

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию  
Горобца Андрея Владимировича  
«Параллельные технологии математического моделирования  
турбулентных течений на современных суперкомпьютерах»,  
представленную на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 –  
«Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Уровень современных вычислительных технологий сегодня позволяет рассчитать, смоделировать или предсказать практически любой объект, процесс или явление. Этому способствует значительный прогресс в развитии численных методов, методов математического моделирования, технологий параллельного программирования. На это же, в конечном итоге, нацелено и развитие вычислительной техники, производительность которой растет с поразительным постоянством уже много лет, давая возможность реально браться за решение задач с предельно высокой вычислительной сложностью.

Быстрое развитие вычислительной техники идет по всей вертикали, от мобильных устройств, до суперкомпьютерных систем. Если современные смартфоны стали параллельными и по своей производительности догнали суперкомпьютеры начала 90-х годов, то можно представить те колоссальные изменения и возможности, которые скрывают современные суперкомпьютеры. Характерная производительность лучших образцов – это петафлопсы ( $10^{15}$ ), и активно обсуждается готовность перехода к системам эксафлопсного уровня производительности (а это уже  $10^{18}$  операций в секунду). Подобный рост производительности сопровождается и стремительным увеличением степени параллелизма вычислительных систем, который наблюдается на всех уровнях архитектуры. Если сегодня суперкомпьютеры содержат десятки тысяч узлов и миллионы ядер, то в эксафлопсных системах число параллельно работающих ядер приблизится к миллиарду. Значительный рост степени параллелизма

характерен не только для “внешних” параметров систем: подобные изменения происходят и уровне одного узла, и на уровне отдельной карты, и на уровне процессора. Типичный пример – это современные сопроцессоры, NVIDIA GPU или Intel Xeon Phi. Степень параллельности процессора Intel Xeon Phi уже сегодня приближается к 2000 и не похоже, чтобы развитие не продолжилось и далее.

Безусловно, рост степени параллелизма определяет возможность роста производительности компьютерных систем. Но одновременно он накладывает и очень жесткие требования на все звенья цепочки, из которой складывается решение задачи. Если в суперкомпьютере степень параллельности измеряется миллионами, то на каждом звене цепочки подобная степень должна быть эффективно поддержана. Если во взятом за основу алгоритме не будет сравнимого ресурса параллелизма, то в результате и потенциал суперкомпьютера не будет в полной мере использован. Если выбранная технология параллельного программирования не имеет возможности эффективно выразить имеющийся параллелизм, опять-таки на достойный результат рассчитывать не приходится. И так по всем этапам решения задачи. Увы, но вывод следует весьма жесткий: получить эффективное решение задачи на современном суперкомпьютере можно только в том случае, если на каждом этапе ее решения (на каждом звене цепочки) будут приняты решения, не ограничивающие свободу в использовании особенностей архитектуры целевых машин на всех последующих этапах. Из особенностей архитектуры выделяют, как правило, две основные: доступный параллелизм и структура памяти, и именно их аккуратное использование и должно быть согласовано по всем этапам.

Совокупность методов и средств, направленных на обеспечение подобного согласования, сегодня выделено в отдельное понятие, которое носит название “технологии суперкомпьютерного кодизайна”. Очень важное и очень непростое понятие, которое определяет новую область исследований. Важность определяется тем, что если технологии суперкомпьютерного кодизайна удастся

успешно применить для решения некоторой задачи, то задача будет решена исключительно эффективно. По этой причине правительство США, понимая перспективность данных исследований, образовало и финансирует три центра суперкомпьютерного кодизайна, каждый из которых сориентирован на решение своей задачи: проектирование атомных реакторов нового поколения, моделирование процессов горения и создание новых материалов для работы в экстремальных условиях. Суперкомпьютерный кодизайн – это область действительно новая, где нет установившихся подходов и методов, где не всегда даже есть установившиеся названия для базовых понятий. И область заведомо не простая, поскольку исследовать и принимать в расчет нужно многое, а значит и экспертом нужно быть во многих областях одновременно: от физической модели и алгоритмов, до нюансов работы операционных систем и особенностей архитектуры компьютеров. Хотя автор и не использует в работе словосочетания “суперкомпьютерный кодизайн”, но по смыслу именно на эту область и направлена данная диссертационная работа, что, несомненно, делает **актуальной избранную тему исследований.**

Содержательная часть диссертационной работы разумно организована и состоит из 6 глав следующего содержания. В первой главе автор обсуждает и выбирает подходы для эффективной реализации алгоритмов решения задач газовой динамики применительно к современным суперкомпьютерным системам. Глава очень хорошо покрывает существующие технологии и одновременно, опираясь на идеи суперкомпьютерного кодизайна, содержит критический анализ того, что необходимо для решения задач данного класса. Заложив многоуровневость параллелизма современных суперкомпьютеров в основу, во второй главе автором предлагается новый алгоритм повышенной точности для проведения расчетов на неструктурированных сетках, на основе которого, в свою очередь, проектируется программный комплекс NOISEtte, детально описанный в третьей главе диссертации. Приводятся интересные примеры расчетов по разработанным методикам с использованием комплекса NOISEtte для задач исследования механизмов генерации шума, расчета

акустических нагрузок и ряда других на суперкомпьютерных системах от небольших размеров до систем петафлопсного уровня. В четвертой главе автор описывает новый подход к построению решателя уравнения Пуассона, который, в результате, работает быстрее существующих аналогов. Пятая глава посвящена описанию разработанного программного комплекса STG-CFD&HT, предназначенного для крупномасштабных расчетов несжимаемых турбулентных течений на гибридных суперкомпьютерах. В заключительной, шестой главе, описано целое множество масштабных расчетов, проведенных на большом числе суперкомпьютерных систем, и опирающихся на исследования автора, его методы и разработанные программные комплексы.

Подобный спектр эффективно решаемых задач (см. главу 6) прекрасно подтверждает **высокую степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**, сформулированных в диссертации, а также показывает большой потенциал использования разработанных автором подходов и инструментов на практике. Обоснованность и достоверность результатов диссертации подтверждены активным использованием результатов научных работ отечественных и зарубежных авторов в области решения задач моделирования турбулентных течений, детальным анализом существующих понятий и подходов, свойственных решению больших задач на суперкомпьютерных системах.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в разработке комплекса уникальных подходов, методов и инструментов, опирающихся на технологии суперкомпьютерного кодизайна и ориентированных на крупные расчеты турбулентных течений с использованием современной суперкомпьютерной техники. На основе глубокого понимания особенностей всех основных этапов решения задач, автор предложил, обосновал и апробировал методы их согласования, высокое качество которых убедительно продемонстрировано результатами решения большого числа практически значимых задач.

Идеями суперкомпьютерного кодизайна у автора пропитана вся работа. Возьмем главу 3, где описан комплекс NOISEtte. Автор абсолютно справедливо рассматривает все существенные этапы, без которых нельзя эффективно решить поставленную задачу: анализируется математическая модель, рассматриваются нюансы построения и декомпозиции сетки, исследуется и аккуратно проектируется вычислительное ядро, которое с необходимостью должно опираться на гибридные технологии программирования MPI+OpenMP, а в завершение представлен анализ полученной производительности и эффективности. Только так и должно быть. Только согласование всех этапов может дать отличный результат, где, в частности, особенности архитектуры диктуют структуру всех остальных этапов решения задачи. Аналогично и в четвертой главе, посвященной разработке решателя уравнения Пуассона, где автор опять-таки опирается на идеи суперкомпьютерного кодизайна, что позволяет автору получить преимущество над существующими разработками.

Соответствие содержания и результатов диссертации специальности 05.13.18 подтверждается соответствием по следующим пунктам:

- 1) Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.
  - Разработан параллельный метод решения уравнения Пуассона для моделирования несжимаемых турбулентных течений, позволяющий проводить расчёты на десятках тысяч процессоров и на гибридных суперкомпьютерах с ускорителями различной архитектуры. Принципиальное отличие нового метода от известных аналогов – высокая эффективность при расчётах задач с одним периодическим направлением при использовании схем произвольного порядка точности.
- 2) Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

- На основе разработанной технологии и алгоритмов созданы программные комплексы (NOISEtte и STG-CFD&HT) для крупномасштабных расчётов с использованием суперкомпьютеров с десятками тысяч процессоров, а также гибридных суперкомпьютеров.

3) Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

- Разработан новый комплексный подход к математическому моделированию турбулентных течений на суперкомпьютерах с экстра-массивным параллелизмом. Он включает методику разработки алгоритма в рамках многоуровневой параллельной модели, технологию гетерогенной программной реализации для гибридных суперкомпьютеров с массивно-параллельными ускорителями и технологию выполнения крупных расчётов.

В качестве замечаний по данной диссертационной работе хотелось бы отметить следующее.

В представленной работе автор много внимания (и это правильно) уделяет эффективности разрабатываемых методов и инструментов. Без эффективного использования большого числа процессорных ядер, ускорителей и вычислительных узлов использование и самих суперкомпьютеров под большим вопросом. Но для завершения картины хотелось бы видеть не только исследование “параллельной эффективности” предложенных программных комплексов, но и эффективности как той доли от пиковых показателей используемых вычислительных систем, которой удалось достичь при решении реальных задач на реальных суперкомпьютерных системах.

Приводя результаты большого числа вычислительных экспериментов, которые можно найти во всех главах представленной работы, автор далеко не всегда подробно описывает исходные условия вычислительных экспериментов, что необходимо для правильной интерпретации качества полученных решений. В частности, многие упоминаемые в работе суперкомпьютеры включают в свой

состав ускорители, а были ли ускорители задействованы в расчетах или же использовались только x86-ядра, это отмечено не всегда.

Последнее замечание относится, скорее, не к замечаниям, а к разряду пожеланий. Прочитав серьезное исследование подходов к решению задач расчетов турбулентных течений, очень хочется в завершение увидеть рекомендации автора, какой же должна быть архитектура идеального компьютера для решения задач данного класса. В частности, именно так и поступили разработчики суперкомпьютера ANTON, предназначенного для решения задач молекулярной динамики и показывающего сейчас в этой области рекордные результаты. Это было бы исключительно логичной точкой, завершающей исследование в духе суперкомпьютерного кодизайна, однако прекрасно понимаю и то, что над подобным “завершением” темы работают большие коллективы, что вряд ли под силу одному человеку...

Обсуждение подобных замечаний не меняет значимости и никак не влияет на оценку качества данной диссертационной работы, выполненной на высоком научном уровне.

На основании выполненных автором серьезных теоретических исследований в диссертации четко изложены научно обоснованные решения, показывающие, что работа является новым крупным достижением в теории и практике решения крупных вычислительно сложных задач расчета турбулентных течений с использованием суперкомпьютерных вычислительных систем. Автореферат диссертации верно отражает основное содержание работы. Диссертационная работа А.В.Горобца “Параллельные технологии математического моделирования турбулентных течений на современных суперкомпьютерах” представляет собой законченную научно-квалификационную работу по специальности 05.13.18, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, удовлетворяет критериям, установленным Положением о порядке присуждения

ученых степеней, а ее автор, Горобец Андрей Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор,  
заместитель директора Научно-исследовательского вычислительного центра  
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (НИВЦ  
МГУ)



Воеводин Владимир Валентинович

10 ноября 2015 г.

119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 4

Телефон 8 (495) 939-51-66, факс 8 (495) 938-21-36

E-mail: voevodin@parallel.ru

Подпись Вл.В.Воеводина удостоверяю  
Директор НИВЦ МГУ, профессор



Тихонравов Александр Владимирович