

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Чувахова Павла Владимировича
«Зарождение турбулентности в сверхзвуковых пограничных слоях»,
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности
1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация П.В. Чувахова посвящена изучению линейных и нелинейных процессов, определяющих зарождение турбулентности в сверхзвуковых пограничных слоях. Несомненная актуальность выполненного П.В. Чуваховым исследования обусловлена как фундаментальным значением все более глубокого понимания механизмов зарождения турбулентности в сверхзвуковых пограничных слоях в условиях малости первичных возмущений, так и потребностью в разработках высокоточных предсказательных методик для расчетно-теоретического обоснования того или иного способа управления состоянием пограничного слоя на крыльях и элементах органов управления сверхзвуковым летательным аппаратом.

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка условных обозначений, списка публикаций автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы, включающего 267 позиций.

Основные результаты, полученные соискателем по теме диссертации, заключаются в следующем.

1. Разработан подход, позволяющий при прямом численном моделировании (ПЧМ) ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое обойти протяженную линейную стадию развития возмущений и сосредоточиться на моделировании нелинейных процессов, при общем значительном сокращении расчетного времени на решение каждой конкретной задачи. Данный подход реализуется через использование нестационарного входного граничного условия, которое формулируется автором с привлечением расширенного объема данных, сгенерированного ранее в рамках линейной теории устойчивости (ЛТУ) сверхзвуковых пограничных слоев. Эффективность применения разработанного условия убедительно подтверждена автором посредством моделирования процессов развития волновых пакетов первой и второй моды в пограничном слое. По мнению оппонента, совокупность соотношений, предлагаемых автором в качестве «продвинутого» граничного условия, имеет не только вычислительную, но и общетеоретическую значимость, поскольку эта совокупность может трактоваться и как обоснованная асимптотическая модель масштабируемого волнового пакета на больших расстояниях вниз по потоку от первичного локального источника возмущений.

2. Метод прямого численного моделирования впервые применен для предсказания и анализа эффекта спонтанного излучения акустических волн во

внешний поток при развитии второй моды неустойчивости сверхзвукового пограничного слоя на сильно охлажденной поверхности. Показано, что результаты вычислительного эксперимента по анализу данного эффекта находятся в хорошем согласии с предсказаниями, полученными в рамках линейной теории устойчивости, и в целом детально иллюстрируют физические причины спонтанного излучения акустических волн во внешний поток.

3. С применением методов линейной теории устойчивости и прямого численного моделирования получен обширный объем новых данных о механизме стабилизации сверхзвукового пограничного слоя, обусловленном быстрым расширением потока за углом разрежения. Показано, что малые возмущения подавляются при переходе через угловую область, как в случае развития первой моды неустойчивости, так и в случае второй моды, при хорошем согласовании результатов, полученных методами ЛТУ и ПЧМ. Посредством прямого численного моделирования течения с повышенным уровнем вводимых возмущений установлено, что турбулентные пятна, возникшие выше по потоку от угла разрежения, после прохождения угловой области замедляют свой рост на достаточно протяженном участке. При этом автором установлен важный для правильной трактовки экспериментальных результатов факт сильного подавления турбулентных пульсаций в пятне в непосредственной близости к стенке, с соответствующим снижением поверхностного трения и интенсивности теплообмена.

4. Впервые обстоятельно исследованы вопросы устойчивости пограничного слоя на аэродинамически гладком прямом крыле с тонким параболическим профилем, характерным для сверхзвукового пассажирского самолёта. Посредством расчетов по методу e^N ЛТУ установлено, что, при превышении относительной толщиной профиля некоторой «пороговой» величины, участок, на котором максимум интегрального усиления возмущений первой моды испытывает рост, ограничивается некоторым предельным значением продольной координаты, и, соответственно, ниже по потоку возмущения из всего спектрального диапазона не могут по амплитуде превосходить величину, достигнутую при этой координате. Данный результат подтвержден автором посредством прямого численного моделирования развития возмущений в пограничном слое на параболическом профиле с относительной толщиной 10%, с некоторым различием в полученном значении «предельной» координаты относительно предсказаний по e^N методу (методические причины возникающего различия автором убедительно поясняются). В итоге автор приходит к обоснованному заключению о том, что существует пороговый уровень амплитуд начальных возмущений, ниже которого точка начала ламинарно-турбулентного перехода должна резко сдвинуться вниз по потоку, в результате чего вся поверхность профиля будет обтекаться в ламинарном режиме.

5. Разработан, обоснован и апробирован эффективный вычислительный подход для численного моделирования восприимчивости сверхзвукового пограничного слоя к проникающим твердым микрочастицам, близких по форме к сферическим.

Показано, что результаты численного моделирования хорошо согласуются с предсказаниями теоретической модели восприимчивости, разработанной А.В.Фёдоровым, при выполнении принятых в теоретической модели предположений. Здесь важно подчеркнуть, что разработанный подход пригоден для расчетов восприимчивости пограничного слоя к микрочастицам и в сильно градиентных непараллельных течениях, где теоретическая модель оказывается неприменимой. Автором показано также, что сочетание разработанного подхода и асимптотической модели волнового пакета, генерируемого при динамическом воздействии одиночной микрочастицы на течение в сверхзвуковом пограничном слое, позволяет построить относительно простую статистическую модель развития возмущений от проникновения в слой микрочастиц, случайно распределенных в атмосфере.

Степень обоснованности и достоверности полученных соискателем результатов и выдвигаемых научных положений представляется высокой по следующим обстоятельствам. В работе использованы вычислительные методики, которые достаточно апробированы и обоснованы (соответствующие материалы представлены в первых двух главах диссертации). Применимость этих методов в условиях, при которых развиваются изучаемые процессы, детально проанализирована в диссертации, а правильность выбора схемных факторов для проведения прямого численного моделирования специально обоснована. При обработке результатов вычислений в диссертации использованы известные, хорошо апробированные методики. Постановки задач и полученные в диссертации результаты физически непротиворечивы; перекрестное сопоставление результатов, полученных при исследовании линейной стадии развития возмущений прямым численным моделированием и в рамках линейной теории устойчивости, показывает их хорошую согласованность.

Полученные соискателем результаты имеют выраженную теоретическую и научную и практическую значимость. Фундаментальное значение имеют разделы, ведущие к более глубокому пониманию эволюции возмущений и механизмов зарождения турбулентности в двухмерных сверхзвуковых пограничных слоях при малом уровне внешних возмущений, формируя тем самым основу для разработки, верификации и валидации физически обоснованных методик, обеспечивающих достоверное предсказание динамических процессов при ламинарно-турбулентном переходе, вплоть до формирования развитой турбулентности. Представленные в диссертации материалы являются полезными для подготовки и интерпретации экспериментов по устойчивости в контролируемых условиях в сверхзвуковых аэродинамических трубах, в частности для постановки контролируемых экспериментов, направленных на ламинаризацию обтекания относительно тонких профилей и на изучение восприимчивости сверхзвукового пограничного слоя к проникающим в него микрочастицам. На основе выработанных заключений автором

для последующей возможной реализации предложены обоснованные способы затягивания и управления ламинарно-турбулентным переходом на крыльях и механизированных элементах управления сверхзвукового пассажирского самолета.

Диссертация хорошо структурирована, с научным стилем изложения материала. Содержание работы отражает не только большой объем, но и глубину проведенного исследования. Разделы диссертации логически связаны между собой и в совокупности представляют цельное завершенное научное исследование.

Тема диссертации и характер выполненных исследований соответствует специальности 1.1.9 — механика жидкости, газа и плазмы.

Основные результаты диссертации достаточно полно опубликованы. Содержание автореферата соответствует основным положениям и выводам из представленной диссертационной работы.

При прочтении диссертационной работы возник ряд вопросов и замечаний:

1. Неясно, зачем на стр. 58 диссертации автор приводит формулы для расчета числа Стантона, сопровождая это не вполне четким комментарием о существующей связи коэффициента трения и числа Стантона (аналогии Рейнольдса), если в диссертации не приводятся как-либо данные для этой характеристики теплообмена. С другой стороны, при анализе нелинейных процессов развития второй моды неустойчивости было бы целесообразно отразить их специфику и через изменения в значениях числа Стантона, например, для иллюстрации установленных автором фактов замедления роста турбулентного пятна после прохождения им угла разрежения и ламинаризации пристенной области пятна, сопровождаемой, очевидно, уменьшением интенсивности теплообмена с охлаждаемой стенкой.

2. Расчеты по методу ПЧМ с использованием разработанного автором нестационарного входного граничного условия проводятся для области, сокращенной, относительно исходной, как по продольной, так и по поперечной координате (см., например рис. 3.4). Однако в работе отсутствует явное описание граничных условий, накладываемых на газодинамические переменные на внешней границе выделенной подобласти.

3. Отсутствие легенды на рис.4.9б препятствует однозначной трактовке результатов по влиянию различных подходов, примененных автором для расчета пространственного инкремента в задаче спонтанного излучения акустических волн во внешний невязкий поток.

4. В тексте диссертации встречаются терминологически неудачные построения. Например, фразу на стр.148, звучащую как «Охлаждение поверхности стабилизирует первую моду и дестабилизирует вторую моду», вряд ли можно признать однозначной трактуемой». Здесь, очевидно, речь идет о том, что охлаждение поверхности *подавляет развитие* первой моды неустойчивости и *способствует* развитию второй моды. Повсеместное использование автором словосочетаний вида «первая/вторая

неустойчивая мода» вместо более четких понятий «первая/вторая мода (вид) неустойчивости» также вызывает некоторый дискомфорт. Встречаются и «жаргонные» выражения, например, «малозумный сценарий», «адиабатически прогретая стенка».

5. В тексте имеется также ряд опечаток и пропусков, например: в формуле для коэффициента трения на стр. 57; в подрисуночных подписях к рисункам 5.27, 5.28; у оси ординат на графике рис.6.2.

Высказанные замечания относятся к представлению материала на страницах диссертации и не снижают общую высокую оценку диссертационной работы соискателя. Представленная П.В.Чуваховым диссертация является цельной научно-квалификационной работой, вносящий крупный вклад в механику жидкости и газа, а именно в понимание и предсказание линейных и нелинейных процессов, определяющих зарождение турбулентности в сверхзвуковых пограничных слоях, а также в развитие методов прямого численного моделирования высокоскоростных течений вязкого газа. Считаю, что диссертация удовлетворяет всем требованиям (в том числе, п. 9) «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, 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,
доктор физико-математических наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), профессор,
профессор Высшей Школы прикладной математики и вычислительной физики
ФГАОУ ВО «СПбПУ»

06.03.2023 

Смирнов Евгений Михайлович

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
192251, С.-Петербург, Политехническая улица, д.29,
тел./факс (812) 552-66-21, email: aero@phmf.spbstu.ru

