

Утверждаю

врио директора ИТМ СО РАН

д.ф.-м.н. Е. И. Краус

«21»

02

2023 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу 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»

Диссертационная работа П.В. Чувахова посвящена численному моделированию развития неустойчивостей и перехода к турбулентности в сверхзвуковых пограничных слоях. Проблема возникновения турбулентности продолжает оставаться одной из центральных тем исследований в механике жидкости и газа. Прямое численное моделирование стало в последние годы важным инструментом изучения данной проблемы. Численные расчеты позволяют получать большой объем данных о переходе к турбулентности в различных течениях и во многих случаях способны заменить дорогостоящие эксперименты. Поэтому **актуальность** темы диссертации несомненна.

В диссертации рассматривается зарождение турбулентности в пограничных слоях на плоской пластине, пластине с углом расширения и тонком параболическом профиле. Большое внимание уделяется анализу источников внешних возмущений, ответственных за возбуждение неустойчивости в пограничных слоях в условиях, характерных для полета перспективных сверхзвуковых пассажирских самолетов, в частности подробно рассматривается и моделируется порождение возмущений присутствующими в атмосфере твердыми микрочастицами. Характерной особенностью диссертации является широкое использование, наряду с прямым численным моделированием, линейной теории гидродинамической устойчивости, что позволяет не только лучше понять суть происходящих

явлений, но и повысить эффективность численного моделирования и сберечь компьютерные ресурсы.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка сокращений и списка литературы.

Во **введении** дан широкий обзор настоящего состояния проблемы, основных теоретических, численных и экспериментальных работ, выполненных в данной области, сформулированы цели диссертации, ее значимость и научная новизна, положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** дана постановка задачи, решаемые уравнения, начальные и граничные условия, метод решения. Для решения нестационарных уравнений Навье-Стокса используется схема сквозного счета с неявным интегрированием по времени и решением сеточных уравнений с помощью модифицированного метода Ньютона-Рафсона. Схема реализована в виде параллельного расчетного кода, широко применяемого во всех работах группы ЦАГИ, занимающейся численным моделированием ламинарно-турбулентного перехода. Рассмотрены также алгоритмы обработки расчетных данных, анализа возмущенных полей течения.

Вторая глава посвящена обоснованию применимости используемого численного метода и **достоверности** получаемых с его помощью результатов. Автор очень подробно анализирует влияние численной диссипации, проверяет сходимость численного решения при измельчении пространственной и временной сетки. Затем рассматривается задача о взаимодействии малых возмущений с ударной волной. Дело в том, что обычно при использовании схем сквозного счета профили газодинамических величин внутри ударного перехода определяются не физической, а численной вязкостью, толщина такого численного ударного перехода как правило во много раз превышает физическую толщину ударной волны. Автор показывает, что в этом случае трудно ожидать правильного описания взаимодействия скачка с малыми возмущениями, и получаемые в расчете коэффициенты их прохождения и отражения могут значительно отличаться от теоретических. Эта проблема, существование которой игнорировалось во многих предшествующих работах, серьезно осложняет численное моделирование процесса восприимчивости сверхзвукового пограничного слоя к внешним возмущениям. Причины данного явления носят фундаментальный характер: из-за дискретности пространственной сетки нарушается однородность пространства, при изменении положения ударной волны относительно узлов сетки меняется ее

структура и толщина. Требуется, таким образом полное разрешение внутренней структуры скачка за счет физической вязкости, и в работе формулируется критерий сеточного разрешения, достаточного для устранения описанных численных аномалий.

Во второй главе проводится также валидация расчетного кода путем моделирования ламинарно-турбулентного перехода на плоской пластине при числе Маха $M = 3$, происходящего по механизму «наклонного распада» (*oblique breakdown*) и сравнения полученных результатов с данными группы Г. Фазеля (Университет Аризоны, США).

В **главе 3** обсуждается способ возбуждения реалистичных возмущений на входной границе расчетной области. Предлагается использовать линейную теорию устойчивости и асимптотические оценки для описания эволюции волнового пакета на линейной стадии. Это позволяет перенести входную границу расчетной области дальше вниз по потоку в область, где начинают работать нелинейные механизмы и, таким образом, существенно ускорить прямое численное моделирование перехода.

В **главе 4** рассматриваются пограничные слои на охлаждаемой стенке, основное внимание при этом уделяется явлению спонтанного излучения звука за счет появления, в результате охлаждения, мод возмущений, распространяющихся со сверхзвуковой фазовой скоростью по отношению к внешнему потоку. Подобное явление известно для сверхзвуковых слоев смешения и струй, где оно приводит к легко наблюдаемому феномену — интенсивному излучению во внешнее пространство наклонных маховских волн. В диссертации впервые путем прямого численного моделирования подтверждено существование подобного явления в пограничных слоях. Отмечается, однако, что потери энергии на излучение невелики, и поэтому спонтанное излучение не оказывает существенного влияния на переход к турбулентности.

В **пятой главе** рассматривается развитие возмущений над углом разрежения. Хорошо известно, что благоприятный градиент давления оказывает стабилизирующее действие на пограничный слой, и результаты проведенного исследования это подтверждают. Показано, что и в случае первой моды (при $M = 3$), и для второй моды ($M = 6$), рост толщины пограничного слоя за углом приводит к стабилизации течения. Новых неустойчивых мод не появляется. Существовавшие в пограничном слое волновые пакеты после излома стенки затухают, амплитуда новых

появляющихся пакетов намного меньше. Турбулентные пятна хотя и не подавляются, но их развития после поворота потока задерживается.

Глава 6 посвящена переходу на прямом крыле с тонким параболическим профилем — как указывается в диссертации, конфигурации, характерной для проектируемых в настоящее время сверхзвуковых пассажирских самолетов. В этом случае над поверхностью профиля поток разгоняется под действием благоприятного градиента давления, что стабилизирует возмущения первой моды. Анализируются возможные источники возмущений в полете — атмосферная турбулентность, микрочастицы в потоке, акустический шум от турбулентного пограничного слоя на фюзеляже. Исследование, проведенное на основе теории устойчивости, сопровождается прямым численным моделированием, учитывающим стохастический характер и форму спектра атмосферной турбулентности, типичный вид акустического поля от турбулентного пограничного слоя в виде волн с определенным наклоном фронтов. Численные результаты подтверждают выводы линейной теории и показывают, что наиболее опасными являются возмущения от погранслоя на фюзеляже.

В **последней, седьмой главе** более подробно рассматривается возможная роль микрочастиц в иницировании возмущений в пограничном слое. Строится модель, в которой одиночная движущаяся микрочастица моделируются источниками членами в виде дельта-функций в уравнениях Навье-Стокса. Дается теоретическое решение задачи о возбуждении волн неустойчивости под действием таких членов, формулируется численная модель, в которой сосредоточенный источник заменяется гауссовой функцией. Численно моделируется линейное развитие волнового пакета от места столкновения с микрочастицей. Строится статистическая модель для предсказания начала перехода, вызванного множественными микрочастицами.

В **заключении** сделаны общие выводы по результатам, полученным в диссертационной работе.

Уже из этого краткого рассмотрения содержания диссертации очевиден значительный объем проведенных автором исследований, большое количество полученных им **новых результатов**. Работа выполнена на высоком научном уровне, характерном для школы И. В. Егорова, ведущей школы в России по прямому численному моделированию перехода. В диссертации ощущается и благотворное влияние долговременного

сотрудничества автора с таким известным специалистом по линейной теории устойчивости и переходу к турбулентности как А.В. Федоров.

Диссертация П.В. Чувахова, несомненно, является **крупным шагом** в развитии методов численного моделирования перехода в сверхзвуковых пограничных слоях. Разработанный в главе 3 новый метод постановки граничных условий, полученных путем рассмотрения линейной эволюции волновых пакетов, является эффективным инструментом для определения амплитудного критерия перехода и позволяет добиться существенного сокращения времени расчетов по сравнению с обычными подходами. Кроме этого, критически важным для перехода является анализ численных аномалий, возникающих при взаимодействии возмущений с ударными волнами, внутренняя структура которых определяется действием схемной диссипации. Этот вопрос поднят впервые в главе 2, где также получены критерии корректного моделирования, удобные для практического применения.

Диссертация П.В. Чувахова **замечательно улучшает наши знания** о целом ряде сторон многогранного явления ламинарно-турбулентного перехода. Результаты главы 5 о стабилизации пограничного слоя в условиях резкого разрежения потока существенно расширяют скудную расчетную базу данных по развитию турбулентных пятен, которая доступна сегодня в литературе. Частичное подавление турбулентных пятен исследовано впервые. Выводы главы 5 могут использоваться при развитии моделей перехода и при анализе экспериментов, посвященных ламинаризации турбулентных пограничных слоев.

Особо следует отметить **принципиально новые и важные** для механики результаты по исследованию спонтанного излучения звука (глава 4) и доказательство того, что акустический шум является основным источником перехода на прямых крыльях сверхзвуковых самолетов (глава 6). Разработанные в главах 6 и 7 численные модели внешних возмущений (акустический шум, атмосферная турбулентность, микрочастицы) и их применение к задаче о переходе на прямом крыле, на наш взгляд, являются первой удачной попыткой проведения физически обоснованного целостного расчета перехода к турбулентности с учетом реалистичного стохастического фона внешних возмущений. В связи с этим считаем, что диссертация П.В. Чувахова существенно развивает важное научное направление физически обоснованного целостного моделирования ламинарно-турбулентного перехода, а полученные в ней новые результаты являются **крупным научным**

достижением в области механики жидкости и газа и свидетельствуют о значительном личном вкладе соискателя в науку.

Полученные в диссертации результаты **хорошо обоснованы**, а их **достоверность** не вызывает сомнений, поскольку она обеспечена тщательной верификацией и валидацией используемых численных подходов, исследованиями сходимости, сравнениями с данными других авторов, постоянным сопоставлением с предсказаниями линейной теории устойчивости.

В качестве комментариев и замечаний по диссертации можно высказать следующее.

1. Проведенный автором анализ (глава 2) показал, что невозможно ожидать корректного описания взаимодействия малых возмущений с ударной волной, когда профиль ударного перехода «неправильный», недоразрешен и определяется не физической вязкостью, а численной. Однако, мы знаем, что и решение уравнений Навье-Стокса с правильной, физической вязкостью корректно описывает структуру ударной волны только до $M \leq 2$. При больших числах Маха оно сильно занижает толщину ударной волны. Означает ли это, что и полностью разрешив структуру ударной волны в рамках уравнений Навье-Стокса мы не можем надеяться на корректное описание ее взаимодействия с возмущениями и должны обратиться для этого к численному моделированию на основе уравнения Больцмана?

2. В задаче о порождении возмущений микрочастицами присутствует большое количество различных физических факторов, не могут ли оказаться существенными и некоторые из не рассмотренных в главе 7? Например, при столкновении частицы с твердой стенкой, она передает стенке весь свой импульс. Это должно вызвать вибрацию стенки, распространение от места удара упругих волн, которые, в свою очередь, должны также порождать возмущения в пограничном слое.

3. В диссертации достаточно мало сравнений с экспериментом. Некоторые из обнаруженных автором явлений, в частности, спонтанное излучение звука, порождение волн неустойчивости налетающими микрочастицами прямо-таки напрашиваются на экспериментальную проверку, и автор даже обсуждает возможную постановку экспериментов. Хотелось бы высказать, в качестве пожелания для дальнейшей работы, чтобы

автор постарался привлечь внимание экспериментаторов к этим явлениям, и такие эксперименты были бы проведены.

Эти замечания не снижают нашу высокую оценку научной значимости диссертационной работы, представленной П.В. Чуваховым. Как уже говорилось, это важный шаг в исследованиях перехода к турбулентности в сверхзвуковых пограничных слоях. Подчеркнем, что **значимость результатов** для развития механики жидкости и газа диссертации заключается в разработке новых эффективных численных методов моделирования перехода, в создании новых теоретико-расчетных моделей внешних возмущений, в получении новых фундаментальных знаний о развитии турбулентных пятен и доминирующих в полете источниках турбулентности, а также в практических рекомендациях по постановке экспериментов в аэродинамических трубах и по разработке систем ламинаризации обтекания. Полученные в диссертации результаты могут найти широкое применение в научных организациях, изучающих аэродинамику сверхзвукового полета. Можно также надеяться на их практическое применение при разработке перспективного сверхзвукового пассажирского самолета.

Положенные в основу диссертации материалы хорошо апробированы, они опубликованы в ведущих российских и международных журналах, докладывались на самых авторитетных научных конференциях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Таким образом, тема диссертации является актуальной, полученные результаты имеют как фундаментальное, так и прикладное значение для современной механики, а научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации (в том числе, положения, вынесенные на защиту), являются новыми, хорошо обоснованными и в достаточной степени достоверными. Можно заключить, что диссертация П.В. Чувахова является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение в области механики жидкости и газа, а именно в области ламинарно-турбулентного перехода сверхзвукового пограничного слоя. Считаем, 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, несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертация заслушана на научном семинаре ИТПМ СО РАН 13.01.2023 и получила положительную оценку. Содержание отзыва обсуждено на заседании семинара лаборатории вычислительной аэродинамики ИТПМ СО РАН от 13.02.2023, протокол №4.

Доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник лаборатории
волновых процессов в сверхзвуковых
течениях ИТПМ СО РАН, профессор
garonov@itam.nsc.ru, +7 905 957-63-82

Гапонов Сергей Александрович

Доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
лаборатории вычислительной
аэродинамики ИТПМ СО РАН
alex@itam.nsc.ru, +7 913 710-73-99

Кудрявцев Алексей Николаевич

21 февраля 2023 года.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Телефон: +7 383 330-42-68

Факс: +7(383) 330-72-68

Эл. почта: admin@itam.nsc.ru

Сайт: <http://www.itam.nsc.ru/>

