

Результаты публичной защиты

Дата защиты: 17 октября 2019 г.

Соискатель: **Павлухин Павел Викторович**.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему: «Эффективное решение задач газовой динамики на кластерных системах с графическими ускорителями».

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

На заседании председательствует – Председатель диссертационного совета, член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., профессор В.Ф.ТИШКИН.

Ученый секретарь – к.ф.-м.н. М.А. КОРНИЛИНА.

На заседании из 25 членов диссертационного совета присутствовали 19 чел., из них 6 докторов по профилю рассматриваемой диссертации:

1. ТИШКИН В.Ф.	д.ф.-м.н.	01.01.07
2. КОРНИЛИНА М.А.	к.ф.-м.н.	05.13.18
3. АНДРЕЕВ В.Б.	д.ф.-м.н.	01.01.07
4. ВАСИЛЕВСКИЙ Ю.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
5. ДОЛГОЛЕВА Г.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
6. ЕЛИЗАРОВА Т.Г.	д.ф.-м.н.	01.01.07
7. ЗМИТРЕНКО Н.В.	д.ф.-м.н.	01.02.05
8. КАРАМЗИН Ю.Н.	д.ф.-м.н.	01.01.07
9. КОВАЛЕВ В.Ф.	д.ф.-м.н.	05.13.18
10. КОЗЛОВ А.Н.	д.ф.-м.н.	01.02.05
11. КУЛЕШОВ А.А.	д.ф.-м.н.	05.13.18
12. ЛУЦКИЙ А.Е.	д.ф.-м.н.	01.02.05
13. МАЖУКИН В.И.	д.ф.-м.н.	05.13.18
14. МИЛЮКОВА О.Ю.	д.ф.-м.н.	01.01.07
15. МИХАЙЛОВ А.П.	д.ф.-м.н.	05.13.18
16. ПЕТРОВ И.Б.	д.ф.-м.н.	01.02.05
17. ПОЛЯКОВ С.В.	д.ф.-м.н.	01.01.07
18. ШПАТАКОВСКАЯ Г.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18
19. ЯКОВОВСКИЙ М.В.	д.ф.-м.н.	05.13.18

По результатам публичной защиты диссертационный совет принял следующее заключение:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.024.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 17 октября 2019 г. № 8

О присуждении **Павлухину Павлу Викторовичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Эффективное решение задач газовой динамики на кластерных системах с графическими ускорителями» по специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 12 июля 2019 г. (протокол заседания № 8/пз) диссертационным советом Д002.024.03 на базе ФГУ «ФИЦ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН», 125047, Москва, Миусская пл., д.4, приказ №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель - Павлухин Павел Викторович 1986 года рождения.

В 2010 году соискатель окончил механико-математический факультет Московского государственного университета им М.В. Ломоносова по специальности «механика».

В 2013 соискатель окончил очную аспирантуру отделения механики механико-математического факультета Московского государственного университета им М.В. Ломоносова по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». В настоящее время соискатель работает в должности начальника лаборатории НИО-1 Федерального государственного унитарного предприятия «Научно-исследовательский институт «Квант».

Диссертация выполнена в МГУ им М.В. Ломоносова

Научный руководитель – Меньшов Игорь Станиславович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела № 8 Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

Официальные оппоненты:

Дерюгин Юрий Николаевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института Теоретической и Математической Физики (ИТМФ) Российского Федерального Ядерного Центра — Всероссийского Научно-Исследовательского Института Экспериментальной Физики (РФЯЦ “ВНИИЭФ”);

Семенов Илья Витальевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Отдела вычислительных методов и турбулентности Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт автоматизации проектирования Российской академии наук (ИАП РАН)

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное учреждение Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (г. Москва), в своем **положительном** отзыве, подписанном **Титаревым Владимиром Александровичем**, доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником отдела 24 “Механика” ФИЦ ИУ РАН, и утвержденным **Соколовым Игорем Анатольевичем**, академиком, директором Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» указала, что диссертационная работа Павлухина П.В. является законченным научным исследованием, выполнена автором самостоятельно и удовлетворяет требованиям ВАК, включая пп. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК». Соискатель Павлухин П.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18.

Ведущая организация указала в отзыве, что Павлухиным В.П. предложен новый вариант параллельной версии метода LU-SGS и его комбинация с методом свободной границы. Созданный на основе этих методов программный комплекс позволяет проводить вычисления на сотнях графических ускорителей без заметного падения эффективности счета и/или требуемого числа шагов по времени и может быть использован в институтах РАН и высших учебных заведениях для решения научных и прикладных задач, а также для дальнейшего совершенствования методов решения LU-SGS и подхода со свободной границей.

Соискатель имеет 6 опубликованных работ, все по теме диссертации, из них 5 [1-5] в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

1. *Меньшов И. С., Павлухин П. В.* Эффективный параллельный метод сквозного счета задач аэродинамики на несвязных декартовых сетках // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2016. Т. 56. С. 1677–1691.

2. *Pavlukhin P., Menshov I.* On Implementation High-Scalable CFD Solvers for Hybrid Clusters with Massively-Parallel Architectures // *Parallel Computing Technologies* / ed. By V. Malyshkin. – Cham : Springer International Publishing, 2015. – P. 436–444.

3. *Павлухин П. В., Меньшов И.С.* Эффективная параллельная реализация метода LU-SGS для задач газовой динамики // Научный вестник МГТУ ГА. – 2011. – No 165. – С. 46–55.

4. *Павлухин П. В.* Реализация параллельного метода lu-sgs для задач газовой динамики на кластерных системах с графическими ускорителями // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2013. – No 1. – С. 213–218.

5. *Pavlukhin P., Menshov I.* Highly Scalable Implementation of an Implicit Matrix-free Solver for Gas Dynamics on GPU-accelerated Clusters // *J. Supercomput.* – Hingham, MA, USA, 2017. – Vol. 73, No 2. – P. 631–638.

6. *Меньшов И. С., Павлухин П. В.* Численное решение задач газовой динамики на декартовых сетках с применением гибридных вычислительных систем // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша. – 2014. – No 92. – URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-92>

Общий объем публикаций в изданиях из перечня ВАК - 5.75 п.л., авторский вклад соискателя 3.77 п.л. Вклад соискателя в работы с соавтором является определяющим. Одна статья написана соискателем полностью самостоятельно.

В работе [3] приводятся новый параллельный алгоритм для метода LU-SGS и результаты расчетов двумерных задач с помощью соответствующего разработанного программного комплекса для вычислительных систем с множеством CPU ядер. В работе [4] указанный параллельный алгоритм обобщается на системы с большим числом GPU, приводятся результаты по производительности соответствующего разработанного программного комплекса на одном и множестве графических ускорителей при расчете двумерных задач. В работах [1,6] рассматриваются вопросы адаптации метода свободной границы для эффективного расчета течений в областях сложной формы на системы с графическими ускорителями, приведены результаты решений на согласованных и несогласованных с границей расчетной области сетках, выполнено сравнение двумерных и трехмерных расчетов с результатами, полученными другими методами и программами, указаны также данные по масштабируемости разработанного программного комплекса на 768 GPU. Работы [2,5] посвящены детальному исследованию производительности программного комплекса, в ходе него были выявлены особенности взаимодействия библиотек CUDA и MPI, учет которых позволил повысить масштабируемость разработанного программного комплекса с 81 до 92% на 180 GPU при расчете трехмерных течений.

В совместных с научным руководителем работах соискателем была выполнена адаптация методов свободной границы и LU-SGS под специфику

архитектур вычислительных систем с центральными процессорами и графическими ускорителями, предложены соответствующие параллельные алгоритмы для них, разработаны на их основе программные комплексы, с помощью которых им же проведены расчеты тестовых задач.

Все положения, выносимые на защиту и представленные в диссертации, принадлежат соискателю. Сведения о публикациях соискателя в диссертации достоверны.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

Положительный отзыв **ведущей организации ФИЦ ИУ РАН**. В нем указаны следующие замечания:

1. Используемый в работе численный метод и декартовы расчетные сетки хорошо подходят для решения невязких уравнений, в то время как для практических приложений необходимо учитывать эффекты вязкости и теплопроводности. В работе не рассмотрена возможность обобщения представленных результатов на уравнения вязкого сжимаемого газа.
2. В работе представлен новый вариант параллельной MPI реализации метода LU-SGS, основанный на разбиении сетки на “черные” и “белые” блоки. Насколько применимым является такой подход для произвольных неструктурированных сеток, например тетраэдрических сеток с призматическими пограничными слоями?
3. На наш взгляд, параллельная многопоточная реализация LU-SGS в рамках одной графоплаты существенно использует декартовость расчетной сетки, в отличии, например, от подхода, предложенного в работе *М.Н. Петров, В.А. Титарев, С.В. Утюжников, А.В. Чикиткин. Многопоточная реализация метода LU-SGS с использованием многоуровневой декомпозиции сетки // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2017. Т. 57. N 11. С.1895-1905.* К сожалению, в диссертационной работе не исследована

возможность обобщения предлагаемого метода на неструктурированные сетки, состоящие из произвольных элементов.

4. Список литературы в тексте диссертации содержит опечатки и пропуски фамилий авторов.

Положительный отзыв официального **оппонента Дерюгина Ю.Н.** В отзыве указаны следующие замечания:

1. Имеются ряд опечаток (стр7, формула 2.43,...).
2. Было бы желательно привести описание организации итерационного процесса итерационного решателя LU-SGS.
3. Не показано сравнение по скорости решения СЛАУ в матричной и безматричной форме (безматричная экономит память, допускает совмещение обмена со счетом, но возможно удорожает вычисления), т.е. алгоритм решения СЛАУ высокопараллельный, но возможно медленнее слабопараллельного.
4. Показана идентичность последовательного и параллельного многоцветного алгоритма LU-SGS, но не сказано об ухудшении сходимости многоцветного алгоритма LU-SGS относительно одноцветного алгоритма LU-SGS при одинаковом шаге по времени (или уменьшении шага по времени), косвенно это представлено результатами экспериментов с агрегированной и неагрегированной раскраской (в разделе 5);
5. Представляется, что сравнение производительности 1-го ядра 6-ти ядерного Xeon5670 (TDP 95 ватт) и teslaC2050 (448 шейдерных процессоров) (238 ватт) является не весьма корректным.

Положительный отзыв официального **оппонента Семенова И.В.** В отзыве указаны следующие замечания:

1. К сожалению, в тексте диссертации присутствуют неверные ссылки на источники, в которых не содержится информация, цитирование которой приводится. Так цитируются работы [9] и [67], не содержащие сведений об

использовании LU-SGS алгоритма, в тексте диссертации ссылаются на результаты из работы: *И.В. Семенов, И.Ф. Ахмедьянов*. Разработка параллельного алгоритма LU-SGS для решения многомерных задач вычислительной газодинамики // Материалы Четвертой Сибирской школы-семинара по параллельным и высокопроизводительным вычислениям. Изд-во Томск: Дельтаплан, 2008. С. 122–129, 2008. Более того, описание самого алгоритма в тексте диссертации приведено неверно.

2. В разделе 2.1 работы утверждается, что схема (2.36) «обеспечивает третий порядок точности по пространству и второй порядок по времени». Данное утверждение не доказано, и уже не является верным даже для просто неравномерных сеток, тем более для сеток с пересекаемыми границей твердого тела ячейками. Численное исследование порядка аппроксимации предложенной схемы в работе не представлено. Сама схема (2.36) записана в явной форме для всех ячеек, в которых не вводится компенсационный поток, хотя в тексте на нее ссылаются как на гибридную с промежуточным слоем.

3. В работе не содержится данных о влиянии параметра, определяющего объемную долю включения в пересекаемой профилем ячейке, на скорость сходимости. Это представляется важным, т.к. при уменьшении объема занятого газом в ячейке система становится плохо обусловленной.

4. Для постановок в разделах 5.1 и 5.4 не приведены сведения о числе Куранта, с которым проводились расчеты. Сами постановки задач изложены кратко.

5. В разделе 5.5 представлены результаты расчета тягового устройства с числом Куранта 0.2, при этом время расчета на рисунках составляет 3750 с. По результатам расчета неясно, получен ли в расчетах стационарный режим и какова эффективность данного расчета по сравнению с расчетом, проведенным на связанной с поверхностью устройства сетке.

Положительный отзыв на автореферат доктора физико-математических наук, **Волкова Андрея Викторовича**, ЦАГИ им. проф. Н.Е.Жуковского. В отзыве указаны следующие замечания:

1. Используемые модели и численные методы ограничены случаем идеальной жидкости, в то время как в значительной части практических задач газовой динамики необходим учет вязкости среды.

2. Модель свободной границы, используемая в работе, хоть и позволяет проводить расчеты на декартовых сетках в областях со сложной геометрией, но во многих случаях требуется использование адаптивных сеток, которые, в свою очередь потребуют внесения изменений в предложенные параллельные методы и алгоритмы.

Положительный отзыв **на автореферат** доктора физико-математических наук, **Губайдуллина Ирека Марсовича**, Институт нефтехимии и катализа Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИНК УФИЦ РАН). В отзыве указано следующее замечание:

Выбор программного продукта CUDA для реализации авторского алгоритма существенно ограничивает сферу применения разработанного программного комплекса, т. к. этот программный инструмент ориентирован исключительно на видеопроцессоры компании Nvidia.

Во всех отзывах отмечается, что указанные недостатки не снижают научной и практической значимости полученных результатов и общей положительной оценки работы. Диссертационное исследование полностью удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор, Павлухин Павел Викторович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широко известной компетенцией в вопросах математического моделирования, разработки численных методов и алгоритмов их решения, разработке комплексов проблемно-ориентированных параллельных программ, что подтверждается их

многочисленными публикациями, представленными в сведениях, размещенных на сайте диссертационного совета.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. **Предложена** адаптация метода свободной границы для вычислительных систем с графическими ускорителями;
2. **Разработан новый** параллельный алгоритм расчета задач газовой динамики на основе методов свободной границы и LU-SGS для вычислительных систем с графическими ускорителями;
3. На основе разработанного алгоритма **реализован** параллельный программный комплекс с использованием технологий CUDA и MPI, который позволил проводить расчеты трехмерных течений с масштабируемостью 75% на СК “Ломоносов” при использовании 768 графических ускорителей;
4. **Проведены расчеты** задач газовой динамики, в частности, расчеты течений около профиля NACA0012 и модели самолета DLR F6; полученные результаты показали хорошее соответствие как экспериментальным данным, так и решениям, полученным другими методами и программами; подтверждена корректность и эффективность работы реализованного программного комплекса.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что был **предложен** новый параллельный высокомасштабируемый алгоритм метода LU-SGS для вычислительных систем с большим числом графических ускорителей, **доказана** его корректность. Данный алгоритм выполняет операции эквивалентные операциям своего последовательного прототипа, что позволяет получать решения прикладных задач без уменьшения скорости сходимости при увеличении числа GPU, одновременно задействованных в расчетах, в отличие от других параллельных алгоритмов, точно соблюдающих порядок вычислений в LU-SGS лишь на отдельных подобластях расчетной области.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

1. Разработан программный комплекс, который позволяет значительно сократить время решения прикладных задач газовой динамики, в том числе стационарных задач без жесткого ограничения на выбор шага интегрирования по времени, за счет хорошего масштабирования на большое число графических ускорителей;
2. Разработанный программный комплекс может быть использован как основа для новой версии, работающей с динамически перестраиваемыми адаптивными сетками и учетом вязкости среды;
3. Задействованные в диссертационной работе методики для анализа производительности и масштабируемости разработанного программного комплекса могут быть также применены и для других программных реализаций, написанных с использованием CUDA и MPI, для повышения эффективности их работы.

Оценка достоверности теоретических результатов обосновывается тем, что проведенные математические доказательства полностью корректны. Достоверность численных результатов обеспечивается их хорошим согласованием как с результатами, полученными другими методами и программами, так и с экспериментальными данными.

Личный вклад соискателя состоит в выборе и адаптации методов и моделей для вычислительных систем с графическими ускорителями, разработке параллельного алгоритма метода LU-SGS и его реализации в программном комплексе, а также проведении расчетов тестовых задач, выполнении анализа производительности программной реализации и ее дальнейшей оптимизации.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек (из 24 человек, входящих в состав совета), из них 8

имеющих научную специальность 05.13.18, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Зам. председателя дис. совета Д002.024.03
д.ф.-м.н., член-корр. РАН

В.Ф.Тишкин

Ученый секретарь дис. совета Д002.024.03
к.ф.-м.н.

М.А.Корнилина



17 октября 2019 года