

УТВЕРЖДАЮ

Временно исполняющий обязанности директора  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича

Сибирского отделения Российской академии наук»,

д.ф.-м.н.,

Краус Е.И.



14 » \_\_\_\_\_ мая \_\_\_\_\_ 2024 года

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

Засько Григория Владимировича «Численный анализ немодовой устойчивости турбулентных течений», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

**Актуальность темы исследования.** При анализе немодовой устойчивости гидродинамических течений представляют интерес так называемые оптимальные возмущения основного течения, испытывающие наибольший рост на конечных временных интервалах. В настоящее время оптимальные возмущения широко используются для описания начального этапа обходного сценария ламинарно-турбулентного перехода, а также применялись для исследования организованных структур, наблюдаемых в сдвиговых турбулентных течениях при нейтральной стратификации.

Организованные структуры были обнаружены в сдвиговых турбулентных течениях и при устойчивой стратификации. Такие течения близки по свойствам к течению в атмосферном пограничном слое. При прямом численном моделировании таких течений в мгновенных полях температуры наблюдаются «фронты» в виде тонких наклонных слоев жидкости с сильной стратификацией. Физические механизмы, отвечающие за появление этих фронтов, не были объяснены. Актуальной задачей является поиск подхода к исследованию организованных структур в турбулентных течениях, который позволит объяснить физические механизмы и условия формирования обнаруженных структур и оценить их пространственные размеры и конфигурацию.

Вычисление оптимальных возмущений сводится к вычислению максимума нормы матричной экспоненты, при этом само значение максимума определяет величину подскока энергии оптимального возмущения. Для ускорения параметрических расчетов представляют

интерес верхние оценки этой величины. Еще одной задачей, возникающей при анализе немодовой устойчивости, является разработка алгоритмов для анализа чувствительности основного течения к стохастическому форсингу и алгоритмов поиска оптимального стохастического форсинга.

**Научная новизна.** Все результаты диссертации, вынесенные на защиту, являются новыми. В частности, разработана технология численного анализа немодовой устойчивости турбулентных течений, использующая эффективные численные алгоритмы. Впервые вычислены оптимальные возмущения стратифицированных турбулентных течений и показано, что найденные возмущения совпадают по пространственным масштабам и конфигурации с наблюдаемыми в таких течениях организованными структурами. Впервые исследованы физические механизмы, отвечающие за появление и развитие наклонных организованных структур. Получен ряд новых верхних оценок максимума нормы матричной экспоненты и продемонстрированы преимущества этих оценок по сравнению с известными ранее. Впервые поставлена задача о поиске оптимального стохастического форсинга, а также разработаны и обоснованы численные алгоритмы ее решения.

**Содержание диссертации.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 122 страницы, включая 27 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 115 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели работы, ставятся задачи, необходимые для их достижения. Излагаются научная новизна, практическая и научная значимость диссертации и положения, выносимые на защиту.

В первой главе вводится понятие оптимального возмущения стационарного решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений и понятие максимальной амплификации нормы решения, а также приводятся известные эффективные алгоритмы вычисления этих величин. Доказывается ряд утверждений, дающих новые верхние оценки максимума нормы матричной экспоненты. Демонстрируются преимущества новых оценок по сравнению с известными ранее и даются выводы и рекомендации по использованию полученных оценок при исследовании гидродинамической устойчивости. Ставится задача о вычислении оптимального стохастического форсинга для линейных динамических систем и обосновываются численные алгоритмы ее решения.

Во второй главе представлен актуальный обзор литературы, посвященный исследованию организованных структур, наблюдаемых в сдвиговых турбулентных течениях. Описывается модельная задача, рассматриваемая на протяжении всей диссертации: стратифицированное турбулентное течение Куэтта. Из результатов прямого численного моделирования этого течения выделяются организованные структуры. На примере стратифицированного

турбулентного течения Куэтта описывается технология численного анализа немодовой устойчивости турбулентных течений, включающая в себя построение линейной модели развития крупномасштабных возмущений и эффективные алгоритмы вычисления оптимальных возмущений.

В третьей главе разработанные численные методы применяются для исследования наклонных организованных структур, наблюдаемых в стратифицированном турбулентном течении Куэтта. Исследуются свойства оптимальных возмущений и их пространственные размеры и конфигурация в зависимости от чисел Рейнольдса и Ричардсона. Проводится сравнение найденных оптимальных возмущений с организованными структурами, выделенными из результатов прямого численного моделирования. Исследуется развитие оптимальных возмущений на основе аналога уравнения Рейнольдса-Орра и выделяется вклад отдельных физических механизмов в их развитие. Строится нелинейная динамико-стохастическая модель возникновения и развития организованных структур в стратифицированном турбулентном течении Куэтта и на ее основе исследуются механизмы появления таких структур.

В заключении приведены основные результаты диссертации.

**Практическая и научная значимость результатов работы** состоит в объяснении физических механизмов, отвечающих за появление и развитие организованных структур, наблюдаемых в сдвиговых турбулентных течениях при устойчивой стратификации. Также научная значимость состоит в том, что разработана технология численного анализа немодовой устойчивости осредненных турбулентных течений и получены новые верхние оценки максимума нормы матричной экспоненты; разработаны алгоритмы вычисления оптимального стохастического форсинга для линейных динамических систем.

**Степень обоснованности научных положений и выводов.** Результаты первой главы обоснованы строгим доказательством математических утверждений и проиллюстрированы численными экспериментами. Результаты второй и третьей глав обоснованы обширными численными экспериментами и сравнением их результатов с результатами прямого численного моделирования стратифицированных турбулентных течений.

#### **Замечания по работе:**

1. В положениях на защиту на стр. 6 отмечается, что «Разработана универсальная технология анализа немодовой устойчивости осредненных турбулентных течений». Понятия «универсальности» и «технология» требуют пояснения. Что автор имеет в виду?
2. Имеются опечатки, например на стр. 9 пропущен предлог «...наблюдаемые стратифицированном...»

3. Нужно пояснение на стр. 51-52 термина «крупномасштабные гармоники».
4. Там же на стр. 51-52 указывается, что наибольших значений плотность полной энергии отдельной Фурье-гармоники на рис. 2.4 достигает на ряде конкретных гармоник, хотя на этом рисунке имеются и другие гармоники с большими значениями указанной величины, которые игнорируются. Это противоречие нужно пояснить.
5. В разделе 3.1.1 на стр. 64 рассмотрено стратифицированное турбулентное течение при конкретном числе Рейнольдса и двух различных числах Ричардсона, но выбор величин этих чисел никак не обосновывается.
6. На рис. 3.10, стр. 88 отсутствует метка вертикальной оси.
7. В некоторых местах диссертации имеются оценочные суждения типа «значительно», «незначительно», смысл которых как правило ясен из рисунков или комментариев. Но на стр. 102 совершенно непонятно, что автор имеют в виду, утверждая, что «Как показали дополнительные расчеты, это отличие незначительно и проявляется в основном в среднем профиле температуры», т.к. дальнейшие комментарии отсутствуют. Идентично на стр. 105: «Статистическая оценка  $\hat{\Gamma}_{\max}$  очень близка к  $\Gamma_{\max}$  из линейной модели». Насколько близка?
8. В конце глав отсутствуют выводы, что затрудняет анализ диссертации. Вместе с тем в заключении, где сформулированы выводы, встречаются оценочные суждения типа «в широком диапазоне» и «хорошее согласование». Автору следовало бы привести более четкие критерии диапазона и согласования.

### **Общая оценка работы.**

Работа выполнена на высоком теоретическом уровне и представляет большой интерес для специалистов в области исследования гидродинамической устойчивости и турбулентных течений. Соискатель имеет достаточный объем публикаций в ведущих научных журналах. Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации. Замечания, представленные выше, имеют характер общих замечаний и не влияют на общую позитивную оценку диссертации.

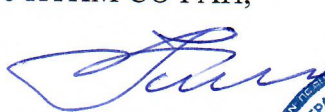
**Заключение.** Диссертационная работа Г.В. Засько является законченным научным исследованием и удовлетворяет всем квалификационным требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор **Засько Григорий Владимирович** заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по

специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден на заседании общепитетского научного семинара «Теоретическая и прикладная механика» ИТПМ СО РАН, 26 апреля 2024 г., протокол № 100. Руководители семинара: академик РАН В.М. Фомин, д.ф.-м.н. Е.И. Краус.

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, профессором, заведующим лабораторией аэрофизических исследований дозвуковых течений ИТПМ СО РАН Козловым Виктором Владимировичем.

Заведующий лабораторией № 8 ИТПМ СО РАН,  
д.ф.-м.н., профессор



В.В. Козлов

14 мая 2024 г.

Подпись В.В. Козлова удостоверяю.  
Ученый секретарь ИТПМ СО РАН,  
к.ф.-м.н.



Ю.В. Кратова

« 14 » мая 2024 г.



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук»

630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1

Телефон: +7-383-330-42-68

Эл.почта: admin@itam.nsc.ru