

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертационную работу

Чувахова Павла Владимировича

«Зарождение турбулентности в сверхзвуковых пограничных слоях», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. — Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация Чувахова Павла Владимировича посвящена теоретическому исследованию и численному моделированию физических процессов, возникающих в сверхзвуковых пограничных слоях при ламинарно-турбулентном переходе (ЛТП). В работе рассматриваются тела модельной конфигурации с гладкими поверхностями, а именно пластины, клинья, пластины с отклонённой поверхностью, а также прямое крыло с тонким профилем.

Следует отметить, что фундаментальная проблема механики жидкости и газа, связанная с ЛТП в пограничных слоях, по-прежнему остаётся нерешённой, а особенно это относится к сверхзвуковым течениям. Этот факт объясняется чрезвычайно сложностью задачи, решение которой существенным образом определяется и внешними возмущениями среды, и взаимодействием с ударными волнами, и процессом развития неустойчивости в пограничном слое, приводящим в итоге к образованию турбулентности. Большой интерес к изучению этой проблемы во всем мире подтверждается, в частности, многочисленными публикациями в научных журналах.

Практическая значимость исследований в данном направлении и ее **актуальность** напрямую связана с разработкой современных сверхзвуковых летательных аппаратов, например, сверхзвукового пассажирского самолёта. Целью при этом является затягивание ЛТП, что позволяет снизить сопротивление и, как следствие, улучшить аэродинамическое качество и топливную эффективность летательного аппарата.

Особенности ЛТП и зарождения турбулентности в сверхзвуковых пограничных слоях к настоящему времени изучены весьма слабо. В этом смысле ряд рассмотренных в диссертации важных вопросов, касающихся природы источников ЛТП в полёте, условий возникновения и развития турбулентных пятен в высокоскоростных пограничных слоях, определяет несомненную **новизну** работы.

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы, включающего 267 источников.

Во **Введении** объясняется само явление ЛТП, обсуждаются его сценарии, характерные для сверхзвуковых пограничных слоев, а также описываются существующие методы предсказания ЛТП. Проблема в предсказании ЛТП и последующего развития турбулентности состоит в высокой чувствительности процесса к разного рода внешним возмущениям, с неизбежностью присутствующих как в аэродинамических трубах, так и в условиях эксплуатации летательных аппаратов. При этом описать универсальным образом фон внешних возмущений чрезвычайно трудно и во многих случаях практически невозможно. Всё это существенно осложняет исследования ЛТП.

Во Введении автор подробно описывает предшествующие теоретические, расчётные и экспериментальные работы по теме диссертации, а также обосновывает актуальность исследований, представленных в диссертационной работе. Здесь же дается общая характеристика работы, защищаемые положения, новизна и практическая значимость, приводятся показатели, свидетельствующие о широком обнародовании полученных научных результатов.

В **первой главе** дается общая постановка физической задачи о развитии возмущений в сверхзвуковом пограничном слое. Исследуемые процессы моделируются в диссертации полными уравнениями Навье–Стокса для сжимаемого газа. Численное решение данных уравнений проводится на многоблочных структурированных расчётных сетках большой размерности с использованием высокопроизводительных вычислительных кластеров. Используемые численные методы и параллельные алгоритмы реализованы в комплексе программ, разрабатываемом в научной группе консультанта по диссертации члена-корреспондента РАН И.В. Егорова. В основе вычислительного алгоритма лежит полностью неявная конечно-объёмная квазимонотонная схема второго порядка аппроксимации по пространству и времени. Вклад автора диссертации в развитие пакета программ заключается в реализации предложенных в диссертации технологий в виде подключаемых подпрограмм, а также в разработке программного инструментария для анализа получаемых численных данных.

Во **второй главе** соискатель рассматривает три методические задачи, решение которых обосновывает применимость используемых методов и алгоритмов к прямому численному моделированию течений с ЛТП в сверхзвуковых пограничных слоях. При этом обсуждаются критерии корректности получаемых численных результатов.

В качестве первой задачей выбрана задача о развитии малых элементарных возмущений в однородном потоке. На ней автор диссертации исследует свойства численного алгоритма. В частности, в работе подтверждается второй порядок сходимости численного решения по времени и по пространству, а также количественно оценивается диссипация схемы, которая проявляется в нефизичном затухании возмущений в пространстве и во времени.

В отличие от первой задачи с гладким решением на гладком фоне, во второй задаче малые возмущения проходят через стационарную ударную волну. Здесь автор показывает, что вязкий профиль скачка необходимо аккуратно разрешать на расчётной сетке. В противном случае амплитуда возмущений за ударной волной начинает существенно зависеть от особенностей численного размывания ударной волны на сетке. Более того, такая зависимость, приводящая к паразитным артефактам, присутствует даже в случае сильного превышения длины волны возмущения по сравнению с толщиной размазывания скачка на сетке. Автор вырабатывает и обосновывает критерии достаточности сеточного разрешения ударной волны. Данное исследование имеет важное методическое значение при рассмотрении именно сверхзвуковых пограничных течений.

Целью рассмотрения третьей задачи является верификация используемого численного метода, проводимая соискателем путем сравнения решения с данными, полученными с помощью альтернативного метода, обладающего низкодиссипативными свойствами. Сама же задача состоит в моделировании всех стадий ЛТП на пластине при числе Маха 3, а полученные разными методами численные результаты хорошо согласуются между собой.

В **третьей главе** соискателем получена асимптотика волнового пакета неустойчивой моды, который растёт в сжимаемом пограничном слое на острой плоской пластине. Её вывод опирается на известные методы линейной теории устойчивости, под асимптотикой же автор понимает асимптотику интеграла, который выражает физическое возмущение скорости, давления и температуры в виде суммы элементарных волн рассматриваемой моды. Полученный результат является **новым** для механики жидкости и газа, а также представляет самостоятельный интерес. Автор успешно использует его как способ задания входных граничных условий в расчетную область, избегая при этом расчета начальной фазы эволюции волнового пакета. Такой подход позволяет существенно экономить расчетное время в такой ресурсоемкой задаче, какой является прямое численное моделирование ЛТП.

Четвертая глава диссертации посвящена явлению спонтанного акустического излучения в сверхзвуковом ламинарном пограничном слое на

сильно охлаждаемой поверхности. Это явление было впервые обнаружено расчетным путем автором диссертации П.В. Чуваховым. Оказывается, существование такого спонтанного излучения акустических волн допускалось ещё в 80-х годах прошлого века, но возможность его реализации оставалась неясной. Соискателем показано, что излучение возникает, когда частота, фазовая скорость и другие спектральные характеристики возмущения второй дискретной моды оказываются близкими к соответствующим характеристикам непрерывного спектра пограничного слоя, соответствующего акустическим волнам. Стоит отметить, что в диссертации это явление исследовано в двумерной постановке как в случае развития возмущений от непрерывно действующего источника на поверхности, так и в случае ограниченных в пространстве и времени волновых пакетов. Однако двумерная постановка вполне оправдана спецификой задачи, так как наиболее быстро растущие волны второй моды также являются двумерными. Также в диссертационной работе автор показывает, что результаты численного моделирования количественно согласуются с результатами расчётов по линейной теории устойчивости. Важно отметить, что спонтанное излучение обнаружено автором и в трёхмерных расчётах, представленных в пятой главе диссертации.

В **пятой главе** диссертации проводится детальное исследование развития волновых пакетов малой амплитуды и интенсивных возмущений в виде турбулентных пятен над пластинами с углом, из-за которого поток испытывает быстрое разрежение. Рассмотрены режимы, свойственные доминированию первой ($M=3$) и второй ($M=6$) мод пограничного слоя. В обоих случаях выводы оказываются аналогичными. Устойчивость течений над углами разрежения по отношению к малым возмущениям исследована путём расчётов в рамках линейной теории. Эти данные количественно согласуются с результатами численного моделирования низкоамплитудных волновых пакетов, полученными в диссертации. Дальнейший анализ структуры возмущённого поля течения при эволюции турбулентных пятен показывает, что пятно растёт по мере его развития вниз по потоку на плоской пластине. При переходе через угол пятно замедляет свой рост и ниже по потоку вновь возобновляет его. При этом оно продолжает развиваться аналогично пятну на плоской пластине. На основании выявленных особенностей развития турбулентных пятен автор делает заключение о том, что выводы о ламинаризации потока за отклонённой поверхностью должны опираться не только на результаты экспериментальных измерений теплового потока к поверхности, но и на результаты других измерений в толще пограничного слоя.

В **шестой главе** автор диссертации исследует возникновение турбулентности в сверхзвуковом пограничном слое на гладком прямом крыле

с тонким выпуклым профилем параболической формы при числе Маха 3. Крылья такой формы устанавливают на некоторых моделях сверхзвуковых пассажирских самолетов с целью ламинаризации их обтекания, хотя, конечно, чаще применяются стреловидные крылья. С помощью прямого численного моделирования и расчётов в рамках линейной теории устойчивости соискатель показывает, что при утолщении профиля крыла максимум амплитуды возмущений, который на пластине достигается на задней кромке, смещается по направлению к передней кромке. Этот интересный результат получен впервые и стал основанием для формулировки автором рекомендации по ламинаризации обтекания крыла. Смысл ее состоит в том, что меры по ламинаризации требуется предпринять только на его передней части до места максимальной амплитуды возмущений, которое надёжно предсказывается теорией.

В этой же главе П.В. Чувахов исследует влияние на ЛТП и зарождение турбулентности трех возможных источников внешних возмущений, а именно микрочастиц, атмосферной турбулентности и акустического шума, генерируемого турбулентным пограничным слоем на фюзеляже выше по потоку. Автором показано, что частицы в малой концентрации не могут привести к ЛТП, а атмосферная турбулентность имеет возмущения на «опасных» для пограничного слоя масштабах длины лишь вблизи диссипативной области спектра турбулентности, а потому является слабой и неспособной вызвать ЛТП на крыле. Следует заметить, что атмосферная турбулентность моделируется на основе стохастического подхода с предположением о ее соответствии энергетическому спектру Колмогорова-Обухова. Для описания же акустического шума автор предлагает другую стохастическую модель, основанную на опубликованных ранее результатах прямого численного моделирования акустических волн турбулентным пограничным слоем на плоской пластине. В результате проведенного численного исследования соискателем показано, что акустический шум порождает возмущения в пограничном слое, которые впоследствии распадаются на турбулентные пятна. Анализ осреднённого коэффициента трения подтверждает, что из всех рассмотренных в данной главе источников только акустический шум способен привести к возникновению на крыле ЛТП.

В **седьмой главе** П.В. Чувахов продолжает исследование возможного влияния микрочастиц на ЛТП в сверхзвуковом пограничном слое. В отличие от предыдущего исследования в этой главе рассматриваются сферические микрочастицы высокой концентрации. Для численного моделирования соответствующего процесса автором разрабатывается подход, основанный на ранее опубликованной теоретической модели. Предложенная автором

математическая модель основана на уравнениях Навье-Стокса, в которых влияние сферической частицы моделируется как описанный функцией Гаусса точечный источник импульса и энергии. Траектория частицы рассчитывается в невозмущённом течении с использованием известной корреляции для коэффициента сопротивления. Разработанная модель тщательно верифицируется автором, и, как результат, выводятся критерии корректного моделирования процесса восприимчивости к микрочастицам. В пользу корректности моделирование также говорит и количественное согласование результатов, полученных с использованием численной и теоретической моделей.

В Заключение изложены главные научные выводы диссертационной работы.

Изучение представленной к защите диссертации в целом позволяет сказать, что оцениваемая работа является актуальным фундаментальным исследованием, позволяющим существенно продвинуться в решении такой серьезной проблемы механики жидкости и газа, какой является проблема ЛТП в сверхзвуковых пограничных слоях.

При общей высокой оценке выполненной диссертационной работы, к диссертации имеется ряд замечаний.

1. В рассматриваемых в диссертационной работе задачах, в частности задачах, моделирующих развитие турбулентных пятен, не анализируются средние значения профиля скорости у стенки и их физическая корректность, а также размеры пристенных ячеек сетки.

2. В шестой главе при рассмотрении акустического шума как возможного источника внешних возмущений автор использует постановку с периодикой по поперечному к потоку направлению. Такая постановка является корректной только тогда, когда длина области в поперечном направлении превышает длину корреляции потенциальных акустических источников. Возможной проверкой корректности используемой постановки могло бы стать проведение расчетов с разной шириной области и сравнение полученных результатов между собой.

3. В работе автор демонстрирует возможность возникновения при развитии ЛТП в сверхзвуковых пограничных слоях спонтанного акустического излучения. К сожалению, в диссертации не обсуждаются перспективы обнаружения такого явления экспериментальным способом, например, при проведении экспериментов в аэродинамических трубах.

4. Из-за высокой чувствительности развития ЛТП к разного рода внешним возмущениям остается не до конца очевидным использование

полученных результатов на практике, в частности при проектировании новых летательных аппаратов.

Вышеуказанные замечания не носят принципиального характера и не снижают высокую оценку представленной к защите диссертационной работы П.В. Чувахова.

Все выносимые на защиту положения, научные результаты и выводы диссертации являются в достаточной степени **обоснованными** и **достоверными**. Полученные результаты соответствуют мировому уровню исследований, о чем убедительно свидетельствует проведенный автором подробный анализ имеющихся публикаций по теме диссертации. В тексте диссертации все результаты хорошо обоснованы, а также достаточно полно опубликованы в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК РФ, баз цитирования Web of Science и Scopus (в том числе, в журналах первого квартала) и обнародованы на конференциях мирового уровня.

К выполнению диссертационной работы соискатель отнесся добросовестно и ответственно. Результаты всех проводимых исследований тщательно анализируются и используются все возможности их верификации. Основные результаты диссертации являются непротиворечивыми и качественно согласуются с имеющимися представлениями о природе перехода к турбулентности в условиях слабого фона внешних возмущений.

Диссертация хорошо структурирована, написана ясным и понятным языком. Все разделы диссертации имеют достаточный иллюстративный материал, тесно связаны друг с другом и являются законченным исследованием. В диссертации соискатель корректно ссылается на источники заимствования материалов. **Автореферат соответствует диссертации** и достаточно полно отражает её содержание и главные результаты.

Заключение

Диссертация П.В. Чувахова является цельной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное **научное достижение**, представляющее значительный вклад в механику жидкости и газа, а именно в понимание механизмов зарождения турбулентности в сверхзвуковых пограничных слоях, а также в развитие методов прямого численного моделирования таких течений вязкого сжимаемого газа. Считаю, что диссертация удовлетворяет всем требованиям, в том числе, п. 9, «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.,

которые предъявляются к докторским диссертациям, а автор диссертации, Чувахов Павел Владимирович, **заслуживает присуждения** ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:
главный научный сотрудник
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
д.ф.-м.н.
телефон: +7 499 220 72 18
e-mail: kozubskaya@imamod.ru

Козубская Татьяна Константиновна



Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»
125047, г. Москва, Миусская пл., д.4, +7 499 978 13 14

Отзыв составлен 10 марта 2023 г.

Подпись Т.К. Козубской заверяю:

учёный секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
к.ф.-м.н.



А.А. Давыдов