего предложенный метод. В п. 5.5 приведены результаты экспериментального сравнения ПК «Пирамида» с известными технологиями распараллеливания по данным. П. 5.6 представляет архитектуру гибридного ПК XP-COM, которая позволила преодолеть выявленные в ходе сравнения недостатки ПК «Пирамида». Результаты экспериментов показывают, что предложенный метод иерархического деления данных за счет разделения входного пула данных на наборы упорядоченных элементарных вычислительных работ позволяет обеспечить как низкие по сравнению с другими решениями накладные расходы на распараллеливание, так и отказоустойчивость параллельных вычислений.

**В заключении** кратко сформулированы основные результаты и выводы диссертации, приведены сведения об их внедрении в практику ряда научных и промышленных организаций, а также в учебный процесс подготовки специалистов.

**Научная новизна диссертационной работы** заключается в следующих результатах:

– новые методы планирования, совмещающие обработку классов ординарных, отладочных, фоновых и адаптивных заданий, в том числе представленных в виде виртуальных машин и контейнеров;

– новый двухэтапный метод отображения параллельной программы на вычислительные узлы суперкомпьютера: на первом этапе производится выделение вычислительных узлов для параллельной программы и тем самым сокращается размер задачи отображения, на втором этапе выделенные узлы используются для выполнения параллельного алгоритма поиска отображения;

– новый эвристический алгоритм выделения вычислительных узлов для задания, основанный на разрезании графа свободных вычислительных узлов на два минимально связанных друг с другом подграфа при помощи имитации отжига;

– новый параллельный алгоритм поиска отображения программного графа на граф вычислительных узлов с использованием циклической смены фаз имитации отжига и генетического отбора;

– новый метод иерархического деления данных для организации параллельных вычислений с распараллеливанием по данным, за счет разделения входного пула данных на наборы упорядоченных элементарных вычислительных работ обеспечивающий компактное представление состояния вычислений и низкие накладные расходы на распараллеливание;

– новая архитектура системы управления заданиями пользователей, основанная на иерархической модели управления вычислительными ресурсами суперкомпьютерной системы коллективного пользования.

**Достоверность результатов и выводов** диссертации подтверждается:

– публикацией результатов исследования в ведущих рецензируемых отечественных и зарубежных изданиях;

– апробацией результатов диссертации на 30 международных и всероссийских научных конференциях;

– многолетним положительным опытом применения разработанной соискателем Системы управления прохождением параллельных заданий (СУППЗ) в суперкомпьютерных центрах коллективного пользования Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН – НИЦ «Курчатовский институт», ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и в других научных, образовательных и промышленных организациях;

– статистикой суперкомпьютеров под управлением СУППЗ, свидетельствующей об эффективности предложенных соискателем методов планирования заданий;

– результатами экспериментов по сравнению с существующими известными решениями, предложенных в диссертации метода и алгоритмов отображения параллельной программы на вычислительные узлы суперкомпьютера, а также метода и программных комплексов распараллеливания по данным;

– результатами имитационного моделирования систем управления заданиями, подтверждающими эффективность предложенного соискателем метода постпланирования.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Ход исследования, методика проведения и результаты экспериментов и имитационного моделирования раскрыты в диссертации с достаточной полнотой. Изложение материала по тексту работы последовательно и логично. Стиль изложения выдержан и не допускает двояких толкований. Приведенные автором аргументы убедительны и в совокупности с результатами экспериментов, анализа статистики суперкомпьютеров и имитационного моделирования позволяют говорить о достаточной степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Значительная часть диссертации посвящена сравнению предложенных автором методов, алгоритмов и средств с ведущими мировыми техническими и технологическими решениями. Итоги сравнения позволяют констатировать соответствие результатов диссертации мировому уровню.

**Ценность для науки и практики результатов работы**

Представленные в диссертации архитектурные, технические и технологические решения реализованы в составе Системы управления прохождением параллельных заданий (СУППЗ), которая применялась и применяется в ведущих отечественных суперкомпьютерах МВС-1000, МВС-1000/16, МВС-1000/32, МВС-1000М, МВС-15000ВМ, МВС-6000ІМ, МВС-100К, МВС-10П, МВС-Экспресс, К-100, К-60. Услугами СУППЗ за 25 лет воспользовались более 1240 ученых из 135 организаций при реализации свыше 530 исследовательских проектов с применением высокопроизводительных вычислений. Указанные данные свидетельствуют о высокой практической востребованности результатов диссертационной работы. Разработанная автором система управления заданиями составляет основу цифровой экосистемы суперкомпьютерных центров коллективного пользования МСЦ РАН – НИЦ «Курчатовский институт» и ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и предоставляет доступ к высокопроизводительным вычислительным ресурсам отечественных суперкомпьютеров широкому кругу исследователей.

Теоретические положения и накопленный практический опыт, представленные в диссертации, могут служить основой дальнейшего развития методов и средств построения систем управления вычислительными ресурсами и организации параллельных вычислений в суперкомпьютерных центрах.

**Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати**

Рассматривая полученные результаты, автор приводит в тексте диссертации и автореферата соответствующие ссылки на свои научные публикации. Анализ этих публикаций подтверждает, что основные

результаты диссертации опубликованы в научной печати. Всего по теме диссертации автором опубликовано 45 печатных работ, из них 27 работ опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, в том числе 20 работ – в журналах, входящих в индекс RSCI, 4 работы – в журналах, входящих в список К1 перечня ВАК, 15 работ – в журналах, индексируемых в международных базах научных изданий Web of Science и Scopus. По теме диссертации получено 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных.

**Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации.**

Автореферат содержит полные сведения об актуальности исследования, цели и задачах диссертационной работы, выносимых на защиту положениях и их научной новизне, а также об основных публикациях по теме диссертации. Содержание глав диссертации раскрыто в автореферате с достаточной для его объема полнотой. Считаю, что автореферат диссертации адекватно отражает ее содержание.

**Замечания по работе**

1. В аргументации актуальности работы автором не дано четкое обоснование рисков использования зарубежных бесплатных планировщиков заданий с открытым исходным кодом, например, SLURM.
2. В диссертации не затронуты вопросы применения предложенных автором методов и средств для управления вычислительными ресурсами суперкомпьютеров на базе отечественных аппаратных решений, например, микропроцессоров семейства «Эльбрус» и коммуникационной сети «Ангара». Последняя упоминается в тексте работы, но при этом нет никаких рассуждений о возможности применения для этой сети разработанных автором решений, например, алгоритмов отображения параллельной программы на структуру узлов суперкомпьютера.
3. В работе отсутствует информация о возможно существующих аналогичных отечественных системах управления заданиями. Сравнения проводятся только с зарубежными аналогами.
4. В работе следовало бы рассмотреть ближайшие и среднесрочные перспективы развития систем управления заданиями, а также определенные в соответствии с этими перспективами направления дальнейших исследований по тематике диссертации.

**Заключение по работе**

Отмеченные недостатки не снижают значимости полученных автором результатов и общей положительной оценки диссертации. Представленная работа свидетельствует о высокой научной квалификации автора, обладает внутренним единством, представляет завершенное исследование на актуальную тему, имеет ярко выраженную практическую направленность и является научно-квалификационной работой, в которой на основании

выполненных автором исследований предложены новые научно обоснованные архитектурные, технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие научных суперкомпьютерных центров коллективного пользования, как неотъемлемой части исследовательской инфраструктуры страны.

Считаю, что диссертационная работа А.В. Баранова удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям по специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей», а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по этой специальности.

**Официальный оппонент**
доктор технических наук (специальность 05.13.05 – элементы и устройства вычислительной техники и систем управления), профессор, главный научный сотрудник АО «МЦСТ»

Владимир Марткович Фельдман

«17» 11 2025 г.

Подпись Фельдмана Владимира Мартковича заверяю

Начальник отдела кадров АО «МЦСТ» (Ж.В. Фоменко)

«17» 11 2025 г.

Сведения об организации:

Акционерное общество «МЦСТ»
117437, Москва, ул. Профсоюзная, д. 108; +7-495-363-96-65; электронная почта: mcst@mcst.ru; адрес в сети Интернет: http://www.mcst.ru