

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата физико-математических наук, доцента Жалнина Руслана Викторовича на диссертационную работу Лашкина Сергея Викторовича на тему: **«Повышение эффективности трехмерного численного моделирования течений вязкой несжимаемой жидкости на произвольных неструктурированных сетках»**, представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Актуальность темы диссертационного исследования

Представленная диссертационная работа посвящена повышению эффективности трехмерного численного моделирования течений вязкой несжимаемой жидкости на произвольных неструктурированных сетках.

Увеличение эффективности численных алгоритмов при моделировании трехмерных вязких несжимаемых течений на произвольных неструктурированных сетках является ключевой задачей современного этапа развития вычислительной гидродинамики. Связано это, в первую очередь, с необходимостью проведения численных экспериментов с использованием сеточных моделей, содержащих сотни миллионов и даже миллиарды расчетных ячеек на многопроцессорных системах, состоящих из десятков тысяч процессорных ядер. Подобное моделирование позволяет значительно расширить круг описываемых физических процессов и повысить точность расчета, особенно на произвольных неструктурированных сетках, являющихся безальтернативным вариантом при расчете промышленно-ориентированных задач.

Для решения подобного класса задач, как правило, используются произвольные неструктурированные сетки, размерность которых может достигать 500 млн. расчетных ячеек, а в некоторых случаях и более. При этом среднее время расчета составляет более 10 часов, а минимально необходимое количество вычислительных ядер – порядка 200.

Если при разработке вычислительных алгоритмов ориентироваться на подобные классы задач, то задача повышения эффективности становится актуальной, так как это позволит сократить общее время счета. С учетом же постоянного возрастания размерности сеточных моделей актуальность темы исследования работы Лашкина С.В. не вызывает сомнений.

Содержание работы

Работа Лашкина С.В. состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемой литературы, включающего 106 наименований. Основное содержание диссертации изложено на 163 страницах и включает 98 иллюстраций.

Во *введении* обосновывается актуальность темы исследования, приводится краткий обзор литературы по данному направлению, ставятся цели и определяются задачи исследования, научная новизна, обосновывается достоверность получаемых результатов, указывается теоретическая ценность и практическая значимость работы, приводятся сведения об апробации результатов исследования и личный вклад автора.

Первая глава диссертационной работы практически полностью посвящена описанию последовательной и параллельной реализации классического алгоритма SIMPLE на основе многосеточного метода с возможностью расчета на десятках тысяч процессоров,

включающая особенности хранения и решения распределенных (параллельных) матриц СЛАУ. Рассмотрены особенности внедрения приведенного алгоритма SIMPLE в пакет программ ЛОГОС, а также проведена всесторонняя верификация на задачах, имеющих экспериментальное и аналитическое решение.

Во *введении первой главы* приводится обзор подходов эффективной параллельной реализации алгоритма SIMPLE на неструктурированных сетках.

В *параграфе 1.2* представлено описание последовательной версии алгоритма SIMPLE для численного решения системы уравнений Навье-Стокса на произвольных неструктурированных сетках для моделирования вязких несжимаемых течений.

В *параграфе 1.3* приведено описание особенностей параллельной реализации алгоритма SIMPLE в рамках пакета программ ЛОГОС с учетом фиктивных ячеек и с возможностью счета на тысячах вычислительных ядер.

В *параграфе 1.4* представлено описание организации пакета программ ЛОГОС и адаптации алгоритма SIMPLE к программной структуре пакета программ ЛОГОС.

В *параграфе 1.5* приведены результаты верификации реализованного метода на серии численных экспериментов моделирования турбулентных течений вязкой несжимаемой и слабосжимаемой жидкости на структурированных (гексаэдральных) и неструктурированных (тетраэдральных и полиэдральных) сетках.

Завершает главу *параграф 1.6*, в котором приводятся выводы.

Во *второй главе* описана реализация совмещенного алгоритма для счета на произвольных неструктурированных сетках на основе многосеточного метода.

В *параграфе 2.2* представлено исследование эффективности параллельного алгоритма SIMPLE, напрямую зависящего от этапа решения СЛАУ. Именно этот ключевой этап требует минимизации количества межпроцессных обменов внутри решателя, что в итоге повысит эффективность алгоритма в целом.

В *параграфе 2.3* приведено описание совмещенного алгоритма для численного решения уравнений Навье-Стокса на неструктурированных сетках с учетом поправки Рхи-Чоу и неортогональной коррекции. В диссертации подробно изложены принципы построения совмещенного алгоритма и способы вычисления коэффициентов блочной матрицы, в том числе и для граничных условий, а также приведен вывод поправки Рхи-Чоу с учетом особенностей совмещенного алгоритма.

В *параграфе 2.4* представлены особенности внедрения совмещенного алгоритма в общую структуру пакета программ ЛОГОС.

В *параграфе 2.5* приведены результаты верификации и тестирования совмещенного алгоритма на серии численных экспериментов, в том числе и на тестовых задачах, на которых проводилась верификация разделенного алгоритма SIMPLE [7, 10].

В *параграфе 2.6* приведены исследования эффективности совмещенного алгоритма COUPLED по сравнению с алгоритмом SIMPLE. Исследования проведены на задачах, наиболее характерных для турбулентной гидродинамики вязкой несжимаемой жидкости на последовательности сгущающихся сеток.

В *конце второй главы* сделаны выводы, что проведенные численные эксперименты продемонстрировали преимущество совмещенного алгоритма. Общее повышение эффективности счета составляет порядка 30%.

В *третьей главе* представлено описание математической модели совмещенного алгоритма для моделирования течений в пористых средах, а также его применение для решения промышленно-ориентированных задач авиационной и атомной промышленности.

В *параграфе 3.2* представлено описание совмещенного алгоритма при моделировании течений в пористых средах. При моделировании течений в пористых средах дополнительно повысить эффективность возможно за счет полностью неявной аппроксимации линейного тензора сопротивления даже в анизотропном случае, что существенно повысит скорость сходимости к уже имеющейся.

В *параграфе 3.3* приведены результаты верификации реализованного алгоритма на серии численных экспериментов моделирования течений вязкой несжимаемой жидкости в пористых средах.

В *параграфе 3.4* рассмотрено применение реализованных методов и алгоритмов для решения задач авиации.

В *параграфе 3.5* рассмотрено применение разработанных в диссертации методов и алгоритмов для решения задач атомной промышленности.

В *параграфе 3.6* подводятся основные итоги третьей главы.

В *заключении* сформулированы основные результаты, изложенные в диссертации.

Основные научные результаты

Лашкин С.В. в процессе исследований получил ряд новых научных результатов:

- разработана методика распараллеливания разделенного и совмещенного алгоритмов SIMPLE на неструктурированных сетках с использованием алгебраического многосеточного метода (AMG), учитывающая особенности хранения и решения распределенной системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ);
- разработана методика решения уравнений Бринкмана-Форхгеймера на базе совмещенного алгоритма SIMPLE для моделирования течений вязкой несжимаемой жидкости в анизотропных пористых средах;
- определена эффективность разделенного и совмещенного алгоритмов SIMPLE на примере решения характерных задач гидродинамики, описывающих турбулентные течения вязкой несжимаемой жидкости, на тысячах процессорных ядер;
- выполнена верификация совмещенного алгоритма SIMPLE при моделировании течений вязкой несжимаемой жидкости в различных телах, в том числе в пористых средах и его адаптация для эффективного решения соответствующих промышленно-ориентированных задач авиационной и атомной промышленности пакетом программ ЛОГОС.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов

Обоснованность полученных теоретических результатов подтверждается использованием современного математического аппарата механики жидкости и газа (теория расщепления по физическим процессам, уравнение Пуассона, теория интегрирования уравнений движения жидкости, аппроксимация конвективных и диффузионных слагаемых) и сопоставлением полученных численных решений с уже описанными в литературе, а также экспериментальными данными. Хорошее согласие между результатами численных расчетов и натурными данными свидетельствует об обоснованности полученных результатов.

Основные положения диссертации представлены в 25 публикациях, из них 13 статей в журналах, включенных в список ВАК и/или входящих в мировые индексы цитирования (SCOPUS, Web of Science), 7 работ в трудах конференций. Получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученные теоретические и практические результаты по разработке и реализации численных методов решения системы уравнений Навье-Стокса могут быть применены при решении промышленно-ориентированных задач высокотехнологичных отраслей экономики. Предложенные методы позволят эффективно использовать вычислительные системы, состоящие из десятков тысяч процессоров, при счете задач на произвольных неструктурированных сетках, состоящих из сотен миллионов расчетных ячеек.

Соответствие результатов заявленным специальностям

Область исследования соответствует формуле специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Работа соответствует следующим пунктам области исследования паспорта специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»:

3. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.
4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.
5. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента

Замечания по диссертационной работе

1. Оценки параллельной эффективности применения совмещенного алгоритма выполнены лишь для ряда тестовых задач. Были бы интересны значения эффективности для промышленных задач, приведенных в третьей главе диссертации.

2. Для совмещенного алгоритма SIMPLE не представлены временные затраты на решение систем линейных алгебраических уравнений внутри одного итерационного шага (для классического алгоритма SIMPLE такая цифра приведена и составляет порядка 90%).

3. На странице 11 диссертации в пункте «Публикации» допущена опечатка: автор указывает, что опубликовано «12 статей в журналах, включенных в список ВАК и/или входящих в мировые индексы цитирования (SCOPUS, Web of Science)», хотя на самом деле он имеет 13 публикаций, которые приведены в списке работ.

4. В том же пункте на странице 11 указано, что получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Видимо имелись в виду свидетельства, обозначенные как [CP4 - CP6] в списке работ автора на странице 154. Но согласно размещенной на сайте ФГБУ «ФИПС» информации Лашкин С.В. входит в список авторов в свидетельстве о регистрации программ для ЭВМ №2017612306 от 20.02.2017 [CP7].

Отмеченные недостатки, однако, не снижают общего благоприятного впечатления о диссертационной работе и не умаляют значимость полученных результатов.

Заключение

Исследование Лашкина С.В. представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, выполненную на высоком научном уровне. Полученные результаты достоверны, являются новыми, выводы и заключения обоснованы.

На основании анализа содержания рукописи диссертации, автореферата, опубликованных работ можно заключить, что **диссертация в полной мере соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней»** (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, **Лашкин Сергей Викторович**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»**.

Заведующий кафедрой прикладной математики,
дифференциальных уравнений и теоретической
механики Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный
исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н.П. Огарёва», к.ф.-м.н., доцент

Жалин Руслан Викторович

Адрес организации: ул. Большевикская, д.68, г. Саранск, Республика Мордовия, 430005

Рабочий телефон: (834-2) 27-02-56

E-mail: zhrv@mrsu.ru

