

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора —  
начальник центра аэрогидродинамики

С.В. Ляпунов

2022 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального автономного учреждения «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ЦАГИ) по диссертационной работе начальника сектора 5 отдела 2 НИО – 8, кандидата физико-математических наук Чувахова Павла Владимировича «Зарождение турбулентности в сверхзвуковых пограничных слоях», представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук.

Данное заключение составлено в соответствии с п. 16 Положения о присуждении ученых степеней, утверждённого постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (далее — Положение), и опирается на результаты обсуждения диссертационной работы П.В. Чувахова на научно-техническом совете ЦАГИ по аэродинамике и динамике полета, протокол от 13.09.2022 г. №6.

а) Диссертационная работа Чувахова **посвящена** расчетно-теоретическому исследованию механизмов зарождения турбулентности в малозумных условиях сверхзвукового полета, включая проникновение возмущений в пограничный слой (задача восприимчивости) и их развитие (задача устойчивости) вплоть до формирования турбулентных пятен.

б) Диссертационная работа **представлена впервые**. Работа выполнялась в рамках инициативных научно-исследовательских проектов ЦАГИ и МФТИ. Название диссертации соответствует содержанию.

в) **Актуальность** диссертационной работы обусловлена важностью проблемы ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) для развития сверхзвуковой авиации с практической точки зрения, а также тем, что проблема ЛТП далека от теоретического решения с фундаментальной точки зрения. Зарождение турбулентности одна из ключевых проблем фундаментальной аэрогидродинамики и прикладной аэродинамики летательных аппаратов нового поколения, таких как высокоэкономичные и экологически чистые транспортные системы с естественной или

искусственной ламинаризацией, сверхзвуковые самолеты с низким уровнем звукового удара. Турбулизация течения приводит к росту сопротивления трения и тепловых потоков к поверхности до порядка величины. Ламинаризация крыла сверхзвукового пассажирского самолета (СПС) влечет за собой ряд благоприятных последствий: снижение потребной мощности силовой установки и ее габаритов; уменьшение шума струи силовой установки на режиме взлета и посадки; снижение количества продуктов сгорания авиатоплива, выбрасываемых в атмосферу. Современные инженерные методы оценки положения ЛТП базируются на эмпирических зависимостях и имеют погрешность более 100%, что вынуждает, в частности, конструировать теплозащитные покрытия с большим запасом. В последнее время достигнуты значительные успехи в понимании главных аспектов ЛТП, но в случае сверхзвукового пограничного слоя информации существенно меньше, чем на дозвуковых скоростях. Любое продвижение в решении проблемы ЛТП представляется важным и актуальным.

г) **Основные результаты** диссертационной работы можно изложить в следующей редакции.

- 1) Разработано простое асимптотическое граничное условие, которое позволяет исключить протяженную линейную стадию развития возмущений из численного моделирования процесса ЛТП.
- 2) Расчетным путем продемонстрирован и исследован эффект спонтанного излучения акустических волн второй модой сверхзвукового пограничного слоя над достаточно сильно охлажденной поверхностью.
- 3) Обнаружено, что характеристики устойчивости сверхзвукового пограничного слоя над угловыми конфигурациями масштабируются вместе с толщиной пограничного слоя. При этом резкое разрежение потока приводит к подавлению нараставших выше по потоку малых возмущений и к задержке развития существенно нелинейных образований (турбулентных пятен).
- 4) Обнаружено предельное интегральное усиление возмущений, развивающихся в сверхзвуковом пограничном слое на прямом крыле с тонким параболическим профилем.
- 5) Показано, что наиболее вероятным источником ЛТП на прямом крыле СПС с аэродинамически гладкой поверхностью является акустический шум, излучаемый турбулентным пограничным слоем с передней части фюзеляжа.
- 6) Разработан вычислительный подход для моделирования восприимчивости сверхзвуковых пограничных слоев к твердым сферическим микрочастицам. С его помощью показано, что восприимчивость к микрочастицам сосредоточена внутри пограничного слоя в малой окрестности точки столкновения и не зависит от того, падает ли частица на поверхность или удаляется от нее.

*Главный результат* диссертационной работы состоит в получении новых сведений о механизмах ламинарно-турбулентного перехода в номинально двухмерных сверхзвуковых пограничных слоях в присутствии благоприятного градиента давления и без него, а также в рекомендациях по ламинаризации обтекаемых поверхностей, которые даны на основе этих сведений.

д) **Личный вклад соискателя** заключается в постановке всех научных и расчётных задач, рассмотренных в диссертации; разработке новых теоретических моделей, предложенных в диссертации; реализации предложенных моделей в виде модулей для авторского пакета прикладных программ; выполнении прямого численного моделирования процессов ламинарно-турбулентного перехода в сверхзвуковых пограничных слоях для большей части задач диссертации; анализе и интерпретации результатов моделирования, включая результаты линейной теории устойчивости. Изложенные в диссертации результаты получены автором лично, либо с его определяющим участием; вклад соавторов отмечен в тексте диссертации.

е) **Новыми** являются следующие результаты работы:

- подходы к исследованию особенностей метода сквозного счета при моделировании эволюции малых возмущений;
- асимптотическое граничное условие на базе линейной теории устойчивости;
- численное подтверждение явления спонтанного излучения акустических волн второй модой сверхзвукового пограничного слоя;
- особенности поведения возмущений над углом разрежения на линейном и нелинейном режимах;
- существование точки максимального интегрального усиления возмущений над прямым крылом с тонким параболическим профилем;
- акустический шум от турбулентного пограничного слоя на фюзеляже как наиболее вероятный источник ЛТП на аэродинамически гладком прямом крыле с тонким параболическим профилем;
- вычислительная модель влияния сферических микрочастиц на течение, применимая в сильно непараллельных градиентных течениях.

ж) **Степень достоверности** полученных результатов представляется высокой по следующим причинам. В работе используется известный многократно апробированный численный метод. Благодаря проведению методических исследований в диссертации получены критерии применимости численного метода при моделировании нестационарных возмущенных сверхзвуковых течений с ударными волнами. На протяжении всей диссертации проводится сопоставление расчетных и теоретических результатов. При возможности, полученные результаты также сопоставляются результатами других авторов.

Основные результаты работы физически непротиворечивы, качественно согласуются с имеющимися представлениями о природе перехода к турбулентности, а также прошли широкую апробацию.

Результаты работы докладывались и обсуждались на отраслевых, всероссийских и международных конференциях, в том числе:

1. Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019);
2. Международная конференция по методам аэрофизических исследований (ICMAR) (Новосибирск, Россия, 2018, 2020, 2022);
3. IUTAM Laminar-Turbulent Transition Symposium (Лондон, Великобритания, 2019);
4. AIAA Flow Control Conference (Вашингтон, США, 2016);
5. Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS) (Белу-Оризонти, Бразилия, 2018; Шанхай, Китай, 2020);

з) **Практическая значимость** работы заключается в том, что путем расчетно-теоретического анализа получены важные выводы о роли течений разрежения в ламинаризации сверхзвуковых пограничных слоев. На их основе предложены и могут быть впоследствии реализованы системы затягивания ЛТП на прямых крыльях СПС. Результаты работы могут быть применены при оптимизации поверхностей элементов сверхзвуковых летательных аппаратов, таких как профиль крыла или отклоняемые органы управления. Результаты численного моделирования возмущений от искусственного источника будут полезны при подготовке и интерпретации результатов экспериментов по устойчивости в контролируемых условиях в сверхзвуковых аэродинамических трубах. Наконец, полученные данные численного моделирования дают полную информацию о трехмерном нестационарном течении, из которой исследователи могут извлекать любые характеристики, необходимые для валидации и интерпретации экспериментальных результатов.

и) **Основные научные результаты** диссертации достаточно полно опубликованы в 64 научных работах, из них 34 опубликованы в изданиях из перечня ВАК РФ или в изданиях, индексируемых базами *Scopus* и/или *Web of Science*, в том числе 8 работ в журналах первого квартиля. Полный список работ приводится в тексте диссертации. Основные результаты диссертации **докладывались на научных конференциях** соискателем лично; полный список наиболее значимых конференций приведен в пункте ж). Выполнение требований Положения по опубликованию результатов диссертационного исследования подтверждается следующим списком из десяти публикаций Чувахова.

1. *Chuvakhov P.V., Fedorov A.V.* (2016) Spontaneous radiation of sound by instability of a highly cooled hypersonic boundary layer // JFM 805
2. *Chuvakhov P.V. et al.* (2018) Numerical simulation of turbulent spots generated by unstable wave packets in a hypersonic boundary layer // Computers & Fluids 162
3. *Chuvakhov P.V. et al.* (2019) Numerical modelling of supersonic boundary-layer receptivity to solid particulates // JFM 859
4. *Чувахов П.В., Егоров И.В.* (2021) Численное моделирование эволюции возмущений в сверхзвуковом пограничном слое над углом разрежения // Изв. РАН. МЖГ, № 5
5. *Егоров И.В., Нгуен Н.К., Нгуен Т.Ш., Чувахов П.В.* (2021) Моделирование ЛТП с применением диссипативных численных схем // ЖВМиМФ 61 (2)
6. *Chuvakhov P.V.* (2021) Shock-Capturing Anomaly in the Interaction of Unsteady Disturbances with a Stationary Shock // AIAA Journal 59 (8)
7. *Chuvakhov P.V. et al.* (2021) Boundary-Layer Instabilities in Supersonic Expansion Corner Flows // AIAA Journal 59 (9)
8. *Чувахов П.В., Погорелов И.О.* (2022) Источники турбулентности на прямом крыле сверхзвукового пассажирского самолёта // Мат. моделирование 34 (8)
9. *Егоров И.В., Новиков А.В., Чувахов П.В.* (2022) Численное моделирование развития турбулентных пятен в сверхзвуковом ПС на пластине // Мат. моделирование 34 (7)
10. *Egorov I.V., Fedorov A.V., Novikov A.V., Chuvakhov P.V.* (2022) The Role of Receptivity in Prediction of High-Speed Laminar-Turbulent Transition // IUTAM Laminar-Turbulent Transition 38 (IUTAM bookseries, 9th IUTAM Symposium, London, UK, Sept. 2–6, 2019)

к) **Ценность научных работ** соискателя заключается в их теоретической значимости. Получены новые фундаментальные знания о механизмах зарождения турбулентности в сверхзвуковых пограничных слоях при малозумных условиях. Разработаны удобные расчетные модели и подходы для исследования ЛТП в таких течениях. Полученные знания обеспечивают основу для разработки и верификации физически обоснованных целостных моделей ламинарно-турбулентного перехода вплоть до формирования развитого турбулентного течения.

л) Диссертация Чувахова является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как новое **научное достижение**.

м) Содержание диссертации Чувахова полностью соответствует паспорту специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы» (в устаревшей номенклатуре — формуле специальности 01.02.05), в частности, формуле

специальности (пп. 3, 4, 6, 11, 13, 14, 18). В работе применяется математическая модель уравнений Навье — Стокса, а также разрабатываются и применяются новые теоретические и численные модели (модель акустического шума из главы 6, модель микрочастицы из главы 7, др.). Дается интерпретация и проводится анализ полученных теоретических и расчётных результатов с целью прогнозирования явления ЛТП, обсуждаются возможные способы затягивания ЛТП.

н) **Общее заключение.** Диссертация П.В. Чувахова «Зарождение турбулентности в сверхзвуковых пограничных слоях» соответствует всем требованиям Положения, предъявляемым к докторским диссертациям, выполнена на высоком научном уровне и рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы» (ранее — специальность 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»).

Заключение принято на заседании научно-технического совета ЦАГИ по аэродинамике и динамике полета. Присутствовало на заседании: 26 чел. Результаты голосования: «за» — 26 чел.; «против» — 0 чел.; «воздержалось» — 0 чел.; протокол от 13.09.2022 г. №6.

И.о. начальника отделения №8 д.ф.-м.н.



М.В. Устинов

Ученый секретарь НТС д.т.н.



А.А. Павленко