

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Ключнева Никиты Викторовича "Численное исследование устойчивости поперечно-периодических течений жидкости и газа", представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.01.07 – вычислительная математика

Работа посвящена развитию и обоснованию метода численного анализа устойчивости поперечно-периодических течений, предложенного А.В. Бойко и Ю.М. Нечепуренко (2010), и вычислительному исследованию характеристик устойчивости для поперечно-периодических течений несжимаемой жидкости на примере течения Пуазейля в плоском канале с продольным оребрением с использованием суперкомпьютерной техники.

Актуальность. Исследование устойчивости гидродинамических течений является фундаментальной и актуальной прикладной проблемой математики и механики. Потеря устойчивости для класса параллельных течений жидкости в каналах постоянного сечения носит немодовый характер, вызывая докритическую потерю устойчивости и переход к турбулентному состоянию. Такой тип критического поведения существенно отличает данный класс течений от большинства остальных классов, в которых потеря устойчивости описывается модами линейной устойчивости и их взаимодействием. Благодаря данному классу задач произошло существенное развитие теории устойчивости, которая сейчас продолжает активно развиваться. В настоящее время различают монотонную устойчивость, линейную устойчивость, глобальную устойчивость и предел самоподдержания турбулентности таких течений. История исследований и изменения теоретических воззрений на процесс потери устойчивости изотермических течений несжимаемой жидкости отражены в классических монографиях Ц. Линя (1955), Р. Бетчова и В. Криминале (1967), С. Чандрасекара (1961), Г. Шлихтинга (1974), Д. Джозефа (1976), М.А. Гольштика и В.Н. Штерна (1977), П. Дразина и В. Рейда (1981), А.В. Бойко, Г.Р. Грека, А.В. Довгалея и В.В. Козлова (1999), П. Шмида и Д. Хенингсона (2001).

Задача, рассматриваемая в диссертации, посвящена исследованию влияния продольного оребрения стенок плоского канала на устойчивость течения Пуазейля, которое может оказывать существенное влияние на энергетическое и линейное числа Рейнольдса, а также временное усиление возмущений в потоке и переход к турбулентности. Соответственно меняется трение на стенке и расход жидкости, что также имеет важное практическое значение. Важным элементом исследования является разработка эффективных высокоточных алгоритмов, позволяющих существенно ускорить вычисления, в частности, используя суперкомпьютерную технику.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, трех содержательных глав, в которых представлены результаты исследований и проведен анализ, заключения и списка литературы из 66 наименований. Общий объем диссертации составляет 135 страниц.

Во введении автором обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели, основные элементы новизны, теоретической и практической

значимости работы. Перечислены основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации и публикациях и личном вкладе автора.

Первая глава посвящена описанию теоретических основ и обоснованию используемой для исследования устойчивости вычислительной технологии. Вводится терминология и характеристики устойчивости (энергетическое и критическое число Рейнольдса), представлена постановка задачи о устойчивости течения Пуазейля в плоском канале при наличии продольного оребрения. Обосновывается сведение анализа устойчивости исследуемого течения к анализу его устойчивости к элементарным возмущениям с использованием представления Флоке. Приводятся известные результаты по устойчивости течения Пуазейля в плоском канале. Обсуждается теорема Сквайра о двумерном характере наиболее опасных возмущений, соответствующих нулевому поперечному волновому числу. Формулируются определяющие уравнения для основного и возмущенного течений, определяется безразмерное число Рейнольдса. Описывается разбиение возмущений на два подмножества: волны Толмина-Шлихтинга, отвечающие за неустойчивость течения Пуазейля в плоском канале, и волны Сквайра, устойчивые в плоском канале при любых числах Рейнольдса.

Во второй главе описываются методы расчета характеристик устойчивости с заданной точностью. К характеристикам устойчивости относятся критические числа Рейнольдса, максимальная амплификация средней плотности кинетической энергии возмущений, соответствующие им пространственные волновые числа. Описывается аппроксимация слабых постановок, поставленных в первой главе задач на основе спектрального метода Галеркина с использованием базисных функций на основе интерполяционных полиномов Лагранжа и тригонометрических интерполяционных полиномов, использование которых характерно для методов коллокаций. Результатом аппроксимации является система дифференциально-алгебраических уравнений, которая упрощается проектированием на подпространство соленоидальных сеточных функций. Применение разложения Холецкого и двусторонних преобразований Хаусхолдера приводят задачу к проблеме собственных значений с эрмитовой трехдиагональной матрицей. Полученная проблема может быть решена специальным вариантом QR-алгоритма. Рассматривается программная реализация алгоритмов в среде MATLAB для персонального компьютера и на языке Intel фортран для кластера с использованием высокооптимизированной для использования на многоядерных процессорах библиотеке MKL и использованием средств MPI для распараллеливания. Для исследования гребенчатого оребрения в технологию включено применение конформного отображения для построения расчетной сетки.

Третья глава посвящена проведению и анализу результатов численного исследования влияния поперечно-периодического волнистого продольного оребрения на устойчивость течения Пуазейля. Оребрение задается тремя параметрами: период оребрения, высота ребер и заостренность ребер. Численно устанавливается справедливость аналога теоремы Сквайра для плоского канала, что линейное число Рейнольдса достигается на чисто двумерных возмущениях. В то же время энергетическое число Рейнольдса достигается на двумерных поперечных возмущениях с нулевым продольным волновым числом, соответствующие модам Сквайра плоского канала. Представлены результаты расчетов критических чисел Рейнольдса и волновых

чисел от периода оребрения для различных высот ребер. Приводятся качественные объяснения зависимостей критических чисел Рейнольдса и максимальной амплификации кинетической энергии возмущений от параметров. Впервые показано, что параметры оребрения можно выбрать так, чтобы одновременно увеличить значения и энергетического, и линейного критических чисел Рейнольдса.

В заключении кратко сформулированы основные результаты диссертации.

Новизна представленных в диссертации результатов заключается в следующем.

Автором развита и обоснована оригинальная технология вычислительных характеристик устойчивости для течений в оребренных каналах. Обосновано применение аппроксимаций метода Галеркина-коллокаций и использование представления Флоке для вычисления характеристик устойчивости. Реализована технология вычислений устойчивости для кластеров. Проведены вычисления на СК «Ломоносов».

Численно показана справедливость аналога теоремы Сквайра для оребренного канала, заключающаяся в том, что наиболее опасная мода имеет нулевое поперечное волновое число. Впервые показано, что потеря линейной устойчивости на больших периодах оребрения соответствует волне Сквайра плоского канала с нулевым продольным волновым числом.

Впервые показано, что параметры оребрения можно выбрать так, чтобы увеличилось и энергетическое, и линейное критические числа Рейнольдса и уменьшилась максимальная амплификация энергии возмущений, что приводит к отдалению как докритического, так и естественного ламинарно-турбулентного перехода.

Указанная область исследования соответствует паспорту специальности 01.01.07 «Вычислительная математика», а именно пункту 2 – «Разработка теории численных методов, анализ и обоснование алгоритмов, вопросы повышения их эффективности» и пункту 4 – «Реализация численных методов в решении прикладных задач, возникающих при математическом моделировании естественнонаучных и научно-технических проблем, соответствие выбранных алгоритмов специфике рассматриваемых задач».

Диссертация написана ясным профессиональным языком.

Значимость. В работе получено, что продольное оребрение может как увеличивать, так и уменьшать энергетическое и линейное числа Рейнольдса независимо друг от друга. При одновременном увеличении обоих чисел Рейнольдса можно отдалять как докритический так и естественный ламинарно-турбулентные переходы, что позволит увеличивать расход протекаемой жидкости. Разработанная технология исследования устойчивости течений для вычислительных кластеров может быть использована для суперкомпьютерного анализа влияния продольного оребрения для течений в пограничном слое, течении Куэтта, а также более сложных течений.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждена апробацией на международных и российских научных конференциях, семинарах ИВМ РАН, а также публикациями

результатов исследований в рецензируемых научных изданиях, в том числе – в 3 статьях, опубликованных в изданиях из списка, рекомендованных ВАК РФ.

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается использованием тщательно отработанных и верифицированных методик высокоточных численных алгоритмов и кодов, количественным согласием с отдельными результатами ранее проведенных другими авторами численных экспериментов, исследованием сходимости по шагу пространственной сетки.

Замечания: По диссертации можно сделать следующие замечания:

1. Изложение материала диссертации недостаточно хорошо продумано с методической точки зрения. В частности, отсутствует рисунок с геометрией канала и осями координат. Кроме того, критические числа для плоского течения Пуазейля приведены в разных местах диссертации (энергетическое на с. 21, а линейное на с. 41), хотя было бы правильнее их разместить в единой таблице. Правильнее было бы писать уравнения Навье-Стокса несжимаемой жидкости с традиционным порядком расположения членов.
2. Обзор литературы и описание качественного поведения реакции системы на малые и конечные возмущения недостаточны полны. Помимо монотонной и линейной устойчивости течений имеются понятия глобальной устойчивости течения по отношению конечным возмущениям и предел по числу Рейнольдса, при котором еще возможно поддержание турбулентности в потоке. Замечание на с. 23 о том, что превышение линейного критического числа Рейнольдса приводит, как правило, к турбулизации потока, справедливо, скорее всего, только для изотермических параллельных течений в каналах постоянного сечения. Для многих течений других классов (естественная конвекция, каналы переменного сечения, течения в замкнутых областях) первая неустойчивая мода часто является стационарной, а возбужденное последующими модами колебательное течение остается нетурбулентным для достаточно высоких надкритичностей.
3. В работе опущена мотивация по выбору спектрального метода с базисными функциями, характерными для методов коллокаций, основанными на интерполяционных многочленах Лагранжа и элементарных тригонометрических многочленах.
4. В работе недостаточно четко описана верификация разработанного кода. Понятно, что реализация спектрального метода в сочетании с преобразованием координат, экономных вычислением базисных функций, наличием двух этапов в решении задачи для нахождения базисного решения и решения спектральной задачи требует значительных усилий по тестированию и верификации кода. Сравнение полученных автором критических числа Рейнольдса, числа Рейнольдса, соответствующего максимальному усилению возмущений, и соответствующие периоды таких возмущений, с результатами полученными другими авторами ранее для задачи Орра-Зоммерфельда для течения в плоском канале (рис. 1.1) позволило бы явно представить качество проведенной верификации кода.

Замечания по работе носят, в основном, методический характер, отражая сложность изучаемых процессов, и не снижают её достоинства.

Заключение. Диссертационная работа Н.В. Ключнева «Численное исследование устойчивости поперечно-периодических течений жидкости и газа» является законченной научно-квалификационной работой, удовлетворяющей всем требованиям Положения ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.01.07 – вычислительная математика. Работа выполнена под руководством д.ф.-м.н., доцента Ю.М. Нечепуренко, содержит новое решение актуальной научной задачи – разработка эффективной технологии анализа устойчивости и вычислительное исследование энергетического и линейного критического чисел Рейнольдса для поперечно-периодических течений несжимаемой жидкости, имеющей существенное значение для специальности 01.01.07 – вычислительная математика.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
радиационной газовой динамики
федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт проблем механики им.А.Ю.Ишлинского РАН,
119526 Москва, просп. Вернадского 101, корп.1,
тел. 8 495 434-43-40,
e-mail: ermakov@ipmnet.ru

/Ермаков Михаил Константинович/



31.05.16

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем механики им.А.Ю.Ишлинского РАН,
Адрес: 119526 Москва, просп. Вернадского 101, корп.1.
Тел. 8 495 434-34-83 (директор)
e-mail: ipm@ipmnet.ru
Сайт: <http://www.ipmnet.ru>

Подпись официального оппонента
старшего научного сотрудника Ермакова М.К. заверяю

Ученый секретарь ИПМех РАН,
к.ф.-м.н.
31.05.2016 г.



/Е.Я. Сысоева/