

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **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 является расчётно-теоретическим исследованием механизмов возникновения турбулентности в сверхзвуковых пограничных слоях. Связанная с темой диссертации научная проблема механики жидкости и газа – ламинарно-турбулентный переход – сегодня остаётся нерешённой. Главные успехи в её решении достигнуты различными научными группами на дозвуковых скоростях обтекания, при которых существенно проще проводить экспериментальные измерения. Помимо прочего, переход к турбулентности на сверхзвуковых скоростях осложняется появлением скачков уплотнения и новых особенностей пограничного слоя, таких как вторая мода возмущений газодинамических переменных, которые не проявляются при малых скоростях. Существенным для практики является то, что при турбулизации обтекания возрастает не только поверхностное трение, но тепловой поток к поверхности. В свете этого в диссертации обсуждаются вопросы, связанные с ламинаризацией сверхзвукового обтекания летательных аппаратов, что обуславливает научную значимость работы.

Отмечу, что диссертационное исследование соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники РФ (п.7. Транспортные и космические системы), а также связано с разработкой критических технологий РФ (п.24. Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения). В связи с этим диссертационная работа Чувахова П.В. является актуальной, а полученные в ней результаты являются ценным вкладом как в фундаментальную, так и в прикладную аэрогидромеханику.

Диссертация объёмом 337 страниц содержит введение, семь глав с выводами по каждой главе, заключение, список обозначений и список процитированной литературы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сделан подробный обзор опубликованных работ и обозначено место диссертационной работы Чувахова П.В. среди имеющихся научных исследований проблемы ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) при сверхзвуковых скоростях потока. В автореферате данный обзор разумно

сокращён и касается только новых полученных Чуваховым П.В. результатов. В диссертации рассматривается обтекание гладких модельных поверхностей сверхзвуковых летательных аппаратов при нулевом или малом благоприятном градиенте давления (пластина, клин, пластина с углом разрежения потока, тонкий выпуклый профиль). Вопрос возникновения турбулентности исследуется для слабого фона внешних возмущений, который свойственен условиям реалистичного сверхзвукового полёта.

В главе 1 приведена общая математическая постановка задачи в рамках полных уравнений Навье–Стокса, а также изложен метод её численного решения и описаны методы обработки и анализа расчётных данных.

В главе 2 на ряде модельных задач обоснована достоверность используемого численного метода и показано, что его можно применять для полного моделирования процесса ЛТП. В частности, продемонстрированы свойства численного метода и получены требования, предъявляемые к расчётным сеткам и временному шагу при моделировании нестационарных полей течения. На мой взгляд, следует отметить вторую модельную задачу (раздел 2.2), в которой продемонстрирована фундаментальная несостоятельность схем сквозного счёта при моделировании прохождения малых возмущений через скачок уплотнения, которая преодолевается за счёт разрешения вязкого профиля ударной волны на расчётной сетке, чем обычно пренебрегают исследователи. Несмотря на то, что в автореферате данная задача представлена как вспомогательная и её результаты не вынесены на защиту, считаю, что полученный в задаче вывод является новым, хорошо обоснованным и важным в задачах численного моделирования ЛТП, вызванного внешними возмущениями, проходящими через ударные волны.

В главе 3 Чувахов П.В. разработал новый метод, который позволяет существенно сократить время расчёта развития волновых пакетов в пограничном слое. Для этого в рамках линейной теории устойчивости он получил асимптотику неустойчивого детерминированного волнового пакета вдали от передней кромки обтекаемого тела (пластины) и заменил исходную постановку задачи, в которой волновой пакет возбуждается вблизи передней кромки, на постановку задачи в существенно меньшей подобласти, где асимптотика используется в качестве входного граничного условия. Робастность метода подтверждена прямым численным моделированием развития волновых пакетов как для первой, так и для второй неустойчивых мод сверхзвукового пограничного слоя. Из диссертации ясно, что данный метод применялся для постановки и тестирования «тяжеловесных» расчётных задач последующих глав.

В главе 4 впервые численно продемонстрировано и исследовано явление спонтанного излучения акустических волн ламинарным пограничным слоем над холодной поверхностью, в котором распространяются волны второй моды. Показано, что излучение вызвано синхронизацией волн второй моды с акустическими волнами. Отмечу, что аналогичное явление известно для сверхзвуковых струй, но в пограничных слоях ранее лишь предполагалось теоретически возможным, о чём также упоминается в диссертации. Излучение приводит к новым особенностям, таким как амплитудная модуляция возмущений давления в пограничном слое. Эти особенности объяснены в диссертации, исходя из первых принципов.

В главе 5 исследованы механизмы развития возмущений в сверхзвуковом пограничном слое над пластиной с изломом поверхности, когда пограничный слой развивается в условиях резкого разрежения потока. В рамках линейной теории устойчивости и прямого численного моделирования Чувахов П.В. показал, что слабые возмущения обеих мод подавляются над изломом. Этот вывод кажется очевидным, так как известно, что благоприятный градиент давления приводит к стабилизации течения. Однако иные теоретические и расчётные работы по устойчивости малых возмущений над конфигурациями с изломом поверхности, по-видимому, действительно отсутствуют. Наиболее важный вывод главы 5 сделан по новым результатам прямого численного моделирования турбулентных пятен над такими поверхностями с изломом. Показано, что рост пятна замедляется над изломом, но возобновляется ниже по потоку. Следует подчеркнуть, что моделированием турбулентных пятен занимается лишь несколько научных групп по всему миру, поэтому полученные в главе 5 результаты являются новым и важным вкладом в исследование проблемы ЛТП в сверхзвуковых пограничных слоях.

В продолжение главы 5, в главе 6 исследуется устойчивость течений с плавным разрежением потока, которое свойственно обтеканию прямых крыльев с тонким выпуклым профилем. Исследована устойчивость и рассчитано развитие малых возмущений в модельном пограничном слое над таким крылом. Впервые показано, что возмущения усиливаются не до самой задней кромки крыла, как в случае плоской обтекаемой поверхности, а лишь на передней части крыла. Благодаря этому в диссертации сделан важный для практики вывод о том, что усилия по ламинаризации обтекания прямого крыла требуется предпринять только на передней части крыла.

Считаю, что в главе 6 получен наиболее ценный результат диссертации. Он заключается в том, что впервые указан наиболее вероятный источник внешних возмущений, которые приводят к турбулизации обтекания прямых

крыльев в полётных условиях. Для этого Чувахов П.В. рассмотрел три возможных источника внешних возмущений: атмосферную турбулентность, акустический шум от турбулентного пограничного слоя на фюзеляже, а также микрочастицы атмосферы. Чувахов П.В. предложил новые физико-математические модели для первых двух источников возмущений, которые не требуют настройки каких-либо полуэмпирических констант. На базе этих моделей проведено прямое численное моделирование ЛТП на крыле, вызванного реалистичными стохастическими внешними возмущениями (для микрочастиц выполнены оценки). Показано, что наиболее вероятным источником турбулентности на прямых крыльях являются акустические возмущения. Сделанный вывод позволил сформулировать подходы к ламинаризации прямых крыльев сверхзвуковых самолётов, которые основаны на уменьшении интенсивности акустического шума.

Несмотря на то, что роль микрочастиц в обычных атмосферных условиях оказалась незначительна, в диссертации отмечено, что микрочастицы могут оказаться главным источником ЛТП в условиях их повышенной концентрации. В связи с этим в главе 7 разработан новый численный метод моделирования восприимчивости сверхзвукового пограничного слоя к сферическим микрочастицам. Продемонстрировано количественное согласование по амплитуде возмущений пограничного слоя, рассчитанных по предложенному методу и в рамках линейной теории устойчивости. В заключение главы 7 Чувахов П.В. развил статистическую модель ЛТП из-за микрочастиц, которая предполагает применение разработанного численного метода. Следует отметить, что на основе результатов главы 7 в диссертации сформулированы рекомендации по проведению трубного эксперимента по восприимчивости к микрочастицам.

Диссертация написана на хорошем научном языке. Все разделы диссертации изложены лаконично и понятно, хорошо проиллюстрированы, тесно связаны друг с другом и производят впечатление целостной завершённой работы. Сделанные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации хорошо обоснованы.

Результаты по теме диссертации находятся на мировом уровне и хорошо апробированы. Они успешно докладывались на российских и зарубежных конференциях, а также опубликованы в различных изданиях, в том числе в 34 изданиях из списка ВАК РФ, международных баз цитирования Web of Science и Scopus, включая 9 высокорейтинговых зарубежных журналов. Следует отметить, что на протяжении всей диссертации Чувахов П.В. уделяет много внимания вопросам верификации получаемых результатов, в частности, вопросам сеточной сходимости результатов

численного моделирования и вопросам количественного сравнения численных результатов с результатами линейной теории устойчивости. Это подтверждает достоверность положений, новизну результатов и выводов диссертации.

Автореферат соответствует диссертации и отражает её содержание.

По материалу диссертации имеются небольшие замечания:

1) В главе 3 диссертант развил новый оригинальный метод, который позволяет существенно сократить время расчёта развития волновых пакетов в пограничном слое. Данный метод применялся далее для постановки и тестирования «тяжеловесных» расчётных задач последующих глав. Считаю, что было бы возможным использование этого метода для проведения систематических расчетов для определения критической амплитуды возмущений, при которых начинается ЛТП, ведь такой критерий до сих пор не получен.

2) В главе 4 диссертантом показано, что излучение приводит к новым особенностям, таким как амплитудная модуляция возмущений давления в пограничном слое. Несмотря на то, что экспериментальное измерение слабого акустического излучения весьма затруднительно, полученные результаты можно воспринимать как рекомендацию к постановке эксперимента. К сожалению, в рассмотренном случае температура поверхности слишком мала ($T_w = 0.5T_e$) и ее, по-видимому, будет трудно достичь в эксперименте, где $T_e \approx 100K$. В тоже время возникновение спонтанного излучения при других температурах поверхности практически не обсуждается.

3) В главе 5 параметрические расчеты выполнены для разных толщин профиля, однако не ясно, почему для численного моделирования выбрана именно толщина профиля 10%.

4) В главе 7 говорится, что использовались достаточно тяжелые частицы ($\rho_p \gg \rho$), поэтому их траектория близка к прямой линии. Однако, инерционность частиц определяется не только их плотностью, а также и диаметром, скоростью, геометрией конуса и вязкостью среды, в которой осуществляется их движение. Все указанные параметры входят в безразмерный критерий, называемый числом Стокса.

5) Хотелось бы понять, как изменятся выводы к главе 7, если изменится (скажем, уменьшится) радиус частиц или изменится (скажем, увеличится) их концентрация.

Высказанные выше замечания никоим образом не снижают научной и практической значимости диссертационной работы.

Таким образом, диссертация Чувахова П.В. обладает **высокой научной новизной**, является законченным научным исследованием и отражает крупный вклад автора в механику жидкости, газа и плазмы, а именно, в раздел ламинарно-турбулентного перехода сверхзвуковых пограничных слоёв, а также в разработку и применение теоретических и численных методов исследования задач этого раздела. В диссертации на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное научное достижение. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы. Выполненная работа удовлетворяет критериям, установленным ВАК РФ для докторских диссертаций в «Положении о присуждении ученых степеней» (в том числе, п.9), утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. №842, а автор диссертации, Чувахов Павел Владимирович, безусловно заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Заведующий лаборатории №8 физического моделирования
двухфазных течений ОИВТ РАН,
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.

А.Ю. Вараксин

10.03.2023

Подпись А.Ю. Вараксина заверяю
Заместитель директора ОИВТ РАН



Н.Н. Иванова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

Адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

Интернет-страница: <http://www.jiht.ru>

Телефон: +7 (495) 485-8345

Адрес электронной почты: office@ihed.ras.ru