


«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора
ФГУ
аэро

иК комплекса
полёта ЛА

С.В. Ляпунов

 02 2021 г

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»
на диссертационную работу
Семенова Александра Николаевича
«Численное моделирование малых возмущений
в сверхзвуковом пограничном слое»,
представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа А.Н. Семенова является весьма **актуальной**, так как она имеет отношение к решению важной проблемы механики жидкости и газа: ламинарно-турбулентному переходу течений в пограничных слоях. Работа посвящена численному исследованию развития малых возмущений по времени и пространству в сверхзвуковых пограничных слоях плоской пластины, приводящих к турбулизации течения.

Диссертация является результатом **законченной** научно-исследовательской работы автора.

Диссертационная работа содержит 105 страниц и состоит из введения, четырёх глав, выводов и списка литературы.

Во **введении** приведен обзор имеющихся в литературе работ по теме диссертации, сформулированы цели и исследуемые задачи, отмечены их актуальность, научная новизна и практическая значимость.

В **главе 1** предложен и реализован эволюционный метод (метод установления решения на экспоненциальную зависимость от времени) для нахождения наиболее опасных возмущений с точки зрения их опережающего нарастания во времени. С помощью данного метода получены результаты по влиянию направления вдува газа с поверхности пластины на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя.

В главе 2 с помощью прямого численного моделирования исследуется взаимодействие акустических возмущений со сверхзвуковым пограничным слоем. Установлено, что максимум амплитуды колебания полной скорости внутри пограничного слоя превышает в несколько раз амплитуду во внешней акустической волне. Получено, что наибольшие значения амплитуды колебания скорости внутри пограничного слоя при малых числах Рейнольдса достигаются для акустических волн, падающих и скользящих под углами 30° к поверхности пластины. В этом случае рост амплитуды по отношению к внешней акустической волне достигает 10-кратного значения.

В главе 3 проводится численное исследование вводимых синусоидально по времени возмущений от одного или двух точечных источников в сверхзвуковом пограничном слое на плоской пластине при числе Маха $M=2.5$. В случае одиночного источника возмущений, волновые характеристики развития неустойчивых возмущений, полученных из расчета, соответствуют экспериментальным данным. В случае двух источников, в результате интерференции образуется последовательность из узлов и пучностей в β -спектрах. Эксперимент при близких параметрах набегающего потока показал совпадение с численными результатами.

В главе 4 численно изучено развитие единичного, локализованного в пространстве и времени, возмущения в сверхзвуковом пограничном слое при $M = 2$. Проанализирована пространственная структура волнового пакета в пограничном слое. Обнаружено раскрытие волнового пакета в продольном и трансверсальном направлениях. Проведены оценки скоростей распространения переднего и заднего фронтов волнового пакета. Пульсации массового расхода разложены в спектры по частотам и волновым числам, откуда были установлены наиболее растущие возмущения.

В выводах сформулированы основные результаты работы.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- 1) Предложен и применен эволюционный метод для решения двумерной задачи об устойчивости пограничного слоя, основанный на развитии возмущений во времени;
- 2) Впервые исследовано взаимодействие произвольно ориентированной в пространстве медленной акустической волны и сверхзвукового пограничного слоя при числе Маха $M=2$;
- 3) Получены новые данные о развитии возмущений вниз по потоку внутри пограничного слоя от одного или двух источников синусоидальных по времени возмущений;
- 4) Исследовано линейное развитие локализованного в пространстве и времени единичного возмущения в сверхзвуковом пограничном слое при $M = 2$.

Практическая значимость работы заключается в том, что использованные в работе методы могут применяться для широкого класса течений, а именно: эволюционный метод позволяет определить параметры наиболее неустойчивых волн для широкого класса задач. Данные прямого численного моделирования могут использоваться как основа для постановки эксперимента и являться также дополнительной информацией к экспериментальным результатам.

Достоверность диссертационной работы обеспечена тем, что численные результаты согласуются с экспериментальными данными, полученными на установке с хорошо известными параметрами и использованием апробированных экспериментальных методик. Используемые подходы основаны на технологиях, разработанных в ИТПМ СО РАН, с помощью которых были получены признанные во всем мире научные результаты. Данные, представленные в разделах диссертационной работы, дополняют друг друга и дают целостную картину изучаемого явления. Свидетельством достоверности также является широкая апробация результатов диссертации на многих российских и международных научных конференциях, а также публикации в рецензируемых журналах.

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 реферируемых отечественных и зарубежных изданиях из списка ВАК, а также в трудах российских и международных конференций.

Автореферат корректно отражает содержание диссертации.

В качестве **замечаний** по диссертации можно высказать следующее:

- 1) В работе не приводятся данные о структуре сетки, не уделяется внимание сеточной сходимости, в частности не проводится анализ с помощью последовательного измельчения сетки.
- 2) Не производится обоснование выбора параметров потока.
- 3) Интерпретация численных данных по развитию волновых пакетов в пограничном слое (глава 4) проведена недостаточно подробно, в частности не представлены поля двумерных спектров в плоскости частота — поперечное волновое число.
- 4) В работе имеются опечатки и орфографические ошибки.

Замечания не носят принципиальный характер и не влияют на общую положительную оценку работы.

В целом, диссертационная работа Семенова Александра Николаевича является законченной научно-квалификационной работой и полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы.

Начальник отдела №2 НИО-8 ФГУП «ЦАГИ»,
доктор физ.-мат. наук

Новиков Андрей Валерьевич

Главный научный сотрудник ФГУП «ЦАГИ»,
член-корр. РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор

Егоров Иван Владимирович

Наименование организации: Государственный научный центр Федеральное
государственное унитарное предприятие «Центральный
аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»

Адрес организации: 140180, Московская область, г. Жуковский,
ул. Жуковского, 1.

Интернет страница: <http://tsagi.ru>,

Телефон: +7 (495) 556-43-03

Сведения о ведущей организации по диссертации
Семенова Александр Николаевича
"Численное моделирование малых возмущений в сверхзвуковом пограничном слое"
 по специальности 01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы
 на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Полное наименование организации в соответствии с уставом:	Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»,
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом:	ФГУП «ЦАГИ»
Ведомственная принадлежность организации	Министерство промышленности и торговли РФ
Полное наименование структурного подразделения, составляющего отзыв:	Научно-исследовательский комплекс №40, научно-исследовательское отделение 8 (НИО 8)
Почтовый адрес организации:	ул. Жуковского 1, Московская область, г. Жуковский, 140180, Россия
Веб-сайт	http://www.tsagi.ru/
Телефон	+7 (495) 556-43-03
Адрес электронной почты	info@tsagi.ru

Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющего отзыв, в рецензируемых научных изданиях за последние пять лет по теме диссертации (не более 15 публикаций).

№	Авторы	Название	Издательство, журнал, год, №, страницы	Вид, год
1	И.О. Погорелов, П.В. Чувахов	Влияние энтропийного слоя на турбулизацию сверхзвукового пограничного слоя в следе за изолированными неровностями	Изв. РАН. МЖГ, 2020. № 5, С. 21-27.	Статья, 2020
2	М.В. Устинов	Статистическое описание перемежаемости в переходной области при низкой степени турбулентности потока	Изв. РАН МЖГ, №4, 2020, С. 11-23	Статья, 2020
3	И.И. Липатов, В.К. Фам	Распространение возмущений в пограничном слое в условиях сильного гиперзвукового взаимодействия	Доклады РАН. Физика, технические науки, Т. 490, № 1, 2020, стр. 70-72	Статья, 2020
4	P.V. Chuvakhov, A.V. Fedorov, A.O. Obraz	Numerical modelling of supersonic boundary-layer receptivity to solid particulates	Journal of Fluid Mechanics, 2019, №859, с. 949-971	Статья, 2019

5	К.Х. Динь, И.В. Егоров, А.В. Федоров	Влияние волн Маха на ламинарно-турбулентный переход при сверхзвуковом обтекании плоской пластины	Изв. РАН. МЖГ, 2018, № 5, С. 113-124.	Статья, 2018
6	P.V. Chuvakhov, A.V. Fedorov, A.O. Obraz	Numerical simulation of turbulent spots generated by unstable wave packets in a hypersonic boundary layer	Computers and Fluids, Vol.62, 2018, pp. 26-38	Статья, 2018
7	И.В. Егоров, А.В. Новиков, А.В. Фёдоров	Прямое численное моделирование ламинарно-турбулентного перехода при гиперзвуковых скоростях потока на супер-ЭВМ	ЖВМ и МФ, Том.57, №8, 2017, с. 1347-1373	Статья, 2017
8	Andrey Novikov, Ivan Egorov, Alexander Fedorov	Direct Numerical Simulation of Wave Packets in Hypersonic Compression-Corner Flow	AIAA Journal, Vol. 54, No. 7, 2016, pp. 2034-2050	Статья, 2016
9	И.В. Егоров, А.В. Новиков	Прямое численное моделирование ламинарно-турбулентного обтекания плоской пластины при гиперзвуковых скоростях потока	ЖВМ и МФ, том 56, № 6, 2016, с. 145-162	Статья, 2016

Учёный секретарь

Учёного совета ФГУП «

д.т.н., доцент

С.А. Таковицкий

01.02.2021