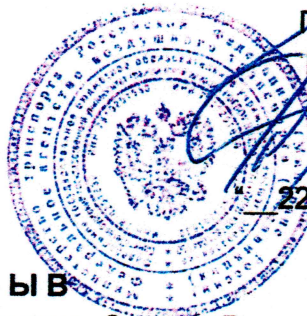


УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной
работе и экономике

А.В.Губенко

22 октября 2018г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию **Лашкина Сергея Викторовича** "Повышение эффективности трехмерного численного моделирования течений вязкой несжимаемой жидкости на произвольных неструктурированных сетках", представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 — "Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ".

1. Диссертационная работа Лашкина С.В. посвящена разработке и верификации совмещенного SIMPLE-подобного алгоритма с использованием алгебраического многосеточного метода (AMG) для структурированных и неструктурированных сеток, распараллеливанию классического и совмещенного SIMPLE-подобных алгоритмов для платформ с десятками тысяч процессоров, а также внедрению разработок в пакет ЛОГОС. Рассмотрены примеры тестовых и промышленных задач. Проблематика диссертации находится в русле приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ (3. Информационно-телекоммуникационные системы). Она имеет отношение к критическим технологиям: 18. Технологии и программное обеспечение распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем. Данная работа, несомненно, является актуальной.

Научная новизна работы очевидна.

1. Предложена параллельная реализация классического и совмещенного SIMPLE-подобных алгоритмов с использованием алгебраического многосеточного метода AMG, учитывающая особенности распределенного хранения и решения СЛАУ на десятках тысяч процессоров.

2. Верификация классического и совмещенного SIMPLE-подобных алгоритмов выполнена на канонических тестовых задачах гидродинамики, описывающих как ламинарные, так и турбулентные течения вязкой несжимаемой жидкости на произвольных неструктурированных сетках. Рассмотрены двумерные циркуляционное течение в квадратной каверне с подвижной крышкой, периодическое обтекание кругового цилиндра, отрывное течение в канале за обращенной назад ступенькой и в асимметричном диффузоре. Также рассчитаны тесты для пространственных турбулентных течений: пристеночное обтекание тела Ахмеда (Ahmed body), отрывные течения в отводных (с поворотом на 90°) каналах круглого и квадратного сечения.

3. Обоснована эффективность параллельной реализации классического и совмещенного SIMPLE-подобных алгоритмов и определены оптимальные настройки многосеточного метода AMG для эффективного использования при решении промышленно-ориентированных задач: вентиляции кабины самолета и смешения потоков жидкометаллического теплоносителя в реакторе.

4. Разработан новый метод решения уравнений Бринкмана-Форхгеймера на основе совмещенного SIMPLE-подобного алгоритма для моделирования течений вязкой несжимаемой жидкости в анизотропных пористых средах, в том числе при полностью неявной аппроксимации линейного тензора сопротивления.

Практическая значимость работы связывается, прежде всего, с развитием и применением отечественного пакета ЛОГОС.

Апробация работы представляется более чем приемлемой (13 статей из списка ВАКа, включая 5 статей из SCOPUS/Web of Science, в том числе статью в журнале первого квартиля Computers and Fluids). Особо следует отметить 7 полученных свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Автор принадлежит к энергично формируемой научной школе в РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров) под руководством доктора наук Козелкова А.С.

Структура диссертации состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 106 наименований (всего 163стр текста). Первая глава посвящена описанию и верификации классического SIMPLE-подобного алгоритма для расчета ламинарных и турбулентных течений на неструктурированных сетках, а также его распараллеливанию с помощью метода фиктивных ячеек и последующим внедрением в пакет ЛОГОС. AMG ускоритель сходимости и SST-модель Менгера применяются. Вторая глава сосредотачивает внимание на разработке совмещенного SIMPLE-подобного алгоритма на произвольных неструктурированных сетках, его распараллеливанию и верификации на двумерных и трехмерных тестовых задачах. Важное место в работе занимает оценка вычислительной эффективности. Определены оптимальные настройки совмещенного алгоритма, которые позволяют считать задачи в среднем на 30% эффективнее/быстрее, чем классический алгоритм. В третьей главе рассматривается распространение совмещенного SIMPLE-подобного алгоритма решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса на решение уравнений Бринкмана-Форхгеймера для описания течений в анизотропных пористых средах. Продемонстрировано решение нескольких задач индустриального профиля.

Работа довольно органичная, хорошо скомпонованная. В целом, квалификационная состоятельность диссертации не вызывает сомнений.

Важно отметить, что автор принимал участие в качестве исполнителя в исследованиях по проектам РФФИ №№ 13-07-12079, 16-01-00267, 17-05-00067.

Несколько слов о концептуальной обоснованности работы и об ее месте в спектре работ данного профиля.

Диссертация продолжает серию диссертационных работ коллектива РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров) по вычислительной проблематике, связанной с разработкой отечественного пакета ЛОГОС. Так в 2015 году защищена кандидатская диссертация Курулиным В.В., а в 2016 году – докторская Козелковым А.С.

Важно также отметить выход недавних монографий (с участием руководителя диссертанта), в русле которых выдержана данная работа.

- Multigrid and parallel computational technologies in gas and fluid mechanics problems. Part 1. Geometrical multigrid methods / V.N. Emelyanov and R.M. Shagaliev / Volkov K.N., Emelyanov V.N., Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Teterina I.V., Shagaliev R.M. Nizhniy Novgorod: NGTU, 2017. 114 p.

- Multigrid and parallel computational technologies in gas and fluid mechanics problems. Part 2. Algebraic multigrid methods / V.N. Emelyanov and R.M. Shagaliev / Volkov K.N., Emelyanov V.N., Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Teterina I.V., Shagaliev R.M. Nizhniy Novgorod: NGTU, 2017. 134 p.

В центре внимания работы находится эффективность вычислительного алгоритма. Распараллеливание классического SIMPLE-подобного алгоритма с применением AMG-ускорителя на многопроцессорных платформах (на десятках тысяч ядер), разработка и распараллеливание совмещенного SIMPLE-подобного алгоритма с последующим внедрением в пакет ЛОГОС служат реализации этой цели. Также отметим акцент на использование обобщенных неструктурированных сеток. Автор даже подчеркивает, что такие сетки являются предпочтительными для решения промышленных задач. Вот с этим можно поспорить. Все-таки косоугольные неструктурированные сетки вносят в расчетные результаты серьезные ошибки. Существует альтернативная идея – строить гибридные сетки, состоящие из структурированных модулей, соединенных неструктурированными вставками (проточками).

- Kalinin E. I., Mazo A. B. and Isaev S. A. Composite mesh generator for CFD problems // 11th International Conference on "Mesh methods for boundary-value problems and applications" IOP Publishing IOP. Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. 158. 6p.

- Усачов А.Е., Мазо А.Б., Калинин Е.И., Исаев С.А., Баранов П.А., Семилет Н.А. Повышение эффективности численного моделирования турбулентных отрывных течений с помощью применения гибридных сеток со структурированными разномасштабными блоками и неструктурированными вставками // Труды МАИ. 2018. Выпуск 99. 18с.

В целом, в работе выбрана верная концепция развития методологии. Однако проблема эффективности тесно связана с еще более важной задачей – обеспечением точности численных прогнозов. В то же время повышение порядка аппроксимации разностных схем, как правило, ухудшает сходимость итерационных процессов и снижает вычислительную эффективность алгоритмов. В целом, работа по совершенствованию алгоритмического и программного обеспечения должна продолжаться.

По диссертации следует сделать ряд замечаний разной степени значимости.

1. Перечень ссылок на литературные источники по SIMPLE-подобным алгоритмам неполный. Вне внимания автора оказались монографии 1989-2017 гг.

- Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости // Л.: Судостроение, 1989. 256с.

- Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под редакцией А.В.Ермишина и С.А.Исаева. М.: МГУ, 2003. 360с.

- Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е. Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. Саарбрюкен: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013. 316с.

- Аэродинамика утолщенных тел с вихревыми ячейками. Численное и физическое моделирование / Под ред. С.А. Исаева. СПб. : Изд-во Политех. ун-та, 2016. 215 с.

- Вихревые технологии для энергетики / А.И. Леонтьев, С.В. Алексеенко, Э.П. Волчков и др.; под общей редакцией академика А.И. Леонтьева. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. 350с

- Исаев С.А., Судаков А.Г., Баранов П.А., Жукова Ю.В., Усачов А.Е. Многоблочные вычислительные технологии применительно к расчету турбулентных отрывных и струйных течений сжимаемого вязкого газа со скачками уплотнения и ударными волнами в рамках модели переноса сдвиговых напряжений. 6 глава в коллективной монографии под редакцией В.А. Левина, Н.А. Фомина, В.Е. Фортова. Физика ударных волн, горения, детонации, взрыва и неравновесных процессов. Часть 2. Минск: ИТМО НАН Беларуси, 2018. С. 216–228.

Особенно печально, что не рассмотрена книга 1989 года. Ведь в ней SIMPLEC-алгоритм применяется к линеаризованным уравнениям Рейнольдса (уравнениям в приращениях зависимых переменных), причем это обстоятельство позволило в сочетании с применением для решения алгебраических уравнений методом неполной матричной факторизации обеспечить устойчивую сходимость итерационного процесса для аппроксимации конвективных членов уравнений движения и характери-

стик турбулентности по противопоточной квадратичной схеме Леонарда в явной части исходных уравнений. Отметим, что в диссертации, как и в многочисленных аналогах, изложенных, например, в монографии Перича-Ферцигера (2002), SIMPLE-подобный алгоритм записывается относительно зависимых переменных, а не их приращений. Это существенно влияет на вычислительную эффективность.

2. Разработка методологии выполняется для схем второго порядка аппроксимации, а вот все расчеты тестовых и промышленных задач проведены с использованием схем первого порядка для аппроксимации конвективных членов уравнений. Игнорируется, к сожалению, влияние схемной вязкости, особенно существенное при моделировании отрывных течений. Как известно, искусственная диффузия, связанная с этими ошибками, может намного превышать физическую диффузию. В этом плане не вполне удачен выбор определяющих параметров тестовых задач. Так течение в квадратной каверне с подвижной крышкой рассчитано при числе Рейнольдса 1000, а следовало увеличить его в 5-10 раз, тем более, что есть аналоги.

- Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А., Лысенко Д.А., Усачов А.Е. Моделирование ламинарного циркуляционного течения в квадратной каверне с подвижной границей при высоких числах Рейнольдса с помощью пакетов VP2/3 и FLUENT // Инженерно-физический журнал. 2005. Т.78, №4. С.163-179.

Выбор 50тысяч расчетных ячеек для решения этой задачи также представляется не оправданными (сеточной сходимости еще нет). Это можно видеть из публикации

- Исаев С.А., Судаков А.Г., Баранов П.А., Жукова Ю.В., Усачов А.Е. Анализ погрешностей многоблочных вычислительных технологий при расчете циркуляционного течения в квадратной каверне с подвижной крышкой для $Re=1000$ // Инженерно-физический журнал. 2013. Т.86. №5. С.1064-1079.

Расчеты обращенного назад уступа также следовало проводить с использованием схем второго порядка аппроксимации. Это следует из нашей совместной статьи 1991 года, опубликованной с оппонентом по диссертации.

- Исаев С.А., Усачов А.Е. Численное моделирование отрывных течений в задачах внутренней аэродинамики // Промышленная аэродинамика. М.: Машиностроение, вып.4(36). 1991. С. 43-75.

3. Автор отмечает, что применяется SST-модель Ментера. Однако ссылки даются и на модель 1993 и 2003 года без подчеркивания разницы между вариантами модели. Какая все-таки SST-модель применяется в работе и в чем отличие развитого метода пристеночных функций от метода Ментера? Следует подчеркнуть, что для интенсивных отрывных течений необходимо модифицировать SST-модель 2003 года с учетом кривизны линий тока.

- Исаев С.А., Баранов П. А., Судаков А. Г., Попов И. А. Верификация стандартных и модифицированных с учетом кривизны линий тока MSST и оценка приемлемости комбинированных по Ментеру граничных условий при расчете ультранизкого профильного сопротивления оптимальной компоновки цилиндра с соосным диском // Журнал технической физики. 2016. Т.86. №8. С.32-41.

4. В блоке промышленных задач отмечается, что результаты, полученные в пакете программ ЛОГОС, согласуются с прогнозами по коммерческому пакету программ, предоставленными компанией «ОКБ Сухого». Не ясно, почему автор не использовал известные из литературы базы данных по аналогичным задачам, как это сделано, например, в наших исследованиях.

- Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е., Малышкин Д.А. Численное исследование процессов вентиляции замкнутого пространства в присутствии людей и источников тепла // Инженерно-физический журнал. 2015. Т.88. №5. С.1152-1157.

- Исаев С.А., Усачов А.Е., Баранов П.А., Глушков Т.Д., Гуреев М.В. Численное исследование движения потоков воздуха в кабине грузового автомобиля при ее вентиляции в трех различных режимах // Инженерно-физический журнал. 2017. Т.90. №2. С.431-437.

В целом, работа выполнена на достаточно высоком научном уровне. В ней разрабатываются и верифицируются современные расчетные подходы на основе SIMPLE-подобных алгоритмов. Полученные диссертантом результаты являются новыми, они обогащают актуальный раздел математического моделирования, численных методов и комплексов программ, развивая отечественный пакет ЛОГОС для многоядерных систем применительно к решению индустриальных задач. Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки работы, которая представляется перспективной, интересной и ориентированной на использование в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, ИВМ и МГ СО РАН, ЦАГИ им. Н.Е.Жуковского, МГТУ им. Н.Э.Баумана (Москва), ИТПМ им. С.А.Христиановича СО РАН, ИТ им. С.С Кутателадзе СО РАН и в других научных, образовательных и исследовательских центрах. Для этих организаций, а также для предприятий России, ориентированных на применение пакета ЛОГОС с использованием многопроцессорных платформ, будут полезны результаты настоящей диссертации. Работа получила хорошую апробацию на различных конференциях, а ее основные моменты довольно полно отражены в публикациях и автореферате.

Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее содержание.

Таким образом, представленная диссертация по объему и глубине проработки, новизне и достоверности ее результатов соответствует квалификационным требованиям, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям, в том числе соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Лашкин С.В. заслуживает присуждение ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Зав. лаб. Фундаментальных исследований
Санкт-Петербургского государственного университета
гражданской авиации, д.ф.-м.н., проф.



С.А.Исаев

Отзыв обсужден и одобрен на заседании НТС НИЛ фундаментальных исследований, протокол №2 (17) от 17 октября 2018г.

Сведения об организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации»
Адрес: 196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38
Телефон: (812) 704-18-18
Факс: (812) 704-30-49
E-mail: info@spbguqa.ru