

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.224.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ»
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» (ФИЦ ИУ РАН),
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 30.03.2023 №5

О присуждении Чувахову Павлу Владимировичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Зарождение турбулентности в сверхзвуковых пограничных слоях» по специальности 1.1.9. — «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 15.12.2023 (протокол заседания № 2) диссертационным советом 24.1.224.02, созданным на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и Управление» Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН), по адресу 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, приказ о создании диссертационного совета №1337/нк от 24.10.2022.

Соискатель — Чувахов Павел Владимирович, дата рождения 13.03.1986, защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Особенности численного моделирования сверхзвуковых турбулентных течений на основе уравнений Рейнольдса» в 2013 году в диссертационном совете Д 403.004.01, созданном на базе Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический

институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФГУП «ЦАГИ»), окончил аспирантуру ФГУП «ЦАГИ» в 2013 году, в настоящее время работает в должности начальника сектора № 5 отдела № 2 научно-исследовательского отделения № 8 Федерального автономного учреждения «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ»), Министерство промышленности и торговли Российской Федерации.

Диссертация выполнена в секторе № 5 отдела № 2 научно-исследовательского отделения № 8 Федерального автономного учреждения «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ»), Министерство промышленности и торговли Российской Федерации.

Научный консультант — член-корреспондент Российской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор Егоров Иван Владимирович, главный научный сотрудник сектора № 5 отдела № 2 научно-исследовательского отделения № 8 Федерального автономного учреждения «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ»), Министерство промышленности и торговли Российской Федерации.

Официальные оппоненты:

- Варакин Алексей Юрьевич, член-корреспондент Российской академии наук, профессор, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, заведующий лабораторией № 8 физического моделирования двухфазных течений;
- Козубская Татьяна Константиновна, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики

им. М.В. Келдыша Российской академии наук», отдел № 16, главный научный сотрудник;

— Смирнов Евгений Михайлович, профессор, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное образовательное автономное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», профессор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, в своем положительном отзыве, подписанном Гапоновым Сергеем Александровичем, доктором физико-математических наук, профессором, главным научным сотрудником лаборатории волновых процессов в сверхзвуковых течениях, а также Кудрявцевым Алексеем Николаевичем, доктором физико-математических наук, старшим научным сотрудником лаборатории вычислительной аэродинамики, указала, что диссертация Чувахова П.В. подготовлена на актуальную тему, имеет как теоретическую, так и прикладную значимость и является существенным шагом в исследованиях перехода к турбулентности в сверхзвуковых пограничных слоях. В отзыве ведущей организации подчеркнуто, что значимость полученных результатов для развития механики жидкости и газа заключается в разработке новых эффективных численных методов моделирования ламинарно-турбулентного 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.

Ведущая организация отметила, что полученные в диссертации результаты могут найти широкое применение в научных организациях, изучающих аэродинамику сверхзвукового полета, а кроме того, результаты диссертации обладают потенциалом практического применения при разработке перспективного сверхзвукового пассажирского самолета. В отзыве также указано, что научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации (в том числе, положения, вынесенные на защиту), являются новыми, хорошо обоснованными и в достаточной степени достоверными.

В качестве критических замечаний ведущая организация отметила следующее. Принимая во внимание, что решение уравнений Навье–Стокса с правильной физической вязкостью корректно описывает структуру ударной волны только при числе Маха не большем двух, то возникает вопрос, следует ли использовать для корректного описания взаимодействия возмущений с ударной волной уравнения Больцмана или же применение для этого уравнений Навье–Стокса все же дает удовлетворительный результат. Кроме этого, ведущая организация отметила, что механизм возбуждения мод пограничного слоя микрочастицей может отличаться от тех, что рассмотрены в главе 7, в связи с чем указала на не рассмотренный в диссертации фактор вибрации обтекаемой поверхности, которая может быть вызвана ударом микрочастицы. Также ведущая организация указала на нехватку в диссертации более широкого сравнительного анализа теоретических выводов с данными эксперимента, в связи с чем высказала пожелание соискателю привлечь внимание исследователей к экспериментальной проверке обнаруженного в диссертации явления спонтанного излучения звука (глава 4) и результатов по восприимчивости пограничных слоев к микрочастицам (глава 7). При этом в отзыве отмечено, что указанные

замечания не снижают общую высокую оценку научной значимости диссертационной работы.

Ведущая организация заключила, что диссертация Чувахова П.В. 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, а также отметила, что диссертация удовлетворяет необходимым требованиям, а Чувахов П.В. заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. — «Механика жидкости, газа и плазмы».

Соискатель имеет 64 опубликованных работы по теме диссертации, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 34 статьи, включая 25 статей в журнале, 2 статьи в книгах, а также 7 статей в трудах международных конференций. В этих работах решены научные задачи, связанные с возникновением и развитием турбулентности в сверхзвуковых пограничных слоях на различных поверхностях при их свободном или возмущенном обтекании, а также разработаны новые методы численного моделирования течений, в том числе течений в сверхзвуковых пограничных слоях. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах. Ряд работ опубликован в соавторстве. Информация о результатах, полученных соискателем совместно с соавторами, представлена в диссертации подробно и ясно. Из нее следует, что основные результаты диссертации соискатель получил самостоятельно. Наиболее значительными являются следующие работы:

- 1) Chuvakhov P.V., Fedorov A.V. Spontaneous radiation of sound by instability of a highly cooled hypersonic boundary layer // Journal of Fluid Mechanics. — 2016. — Vol. 805. — P. 188–206.

- 2) Chuvakhov P.V., Fedorov A.V., Obraz A.O. Numerical simulation of turbulent spots generated by unstable wave packets in a hypersonic boundary layer // *Computers & Fluids*. — 2018. — Vol. 162. — P. 26–38.
- 3) Chuvakhov P.V., Fedorov A.V., Obraz A.O. Numerical modelling of supersonic boundary-layer receptivity to solid particulates // *Journal of Fluid Mechanics*. — 2019. — Vol. 859. — P. 949–971.
- 4) Chuvakhov P.V., Egorov I.V., Ilyukhin I.M., Obraz A.O., Fedorov A.V. Boundary-Layer Instabilities in Supersonic Expansion Corner Flows // *AIAA Journal*. — 2021. — Vol. 59, no. 9. — P. 1–8.
- 5) Chuvakhov P.V. Shock-Capturing Anomaly in the Interaction of Unsteady Disturbances with a Stationary Shock // *AIAA Journal*. — 2021. — Vol. 59, no. 8. — P. 1–11.
- 6) Чувахов П.В., Егоров И.В. Численное моделирование эволюции возмущений в сверхзвуковом пограничном слое над углом разрежения // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. — 2021. — № 5. — С. 49–60.
- 7) Егоров И.В., Нгуен Н.К., Нгуен Т.Ш., Чувахов П.В. Моделирование ламинарно-турбулентного перехода с применением диссипативных численных схем // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. — 2021. — Т. 61, № 2. — С. 268–280.
- 8) Chuvakhov P.V., Fedorov A.V., Obraz A.O., Ilyukhin I.M. Disturbance evolution over an unswept wing in a Mach 3 flow // *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2351. — 2021. — Paper number: 030025.
- 9) Chuvakhov P.V., Fedorov A.V., Pogorelov I.O. Numerical simulation of boundary layer receptivity to solid particulates near a blunt leading edge // *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2351. — 2021. — Paper number: 030026
- 10) Чувахов П.В., Погорелов И.О. Источники турбулентности на прямом крыле сверхзвукового пассажирского самолёта // *Математическое моделирование*. — 2022. — Т. 34, № 8. — С. 19–37.

- 11) Egorov I.V., Fedorov A.V., Novikov A.V., Chuvakhov P.V. The Role of Receptivity in Prediction of High-Speed Laminar-Turbulent Transition // IUTAM Laminar-Turbulent Transition. Vol. 38 (9th IUTAM Symposium, London, UK, Sept. 2–6, 2019). — 2022. — P. 541–552. — (IUTAM bookseries).
- 12) Егоров И.В., Новиков А.В., Чувахов П.В. Численное моделирование развития турбулентных пятен в сверхзвуковом пограничном слое на пластине // Математическое моделирование. — 2022. — Т. 34, № 7. — С. 63–72.

На автореферат диссертации поступил положительный отзыв доктора технических наук профессора Липницкого Ю.М., Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО «ЦНИИмаш»). В отзыве перечислены решенные в диссертации задачи, описана новизна полученных результатов и отмечен высокий научно-технический уровень работы. В отзыве сказано, что полученные в диссертации результаты важны для определения механизмов зарождения турбулентности в номинально двухмерных сверхзвуковых пограничных слоях при малых уровнях внешних возмущений. Также отмечена значимость разработанных в диссертации моделей и методов для исследования процесса ламинарно-турбулентного перехода при обтекании тел с произвольной геометрией, что является важным элементом обработки аэротермодинамики авиационной и ракетно-космической техники. Отзыв не содержит критических замечаний.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высоким уровнем их научных работ по тематике, близкой к теме диссертации, а также международным признанием их заслуг и компетентности в области моделирования газодинамических процессов на основе численного решения полных уравнений Навье–Стокса и аппарата линейной теории устойчивости, которые являются

основными инструментами исследования, применяемыми в диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: установлено определяющее влияние акустического шума от турбулентного пограничного слоя на фюзеляже сверхзвукового самолета на турбулизацию обтекания аэродинамически гладких прямых крыльев; предложены и разработаны новые замкнутые физически обоснованные модели и методы численного моделирования различных источников внешних возмущений (атмосферная турбулентность, акустический шум от турбулентного пограничного слоя на фюзеляже самолета, микрочастицы), которые позволили выявить главный источник турбулентности на прямых крыльях сверхзвуковых самолетов; доказана возможность возникновения спонтанного излучения акустических волн сверхзвуковым пограничным слоем на сильно охлажденной поверхности; обнаружено, что амплитуда возмущений сверхзвукового пограничного слоя на гладком прямом крыле с выпуклым профилем, начиная с его некоторой пороговой толщины, достигает максимума в средней части профиля. Это обстоятельство позволяет говорить о том, что меры по ламинаризации обтекания таких крыльев следует предпринимать только до данной точки максимума, а не на всей поверхности крыла; исследован механизм развития сверхзвукового пограничного слоя в присутствии малых и интенсивных возмущений, связанный с резким разрежением газового потока над поверхностью с изломом; разработан численный метод введения развитых возмущений в расчетную область, который позволяет существенно сократить время численного моделирования развития волновых пакетов и турбулентных пятен в сверхзвуковых пограничных слоях, а также доказана перспективность его использования для нахождения амплитудного критерия ламинарно-турбулентного перехода в пограничных слоях.

Теоретическая и практическая значимость работы обоснована тем, что получены новые фундаментальные знания об эволюции возмущений и механизмах зарождения турбулентности в номинально двумерных сверхзвуковых пограничных слоях при малом уровне внешних возмущений, вносящие существенный вклад в расширение представлений о протекании процесса ламинарно-турбулентного перехода в сверхзвуковых пограничных слоях. Разработанные новые физико-математические модели и методы численного моделирования основных источников внешних возмущений, которые могут приводить к турбулизации обтекания поверхностей сверхзвуковых летательных аппаратов, позволили обнаружить существенную связь турбулизации обтекания прямых крыльев сверхзвуковых самолетов с акустическим шумом от турбулентного пограничного слоя на передней части фюзеляжа. Ряд полученных вспомогательных результатов оказывается важным для теоретического и численного анализа возмущенных течений вязкой сжимаемой жидкости. К таким результатам относятся: найденная асимптотика волнового пакета неустойчивой моды сверхзвукового пограничного слоя, разработанный на ее основе метод эффективного численного моделирования развития возмущений в сверхзвуковых пограничных слоях, а также результаты анализа численной неустойчивости схем сквозного счета, проявляющейся при моделировании взаимодействия слабых возмущений газового потока со стационарными ударными волнами.

Полученные результаты обеспечивают основу для разработки и верификации физически обоснованных целостных моделей ламинарно-турбулентного перехода вплоть до формирования развитого турбулентного течения. Разработанные модели и методы являются удобными инструментами для исследования процесса перехода при обтекании тел с произвольной геометрией. В диссертации сформулированы рекомендации для постановки контролируемых

экспериментов по ламинаризации обтекания прямых крыльев с тонким профилем и по восприимчивости сверхзвукового пограничного слоя к микрочастицам. Сделаны выводы об источниках турбулентности в малошумных условиях сверхзвукового полета и о стабилизации сверхзвуковых пограничных слоев в течениях разрежения газового потока. На основе этих выводов предложены системы затягивания ламинарно-турбулентного перехода на крыльях современных сверхзвуковых самолетов. Результаты работы могут быть применены для оптимизации поверхностей элементов сверхзвуковых летательных аппаратов, таких как профиль крыла или отклоняемые органы управления. Результаты моделирования возмущений от искусственного источника могут быть востребованы при подготовке и интерпретации результатов контролируемых экспериментов. Полученные данные численного моделирования создают обширную базу для валидации и верификации пакетов расчетных программ и результатов других научных исследований. Полученные в диссертации результаты могут найти широкое применение в научных организациях, изучающих аэродинамику сверхзвукового полета, к которым, в частности, относятся Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ), Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН (ИТПМ СО РАН), Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (ЦИАМ), Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, Научно-производственное объединение Энергомаш им. академика В.П. Глушко, Ракетно-космическая корпорация "Энергия" им. С.П. Королёва, Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета (НИИ Механики МГУ), Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ЦНИИМаш), Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН), Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет) (МФТИ), Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ).

Достоверность теоретических результатов обусловлена применением аналитического аппарата линейной теории устойчивости и аналитических методов асимптотического анализа интегралов. Разработанные модели атмосферных возмущений основаны на известных опубликованных общепринятых экспериментальных данных. Достоверность результатов численного моделирования обусловлена тщательной верификацией и валидацией используемых численных подходов, исследованием сеточной сходимости, хорошим качественным и количественным согласованием с данными других авторов и с предсказаниями линейной теории устойчивости. Результаты численного моделирования получены с помощью известного многократно апробированного численного метода интегрирования уравнений Навье—Стокса. Путем проведения методических исследований получены и использованы критерии применимости численного метода при моделировании нестационарных возмущенных сверхзвуковых течений с ударными волнами. Полученные в диссертации результаты физически непротиворечивы, качественно согласуются с имеющимися представлениями о природе перехода к турбулентности, а также прошли широкую апробацию.

Личный вклад соискателя указан в тексте диссертации и состоит в постановке задач, в разработке новых моделей, методов и их программной реализации, в выполнении прямого численного моделирования процесса ламинарно-турбулентного перехода в сверхзвуковых пограничных слоях для большей части задач диссертации, а также в анализе и интерпретации результатов диссертации. Вынесенные за защиту положения соответствуют результатам опубликованных работ, которые получены соискателем

самостоятельно. Апробация основных результатов диссертации и подготовка основных публикаций по теме диссертации проводились соискателем лично.

В ходе защиты были заданы вопросы, которые уточняли используемые обозначения и главные результаты диссертации. Кроме этого, были высказаны критические замечания, касающиеся размерности используемых расчетных сеток, учета взаимодействия внешних возмущений с головной ударной волной от кромки крыла, а также правомерности предположения о линейном характере развития возмущений при выводе асимптотики волнового пакета неустойчивой моды (глава 3). При этом было высказано замечание о том, что подтверждение построенного в главе 3 с помощью теоретических рассуждений вида граничных условий было выполнено путем сравнения с результатами расчетов, а не физических экспериментов. Были заданы уточняющие вопросы, касающиеся амплитуды волнового пакета, порождаемого граничным условием (глава 3), учета влияния головной ударной волны при получении результатов главы 3, а также вопросы об аналогии между асимптотикой волнового пакета (глава 3) и наиболее быстро растущим в пограничном слое возмущением. Также было высказано замечание, касающееся учета цилиндрической формы фюзеляжа при моделировании перехода к турбулентности на прямом крыле из-за акустического шума от турбулентного пограничного слоя на фюзеляже (глава 6).

Соискатель Чувахов П.В. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел по каждому из них собственную аргументацию, основываясь на материалах доклада и диссертации.

На заседании 30.03.2023 диссертационный совет принял решение за разработку теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области механики жидкости и газа, представляющее значительный вклад в понимание механизмов

ламинарно-турбулентного перехода сверхзвуковых пограничных слоев, а также в развитие теоретических и численных методов моделирования газодинамических течений, в том числе связанных с упомянутыми механизмами, присудить Чувахову Павлу Владимировичу ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человека, их них 7 докторов наук по специальности 1.1.9. — «Механика жидкости, газа и плазмы», участвовавших в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 21, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель

диссертационного совета 24.1.224.02

академик РАН, д.ф.-м.н.



Ю.Г. Евтушенко

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.224.02

к.ф.-м.н.

В.И. Никонов

«30» марта 2023