

## 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»

Диссертационная работа Горобца А.В. посвящена развитию параллельных технологий математического моделирования широкого круга задач газовой динамики на современных суперкомпьютерах различной архитектуры. Предлагаемый автором подход охватывает все этапы математического моделирования и, в первую очередь, формирует новые принципы построения высокоэффективных численных алгоритмов и комплексов программ для суперкомпьютерных расчетов. Применяя разработанный подход к таким сложным и ресурсоемким задачам, коими являются задачи моделирования турбулентных течений, Горобец А.В. получил ряд важных численных результатов, которые могут быть использованы для дальнейшего развития моделей турбулентности. В первую очередь, это результаты моделирования несжимаемых турбулентных течений при вынужденной и естественной конвекции, а также задач внешнего обтекания сжимаемым газом.

Актуальность. В настоящее время становится понятным, что дальнейшее совершенствование характеристик новых летательных аппаратов может быть обеспечено за счет более точного моделирования отрывных турбулентных течений. Проблема моделирования такого рода течений, по сути, является проблемой корректного моделирования разномасштабных вихревых структур. Большие числа Рейнольдса обуславливают появление чрезвычайно мелких вихревых структур, аппроксимация которых требует использования численных схем с очень большим числом степеней свободы, что может быть достигнуто либо за счет привлечения измельченных расчетных сеток, либо за счет использования схем высокого порядка точности. Таким образом, точность моделирования турбулентных отрывных течений ограничивается технической возможностью компьютеров за разумное время обработать гигантские массивы сеточных функций, аппроксимирующих известные уравнения течения вязкой жидкости или газа. В авиационной промышленности актуальность проблемы эффективного использования возможностей архитектуры современных



кластерных систем с целью предсказания аэродинамических и аэроакустических характеристик летательных аппаратов не вызывает сомнений.

Следует отметить, что в Российской Федерации технологии и программное обеспечение распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем внесены в перечень критических технологий.

Диссертационная работа Горобца А.В. состоит из шести глав. В первой главе представлена методика распараллеливания, которая может применяться для создания высокоэффективных параллельных кодов. Особенностью созданной методики является возможность эффективного использования крупных суперкомпьютеров и их современных гибридных архитектур, в которых различным образом могут сочетаться центральные процессоры и ускорители-сопроцессоры.

Во второй и третьей главах представлен разработанный автором параллельный алгоритм и реализующий его комплекс программ NOISEtte, предназначенный, в первую очередь, для расчетов задач нестационарной аэродинамики и аэроакустики.

В четвертой и пятой главах описывается оригинальный параллельный алгоритм на основе нового метода решения уравнения Пуассона и параллельный код для суперкомпьютерного моделирования несжимаемых турбулентных течений.

В заключительной шестой главе представлена серия крупных эталонных расчетов, в которых моделируются различные типы турбулентных течений.

К результатам диссертационной работы, имеющим научную новизну, можно отнести:

- новый комплексный подход к разработке и использованию параллельных кодов для численного моделирования турбулентных течений на суперкомпьютерах сложной гибридной архитектуры;
- эффективный алгоритм с многоуровневым распараллеливанием, реализующий экономичные схемы повышенного порядка точности на неструктурированных сетках;
- разработанный программный комплекс, реализующий все этапы вычислительного эксперимента (постановка задачи, подготовка данных, вычисления, обработка результатов) и ориентированный на расчетные сетки с числом элементов порядка миллиарда;
- достижение высокой масштабируемости (эффективность близка к 80% на  $10^4$  ядрах) при использовании современных параллельных



вычислительных систем в расчетах как сжимаемых, так и несжимаемых течений;

- Алгоритмы перенесены как на графические процессоры, так и на ускорители Intel Xeon Phi. При этом, было продемонстрировано ускорение по сравнению с центральным процессором;

- Проведено прямое численное моделирование нескольких «эталонных» задач для валидации и калибровки полуэмпирических моделей турбулентности.

Научную новизну подтверждает тот факт, что результаты диссертационной работы Горобца А.В. представлены в около ста научных публикациях, из которых около 30 работ содержатся в реферативной базе Scopus.

Обоснованность научных положений, сформулированных в диссертации Горобца А.В., и достоверность научных результатов представляются достаточно хорошо подтвержденными. Результаты работы изложены в большом количестве статей в ведущих международных рецензируемых журналах, а также в многочисленных докладах на международных конференциях. Представленные в диссертации параллельные коды валидированы различными способами, в том числе на задачах, имеющих надежные экспериментальные данные. Эталонные расчеты методом прямого численного моделирования, к качеству которых, естественно, предъявляются особые требования, выполнены по хорошо обоснованной методике: реализация пространственной дискретизации операторов подтверждается широко известным методом MMS (Method of Manufactured Solutions), уделяется внимание обоснованию размеров расчетной области, сеточного разрешения, и т.д.

О практической значимости данной диссертационной работы свидетельствует использование результатов работы в совместных научных исследованиях с большим количеством академических и промышленных партнеров, как российских, так и зарубежных.

К диссертационной работе Горобца А.В. имеются следующие замечания:

В работе отсутствует исторический обзор проблемы, а также обзор современного состояния проблемы в мире с соответствующими ссылками на авторов работающих в данном направлении.

Вторая глава содержит описание численного алгоритма решения задач аэродинамики и аэроакустики *повышенной точности*. Описание

