

УТВЕРЖДАЮ
И.о. директора
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института автоматизации проектирования
Российской академии наук



Член-корреспондент РАН
А.С. Холодов

«16» 05 2016 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Ключнева Никиты Викторовича «Численное исследование устойчивости поперечно-периодических течений жидкости и газа», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.01.07 – «Вычислительная математика»

Диссертационная работа Н.В. Ключнева посвящена развитию и обоснованию предложенной А.В. Бойко и Ю.М. Нечепуренко технологии численного анализа устойчивости поперечно-периодических течений и подробному исследованию с помощью нее влияния оребрения на устойчивость течения Пуазейля.

Актуальность. Продольное оребрение является перспективным методом пассивного влияния на ламинарно-турбулентный переход в течениях жидкости и газа, однако на данный момент этот метод мало изучен из-за сложности и дороговизны соответствующих физических экспериментов и чрезвычайно высоких вычислительных затрат при численном моделировании. Научным руководителем диссертанта Ю. М. Нечепуренко совместно с А.В. Бойко в 2010 году была предложена новая эффективная технология численного анализа устойчивости поперечно-периодических течений. Однако для проведения подробных исследований зависимости характеристик устойчивости течений от параметров оребрения необходимо было реализовать ее для вычислительных кластеров. Также существовали некоторые вопросы при обосновании этой технологии. Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной.

Содержание работы. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, основные элементы новизны и теоретической и практической значимости диссертационной работы. Перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена описанию и теоретическому обоснованию технологии численного анализа устойчивости поперечно-периодических течений жидкости и газа. Вводятся основные понятия, даются постановки задач устойчивости, и, используя представления Флоке, обосновывается анализ устойчивости исследуемого течения на основе элементарных возмущений. Кроме того, напоминаются известные факты об устойчивости течения Пуазейля в плоском канале, в частности, описывается разделение множества мод уравнений эволюции элементарных возмущений на два подмножества: волн Толлмина-Шлихтинга, отвечающих за неустойчивость течения Пуазейля в плоском канале, и волн

Сквайра, устойчивых в плоском канале при любом числе Рейнольдса. В третьей главе диссертационной работе показано, как оребрение влияет на поведение мод этих двух классов. Также обсуждается теорема Сквайра, которая утверждает, что наиболее неустойчивые моды имеют нулевое поперечное волновое число, и это позволяет при исследовании модовой неустойчивости в плоском канале не рассматривать другие значения этого параметра. В третьей главе диссертации численно показана справедливость аналога этого утверждения для оребренного канала.

Вторая глава посвящена описанию используемых в технологии методов расчета критических чисел Рейнольдса и максимальной амплификации средней плотности кинетической энергии возмущений. Даны слабые постановки описанных в первой главе задач. Эти задачи аппроксимируются методом Галеркина-коллокаций, затем осуществляются предварительные преобразования (редукция), уменьшающие размерность задачи примерно в два раза. Описываются задачи, к которым приводит вычисление характеристик устойчивости с заданной точностью. Диссертантом предложена реализация этой технологии для вычислительных кластеров, она также описана в этой главе. Изначально технология была реализована для персональных компьютеров, что не позволяло проводить массовые численные эксперименты. Также описаны результаты численных экспериментов по расчету линейного критического числа Рейнольдса в канале с гребенчатым оребрением нижней стенки канала (бесконечно тонкие продольные пластины).

В третьей главе приводятся результаты подробного численного исследования зависимости характеристик устойчивости течения Пуазейля от параметров волнистого оребрения нижней стенки канала. Рассмотрено семейство волнистых оребрений, зависящее от трех параметров – периода, высоты ребер и их «заостренности». Полученные зависимости критических чисел Рейнольдса и максимальной амплификации кинетической энергии возмущений от этих параметров качественно объяснены. В конце главы показана сходимость полученных результатов по шагу сетки. Представлены выводы.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные результаты, полученные в ходе ее выполнения.

Результаты диссертационной работы значительно дополнили существовавшее представление об устойчивости течений в оребренных каналах. Возможность гибкого воздействия на устойчивость течений оребрением обтекаемой поверхности и неустойчивость волн Сквайра в оребренном канале – крайне важные новые факты для современных исследователей и инженеров, работающих в этой области.

Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Для оребренного канала в работе численно показано, что энергетическое критическое число Рейнольдса и максимальная амплификация энергии возмущений достигаются на возмущениях с продольным волновым числом равным нулю. Также показано, что оребрение в зависимости от выбранных параметров может увеличить по сравнению с плоским каналом как энергетическое, так и линейное критические числа Рейнольдса. Такие результаты получены впервые. До сих пор было принято считать, что оребрение всегда увеличивает энергетическое критическое число Рейнольдса и при этом уменьшает линейное. Кроме того в работе показано, что в оребренном канале становятся неустойчивыми моды, соответствующие волнам Сквайра плоского канала. Этот результат также получен впервые.

Диссертантом обосновано с использованием представления Флоке вычисление характеристик устойчивости течений на основе элементарных возмущений, а также проведены расчеты линейного критического числа Рейнольдса в канале с гребенчатым оребрением. Технология исследования устойчивости реализована для вычислительных кластеров, что позволило проводить расчеты характеристик устойчивости течений в широком диапазоне параметров оребрения.

Значимость для науки и производства полученных автором диссертации результатов. Для течений в оребренных каналах численно показано, что наиболее неустойчивые моды имеют нулевое поперечное волновое число, что является аналогом теоремы Сквайра, а энергетическое критическое число Рейнольдса и максимальная амплификация энергии возмущений достигаются в плоском и оребренном каналах на возмущениях с нулевым продольным волновым числом. Показано, что оребрение стенок канала приводит к неустойчивости мод, соответствующих волне Сквайра плоского канала, устойчивой в плоском канале при любом числе Рейнольдса. Кроме того показано, что, используя оребрение, можно отдалить одновременно докритический и естественный ламинарно-турбулентные переходы. С практической точки зрения это позволяет сохранять ламинарность течения в более широком диапазоне чисел Рейнольдса, прокачивая при этом больший объем жидкости.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Результаты диссертационной работы показывают, что при исследовании неустойчивости течений в оребренных каналах необходимо учитывать также моды, соответствующие волнам Сквайра плоского канала, в то время как в плоском канале такие моды являются устойчивыми при любом числе Рейнольдса. Также результаты работы показывают, что оребрение может независимо друг от друга увеличивать или уменьшать критические числа Рейнольдса по сравнению с плоским каналом, что может быть использовано в инженерных приложениях для гибкого влияния на ламинарно-турбулентный переход, а также при постановке физических экспериментов. Предложенная в работе реализация технологии для вычислительных кластеров, примененная для исследования устойчивости течения Пуазейля в оребренном канале, может быть применена для анализа влияния оребрения на характеристики устойчивости многих других течений.

Дальнейшее развитие и использование полученных в диссертационной работе результатов можно осуществлять в академических институтах, таких как Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Институт вычислительной математики РАН, Институт автоматизации проектирования РАН.

Замечания по работе. По диссертации и автореферату можно сделать частные замечания, не влияющие на общую положительную оценку работы:

- 1) Недостаточно широко представлен обзор работ по теме диссертационного исследования.
- 2) В диссертационной работе не представлено сравнение результатов, полученных автором, с результатами теоретических и экспериментальных исследований других исследователей.
- 3) Для маленького периода оребрения $L < 1$ выбор размера оптимальной расчетной сетки 140×35 до конца не обоснован, тк не представлены результаты для сеток с большей разрешающей способностью.
- 4) Расчет одной задачи на нескольких вычислительных узлах, продемонстрировал недостаточную масштабируемость. Возможно, необходимо оптимизировать используемые процедуры из библиотеки MKL.
- 5) В качестве дальнейшего развития данной работы интерес представляет исследование, с помощью разработанной вычислительной технологии, характеристик устойчивости в канале с оребрением нижней и верхней стенок.

Общая оценка работы. В целом, работа выполнена на высоком уровне, все научные положения, выводы и рекомендации обоснованы. Достоверность основных результатов, сформулированных в заключении, не вызывает сомнения. Основные результаты диссертации опубликованы в открытой печати, в том числе, есть три публикации в журналах из перечня

ВАК, результаты широко обсуждались на различных конференциях и семинарах. Содержание диссертации правильно и достаточно полно отражено в автореферате. Оно соответствует паспорту специальности 01.01.07, в частности, пунктам:

2. Разработка теории численных методов, анализ и обоснование алгоритмов, вопросы повышения их эффективности.

4. Реализация численных методов в решении прикладных задач, возникающих при математическом моделировании естественнонаучных и научно-технических проблем, соответствие выбранных алгоритмов специфике рассматриваемых задач.

Перечисленные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы и не влияют на научную значимость и практическую ценность полученных результатов.

Диссертационная работа Ключнева Н.В. является законченным научным исследованием и соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки России, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.01.07 (вычислительная математика), а её автор – Ключнев Никита Викторович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составлен кандидатом физико-математических наук, ведущим научным сотрудником Семеновым И.В.

Отзыв обсужден и одобрен на научном семинаре ИАП РАН 12 мая 2016 г.

Ведущий научный сотрудник

Отдела вычислительной математики и турбулентности

ИАП РАН,

канд. физ.-мат. наук



/Семенов И.В./

Ученый секретарь ИАП РАН

к. т. н.



/Сызранова Н.Г./

12 мая 2016 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации проектирования РАН

123056, г. Москва, ул. 2-ая Брестская, 19/18.

Телефон: 8(499)250-0262, факс: 8(499)250-8928

e-mail: icad@icad.org.ru

www.icad.org.ru