

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

**Клюшнева 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**

**Актуальность темы.** Одним из известных способов влияния на гидродинамическую устойчивость течения является продольное оребрение обтекаемой поверхности. Существенное преимущество этого подхода состоит в том, что это пассивный способ, не требующий дополнительных затрат. Но для его применения необходимо знать, как основные характеристики устойчивости зависят от параметров оребрения, что на данный момент мало изучено из-за высокой стоимости физических экспериментов и огромной вычислительной сложности численных (если характеристики устойчивости рассчитываются традиционными методами). В 2010 году А.В. Бойко и Ю.М. Нечепуренко предложили новую технологию численного анализа устойчивости поперечно-периодических течений, значительно более эффективную, чем существовавшие ранее. Изначально она была реализована только для персональных компьютеров, мощности которых оказалось недостаточно для проведения подробных исследований устойчивости течений. Таким образом, актуальным являлось дальнейшее развитие этой технологии, в частности, включение в нее возможности расчета на суперкомпьютерах, а также проведение на примере какого-либо известного течения подробного исследования влияния оребрения на характеристики устойчивости.

**Содержание диссертации и ее завершенность.** Диссертационная работа Н.В. Клюшнева посвящена развитию и обоснованию технологии численного исследования устойчивости поперечно-периодических течений, предложенной А.В. Бойко и Ю.М. Нечепуренко, и подробному исследованию с ее помощью устойчивости течения Пуазейля в оребренном канале.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель диссертационной работы, перечислены основные элементы ее новизны и теоретической и практической значимости. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Введение полностью отражает рассматриваемые в диссертации вопросы.

В первой главе описываются теоретические основы подходов, используемых в диссертации для исследования устойчивости поперечно-периодических течений. Вводится терминология, даются постановки задач устойчивости, и обосновывается сведение анализа устойчивости исследуемого течения к анализу его устойчивости к элементарным возмущениям с использованием представления Флоке. Кратко приводятся известные результаты по устойчивости течения Пуазейля в плоском канале. В том числе обсуждается теорема Сквайра, которая говорит о том, что наиболее неустойчивые моды имеют нулевое поперечное волновое число, что позволяет при исследовании модовой неустойчивости не рассматривать другие значения этого параметра. Кроме того, описываются волны Толлмина-Шлихтинга, отвечающие за неустойчивость течения Пуазейля в плоском канале, и волны Сквайра, устойчивые в плоском канале при любом числе Рейнольдса.

Во второй главе описываются методы расчета характеристик устойчивости. Даются слабые постановки задач, описывается их аппроксимация, а также редукция полученных в результате аппроксимации матричных задач к задачам с матрицами примерно вдвое меньшего порядка. Описываются алгоритмы расчета критических чисел Рейнольдса и максимальной амплификации энергии возмущений с заданной точностью. Кроме того, описывается предложенная автором диссертации реализация технологии исследования устойчивости для вычислительных кластеров, которая позволяет проводить массовые численные эксперименты за приемлемое время. В завершение главы рассмотрена возможность включения в технологию гребенчатого оребрения.

Третья глава является основной главой диссертации. Она посвящена анализу результатов численных экспериментов по влиянию на устойчивость течения Пуазейля параметров волнистого продольного оребрения, нанесенного на нижнюю стенку канала. Получены зависимости характеристик устойчивости от параметров оребрения и даны их качественные физические объяснения. Впервые показано, что параметры оребрения можно выбрать так, чтобы одновременно увеличить значения и энергетического и линейного критических чисел Рейнольдса, в то время как ранее считалось, что оребрение может лишь увеличить энергетическое и одновременно уменьшить линейное. Кроме того, впервые показано, что неустойчивость в оребренном канале при больших периодах оребрения достигается на модах, соответствующих волнам Сквайра плоского канала, и, таким образом, эти моды нельзя отбрасывать при исследовании устойчивости течений в оребренных каналах.

Результаты вычислительных экспериментов, представленные в третьей главе, показывают, что для оребренного канала справедливо утверждение, аналогичное теореме Сквайра, а именно, что наиболее неустойчивые моды имеют нулевой параметр расстройки Флоке, то есть они периодичны в поперечном направлении с периодом, равным периоду оребрения. Также численно показано, что энергетическое критическое число Рейнольдса и максимальная амплификация энергии возмущений достигаются на возмущениях с продольным волновым числом равным нулю.

В заключении кратко сформулированы основные результаты диссертации.

**Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации,** подтверждена апробацией на международных и российских научных конференциях и семинарах, а также публикациями результатов исследования 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 корректным использованием математического аппарата, доказательством теоремы, обосновывающей исследование устойчивости течений на основе элементарных возмущений, а также исследованием сходимости по шагу сетки, которое позволяет судить о точности полученных результатов.

**Научная новизна и практическая значимость полученных автором результатов.** Диссертантом обосновано применение представления Флоке для вычисления характеристик устойчивости. Выполнена реализация технологии для вычислительных кластеров, позволившая проводить суперкомпьютерные расчеты характеристик устойчивости течений в оребренных каналах и получить зависимости характеристик устойчивости течения Пуазейля от параметров оребрения в широких диапазонах этих параметров.

Впервые показано, что в плоском и оребренном каналах энергетическое критическое число Рейнольдса и максимальная амплификация энергии возмущений достигаются на возмущениях с нулевым продольным волновым числом, а также, что линейная неустойчивость при больших периодах оребрения реализуется на ведущей моде, которой соответствует волна Сквайра плоского канала.

В работе установлено, в том числе, что оребрение может увеличить одновременно и энергетическое и линейное критические числа Рейнольдса, и уменьшить максимальную амплификацию энергии возмущений, отдалив тем самым как докритический, так и естественный ламинарно-турбулентные переходы. На практике это позволит, в частности, прокачивать больше жидкости, сохраняя ламинарность течения в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.** Предложенная диссертантом реализация технологии исследования устойчивости течений для вычислительных кластеров может быть использована для анализа влияния оребрения на

устойчивость многих других течений, таких как течение Куэтта и течение в пограничном слое. Полученные результаты по влиянию оребрения на характеристики устойчивости течения могут быть использованы для подбора параметров оребрения с целью влияния на устойчивость течений или ее точечного экспериментального исследования, ввиду невозможности поставить физические эксперименты в широких диапазонах параметров. Показанная в работе неустойчивость в оребренном канале мод, соответствующих волнам Сквайра плоского канала, должна побудить исследователей учитывать этот фактор для оребрения, не отбрасывая, как в случае плоского канала, такие моды при анализе устойчивости.

В целом, работа выполнена на весьма высоком уровне, все научные положения, выводы и рекомендации обоснованы. Основные результаты, сформулированные в заключении, действительно получены. Основные результаты диссертации опубликованы, 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, и 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.

### **Замечания.**

1. Часть используемой в диссертации терминологии может вызвать возражения. Например, основное течение называется линейно устойчивым, если средняя плотность кинетической энергии любого достаточно малого допустимого при  $t=0$  возмущения стремится к нулю при  $t \rightarrow \infty$ . Непонятно, при чем здесь линейность.

Энергетическим критическим числом Рейнольдса называется точная нижняя грань чисел Рейнольдса, при которых основное течение не является монотонно устойчивым. В данном термине не отражена желаемая монотонная устойчивость.

Широко используемый термин “амплификация” непривычен. Не помешало бы краткое пояснение того, что он происходит от английского amplification (увеличение).

2. В определении монотонной устойчивости нет требования стремления к нулю кинетической энергии возмущений. Поэтому утверждение на стр. 20 о том, что монотонная устойчивость предполагает линейную, не вполне точно.

3. Обоснование формулы (1.2.5) следовало бы провести подробнее, так как она использует только начальные значения возмущений, а потеря монотонной устойчивости может произойти при произвольном  $t > 0$ .

4. В тексте диссертации неоднократно встречаются декларации вида “можно показать по аналогии” (стр. 21), “можно показать, что” (стр. 21), “нетрудно показать” (стр. 27), “можно показать” (стр. 28), “можно показать, что решение задачи (2.1.3) существует и единственно” (стр. 51), “можно показать” (стр. 65), “несложно показать” (стр. 65) и т.д. Такого сорта утверждения, не подкрепленные хотя бы краткой схемой доказательств нежелательны в кандидатской диссертации.

5. В лемме 1.4.1 функция  $f$  предполагается достаточно гладкой. Из приведенного доказательства не видно, как эта гладкость используется. Кроме того, не указано, в каком смысле понимается сходимости ряда (1.4.2). Судя по доказательству, речь идет о сходимости

в  $L_2$ .

6. В неравенстве (1.4.12) максимум следует заменить на супремум.

7. Приведенное на стр. 50 определение слабого решения задачи (1.3.4), (1.3.5) нуждается в уточнении. Следовало бы указать, в каком смысле понимается производная  $\frac{\partial v''}{\partial t}$  в (2.1.3) и

в каком смысле выполняется начальное условие  $v''(0, x, y) = v_0''$ .

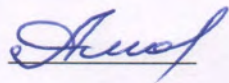
8. Непонятно почему используемый в работе метод аппроксимации назван методом Галеркина-коллокаций. Представляется все же, что используется метод Галеркина со специальным выбором базисных функций.

9. Рисунок 3.8 на стр. 90 приведен без каких-либо комментариев. В то же время остальные рисунки снабжены подробными и содержательными комментариями.

Указанные замечания относятся в основном к характеру изложения полученных результатов и ни в коем случае не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Считаю, что диссертация соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Ключнев Никита Викторович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.01.07 – вычислительная математика.

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой  
математического моделирования  
федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский  
университет «МЭИ»,  
111215 Москва, Красноказарменная ул. 14,  
тел.: 8-495-362-77-74,  
email: AmosovAA@mpei.ru



/Амосов Андрей Авенирович/

23.05.2016

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
Адрес: 111215 Москва, Красноказарменная ул. 14.  
Тел. 8 495 362-70-01 (ректор)  
e-mail: [universe@mpei.ac.ru](mailto:universe@mpei.ac.ru)  
Сайт: <http://www.mpei.ru>

Подпись официального оппонента  
профессора Амосова А.А. заверяю

Начальник управления кадров НИУ «МЭИ»

23.05.2016



/Е.Ю. Баранова /