

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Семенова Александра Николаевича «Численное моделирование малых возмущений в сверхзвуковом пограничном слое», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа посвящена численному моделированию влияния малых акустических возмущений, выдува одиночных и парных струй на устойчивость развивающихся вдоль пластины сверхзвуковых пограничных слоев. Она имеет отношение к проблеме ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП). Полученные с использованием пакета ANSYS численные прогнозы удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными в аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ им. С.А.Христиановича СО РАН. Проблематика диссертации классическая, фундаментальная. Работа согласуется с Перечнем основных направлений технологической модернизации РФ (3. Космические технологии, прежде всего связанные с телекоммуникациями, включая ГЛОНАСС и программу развития наземной инфраструктуры). Проблематика диссертации находится в русле приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ (7. Транспортные и космические системы) и связана с разработкой критических технологий РФ (24. Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения). Диссертация выполнена в известной научной школе по ЛТП ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН профессора Гапонова С.А. Таким образом, представленную диссертацию можно признать актуальной.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Известный эволюционный метод, основанный на развитии возмущений во времени, применен для решения двумерной задачи об устойчивости сверхзвукового пограничного слоя (ПС).
2. Решена задача о влиянии направления вдува газа на устойчивость сверхзвукового ПС на пластине. Показано, что ориентированный по нормали к стенке вдув способен многократно увеличить степень нарастания возмущений в ПС.
3. Прямым численным моделированием решена задача о взаимодействии произвольно ориентированной в пространстве медленной акустической волны со сверхзвуковым ПС, развивающимся на пластине. При числе Маха 2 обнаружено, что при углах падения и скольжения 30° максимум амплитуды возмущения скорости в ПС достигает наибольшей величины порядка 10.

4. Прямым численным моделированием решена задача о развитии малых возмущений вниз по потоку внутри ПС на пластине от одного или двух источников периодических струй, как синхронных, так асинхронных. Произведено успешное сравнение волновых спектров возмущений от источников с экспериментальными данными, полученными на аэродинамической трубе ИТПМ СО РАН $T=325$ при числе Маха 2.5.
5. Прямым численным моделированием исследовано линейное развитие пакетов возмущений от источников различной длительности в сверхзвуковом ПС на пластине при $M = 2$. Показано, что в процессе движения волнового пакета вниз по течению максимальная амплитуда возмущений уменьшается, однако амплитуда на переднем фронте возрастет. При увеличении длительности вводимых возмущений возникают два волновых пакета, между которыми формируется продольная структура.

Квалификационная состоятельность работы как кандидатской диссертации по физико-математическим наукам по специальности 01.02.05 не вызывает сомнений.

Практическая значимость работы определяется ее принадлежностью к актуальной проблематике ЛТП.

Апробация работы вполне приличная. В соавторстве опубликована статья в МЖГ. В списке публикаций 8 статей в изданиях перечня ВАК.

Структура диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня литературных источников. Краткое введение повествует не только об объекте исследования, об его актуальности, о целях и структуре работы, но и фактически заменяет собой обзорную главу. Первая глава содержит описание и применение эволюционного метода для анализа влияния вдува на нарастание возмущений в сверхзвуковом ПС на пластине. Во второй главе представляется прямое численное моделирование акустического воздействия на устойчивость ПС на плоской пластине. Третья глава посвящена численному исследованию распространения возмущений от одного и пары источников – выдуваемых струй в развивающемся вдоль пластины ПС. В четвертой главе исследуется линейное развитие пакетов возмущений от источников различной длительности в сверхзвуковом ПС на пластине при $M = 2$. В заключении приводится перечень выводов. В списке литературных источников имеется 112 наименований (в нем нет ссылок на оппонента).

Работа довольно типична для диссертаций по специальности 01.02.05. Рассматривается несколько взаимосвязанных интересных гидродинамических задач. Три из них решаются методами прямого численного моделирования с помощью пакета ANSYS. Методическая часть, включая тестирование, могли быть подробными и детальными. Содержательные части вполне благополучны. Украшает работу сравнение численных прогнозов с экспериментальными данными в аэродинамической трубе ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН.

Несколько удивляет отсутствие обзорной главы и размещение обзора во введении. Общее впечатление от диссертации Семенова А.Н. в целом положительное, хотя имеются претензии.

Несколько слов о концептуальной обоснованности работы и об ее месте в спектре работ данного профиля.

Диссертация посвящена перспективной теме - численному моделированию малых возмущений и их воздействию на сверхзвуковой ПС. Дело в том, что в численном моделировании течений обычно рассматриваются фиксированные входные условия, например $U=1$, в то время как в натуре (в атмосфере, в аэродинамических трубах) присутствуют возмущения, оказывающие влияние на гидромеханические процессы.

Диссертация подготовлена в научной школе по ЛТП и поэтому часть по применению эволюционного метода для решения задачи усиления возмущений в сверхзвуковом ПС за счет вдува от стенки выглядит вполне оправданной.

Применение прямого численного моделирования также созвучно времени. Прогресс в компьютерах и пакетных технологиях стимулирует постановку и решение задач распространения возмущений в ПС при сверх- и гиперзвуковых скоростях потока. Хотя в диссертации имеются ссылки на работы научной школы ЦАГИ чл.-корр.РАН Егорова И.В., но важная веха – докторская диссертация Новикова А.В. – осталась не отмеченной (см. Новиков А.В. Численное моделирование устойчивости и ламинарно-турбулентного перехода в гиперзвуковом пограничном слое // Диссертация докторская физико-математических наук: 01.02.05. Жуковский: МФТИ, 2017. 229с). Кстати, следует подчеркнуть, что цаговцы активно продвигают для решения аналогичных задач доморощенный пакет HFlow.

Применение коммерческого пакета ANSYS в данной диссертации может быть отчасти оправдано сравнением с экспериментом в трубе ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН. Все-таки надо понимать, что в численном эксперименте присутствует неопределенность численных прогнозов, обусловленная выбранной схемой дискретизации, расчетной сеткой, методами решения уравнений. Вопрос о том, как сочетается эта неопределенность вычислений с обусловленными физическими причинами пульсациями, остается открытым и требует специального исследования. На самом деле отчасти эта проблема может быть рассмотрена в методическом исследовании по влиянию на результаты моделирования различных расчетных сеток, численных методов, пакетов. Такое исследование, например, выполнено при решении задачи нестационарного турбулентного обтекания полукругового цилиндра (см. Isaev S., Baranov P., Popov I., Sudakov A., Usachov A., Guvernuyuk S., Sinyavin A., Chulyunin A., Mazo A., Demidov D., Dekterev A., Gavrilov A., Shebelev A. Numerical simula-

tion and experiments on turbulent air flow around the semi-circular profile at zero angle of attack and moderate Reynolds number // Computers and Fluids. 2019. Vol.188. No. 30. P. 1-17).

Сделанные дальнейшие замечания и вопросы призваны расширить область дискуссии и придать импульс дальнейшим разработкам.

1. Пакет ANSYS включает два гидродинамических блока CFX и Fluent. Какой из них применяется? Почему в автореферате нет ссылки на пакет? Вычислительная методическая часть могла быть более солидной. Хотелось посмотреть на влияние схем, сеток, пакетов на численные прогнозы.
2. Выбор исходных параметров, в частности на стр.65, никак не мотивируется. Числа Маха зафиксированы на уровне 2, 2.5. Почему?
3. По главе 1. Направленный вдув через пористую стенку хорошо бы привязать к какому-то физическому аналогу. Как реализовать его? Каков смысл пористой стенки в такой постановке? Кстати, почему C_q берется с минусом? Частенько в работе говорится о «степени нарастания». Что нарастает, какой параметр? «Критический слой» не пояснен. Что означает тангенциальный вдув? Ведь это не щелевая струя.
4. По главе 2. Как выбирается расчетный интервал L (Стр.32)? Что такое T_w ? T вдува чему равно? Какова скорость на стенке по нормали и вдоль стенки (Стр.33)? Каков пристеночный шаг сетки (Стр.45.)? $1/Re$ для корректного расчета ламинарных течений выдерживается? Сетка неравномерная? Есть ли сгущение к стенке? В работе [109] проводилась верификация расчетной сетки, как на основе уменьшения шагов сетки, так и путем сравнения данных с результатами, полученными на основе уравнений устойчивости параллельных течений вблизи стенки. Что мешало поместить этот материал в диссертацию? И вывод –то какой? Есть ли сеточная независимость? Вывод на стр.49. о том, что расчетная сетка, использованная в моделировании достаточна для решения задач такого класса, сделан без варьирования сетками.
5. Продолжение методических замечаний по главам 3,4. На стр.64. отмечается, что «берутся явные схемы второго порядка», а порядок аппроксимации по пространственным координатам и по времени какой? Нет данных по структуре сетки. Есть ли сгущение к местам введения возмущений? Есть ли сеточная сходимость при воспроизводстве нестационарного процесса? Какова температура струй? Оказывает ли она влияние на решение? Неплохо бы показать выход на периодику по интегральным и локальным характеристикам. Можно было и трехмерные поля для иллюстрации роста возмущений построить, подобно А.В. Новикову. Вычислительная кухня для решения задачи в главе 4 отсутствует (Стр.83.). Задается нормальный

массовый расход интенсивностью $1.5 \text{ кг/м}^2\text{-с}$. Откуда берется эта величина и как этот фактор влияет на результаты?

6. В работе сделано несколько интересных заключений.

6.1. Наибольшие значения амплитуды колебания скорости внутри ПС при малых числах Рейнольдса ($Re < 500$) достигаются для акустической волны, скользящей и падающей на пластинку под углами 30 градусов одновременно (стр.61). В этом случае рост амплитуды скорости достигает 10 кратного значения. Как объяснить чувствительность ПС именно к этим углам?

6.2. Выявлено (стр.27), что наиболее растущие возмущения соответствуют частоте 16 кГц , что соответствует частотному параметру $F = 5.75 \cdot 10^{-5}$. Установлено удовлетворительное согласование по степени нарастания в сравнении с локально непараллельной теорией для частоты 16 кГц . Как это заключение зависит от чисел Маха и Рейнольдса?

6.3. При $M=2$ выявлено, что скорость переднего фронта пятна возмущений в 2 раза превосходит задний фронт (стр.62). Как изменятся эти выводы при других числах Маха?

7. Из расчетов вытекает влияние возмущений на возбуждение сверхзвукового ПС. Кардинальный вопрос, а с ЛТП как? Какие могут быть заключения в пользу затягивания ЛТП?

Автореферат в целом правильно отражает содержание диссертации.

Таким образом, представленная диссертационная работа является законченным научным исследованием по численному моделированию влияния возмущений на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя. Выполненная работа удовлетворяет квалификационным требованиям, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям, в том числе соответствует требованиям п.9 “Положения о присуждении ученых степеней”, а ее автор Семенов А.Н. заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Заведующий лабораторией фундаментальных исследований Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации,
доктор физико-математических наук по специальности 01.02.05 механика жидкости, газа и плазмы, профессор

Исаев Сергей Александрович

09 февраля 2021 года

isaev3612@yandex.ru 196210, СПб,

Подпись профессора Исаева (

Проректор по персоналу-
Начальник УК

М.И.Лобов

Председателю
диссертационного совета
Д 003035.02
академику В.М. Фомину

ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Я, **Исаев Сергей Александрович**, даю свое согласие выступить в качестве официального оппонента по диссертации Семенова Александра Николаевича на тему: Численное моделирование малых возмущений в сверхзвуковом пограничном слое на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

О себе сообщаю:

Ученая степень, отрасли науки	Д.ф.-м.н.
Научные специальности, по которым защищена диссертация	01.02.05- механика жидкости, газа и плазмы
Ученое звание	профессор
Тел:	8 (921) 4045516
E-mail:	isaev3612@yandex.ru
Должность, подразделение	Заведующий НИЛ фундаментальных исследований
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации»
Адрес служебный: Почтовый индекс, город, улица, дом	196210, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38
Web-сайт организации.	https://spbguga.ru
Телефон организации.	8 (812) 704-18-18
E-mail организации.	info@spbguga.ru

По теме рассматриваемой диссертации имею 204 научных работ, в том числе в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 работ):

№	Авторы	Название	Издательство, журнал, год, №, страницы	Вид, год
1	Dehai Kong; V. N. Afanasiev; S. A. Isaev; D. V. Nikushchenko	Jet vortex heat transfer in turbulent air flow around a plate with a slit rib	International Journal of Heat and Mass Transfer, , Vol: 146, Page: 118867	Статья, 2020
2	Mironov, A.A., Isaev, S.A., Popov, I.A. и др..	Improving the Efficiency of Aircraft Heat Exchangers	Russ. Aeronaut. 63, 147–154	Статья, 2020

3	Isaev, S.A., Chornyi, A.D., Zhukova, Y.V. и др.	Coordinated Boundary Conditions at the Inlet to the Computational Domain with Simulation of Laminar Flow Past a Plate Used as an Example.	J Eng Phys Thermophy 93, 132–135	Статья 2020
4	S. A. Isaev; D. V. Nikushchenko; M. S. Gritckevich; A. I. Leontiev; O. O. Milman	NT Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a dense packing of inclined one-row oval-trench dimples	International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol: 145, Page: 118737	Статья 2019
5	Isaev, S.A., Sudakov, A.G., Chornyi, A.D. и др.	Heat Transfer Enhancement in a Microtube with an In-Line Package of Spherical and Inclined Oval-Trench Dimples during Transformer-Oil Pumping	High Temp 57, 885–888	Статья 2019
6	Sergey Isaev; Mikhail Gritckevich; Alexandr Leontiev; Igor Popov	Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall	Acta Astronautica, ISSN: 0094-5765, Vol: 163, Page: 202-207	Статья 2019
7	Isaev, S.A., Gritskovich, M.S., Leontyev, A.I. и др.	Turbulent flow acceleration and abnormal intensification of the separated flow in a channel with dense arrangement of inclined single-row oval-trench dimples.	Thermophys. Aeromech. 26, 651–656	Статья 2019
8	Isaev, S.A., Afanasiev, V.N., Egorov, K.S. и др.	Experimental Study of the Influence of the Shape of the Gap between the Rib and Flat Plate on the Near-Wall Flow Structure and Heat Transfer.	High Temp 57, 379–387	Статья 2019
10	Isaev, S.A., Gritckevich, M.S., Leontiev, A.I. и др.	Anomalous Intensification of a Turbulent Separated Flow in Inclined, Single-Row, Oval-Trench Dimples on the Wall of a Narrow Channel	High Temp 57, 771–774	Статья 2019

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

Согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело соискателя и их дальнейшую обработку.

Дата 13.10.2020

Подп