

«УТВЕРЖДАЮ»

проректор по научной работе и программам  
развития федерального государственного  
автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Московский физико-

гут (национальный  
университет)»

Баган Виталий  
Анатольевич

2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Яцких Алексея Анатольевича

«Экспериментальное исследование возбуждения и эволюции  
волнового пакета в сверхзвуковых пограничных слоях»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 01.02.05 - механика  
жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа А.А. Яцких представляется весьма актуальной, так как задачи изучения механизмов генерации и развития возмущений в сверхзвуковых двух- и трехмерных пограничных слоях относятся к одной из нерешенных фундаментальных проблем современной аэромеханики, а их понимание позволит разработать методы расчета и управления ламинарно-турбулентным переходом на летательных аппаратах.

Диссертационная работа содержит 145 страниц, включая введение, четыре главы, заключение, список литературы и два приложения.

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

В главе 1 дано описание экспериментальной установки (аэродинамической трубы ИТПМ СО РАН Т-325), ее параметров, исследуемых моделей плоской пластины и скользящего крыла, конструкции используемых источников поверхностного разряда для генерации контролируемых возмущений, методик проведения экспериментов и измерений характеристик потока с помощью термоанемометра постоянного сопротивления, а также способов обработки полученных данных.

В главе 2 представлены результаты исследований по возбуждению искусственных локализованных возмущений в сверхзвуковом пограничном

слое с помощью импульсного поверхностного тлеющего разряда. Изучено влияние временных и энергетических параметров разряда на характеристики генерируемых в пограничном слое на плоской пластине локализованных возмущений при числах Маха набегающего потока  $M = 2, 3$  и  $4$ , оценены скорости распространения возмущений.

В главе 3 приведены результаты экспериментального изучения эволюции волнового пакета искусственных возмущений в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины при числе Маха 2. Проанализированы пространственная структура волновых пакетов в пограничном слое, сгенерированных импульсным разрядом с различной длительностью и энергией. Определено, что сценарий развития локализованных возмущений в сверхзвуковом пограничном слое, аналогичен дозвуковому случаю, когда на фронтах локализованного возмущения зарождается пакет неустойчивых волн. Обнаружено расплывание волнового пакета в продольном и трансверсальном направлениях. Проведены оценки скоростей распространения переднего и заднего фронтов волнового пакета. Для случая кратковременного импульсного разряда проведен спектральный анализ эволюции волнового пакета вниз по потоку. Показано, что развитие низкочастотной части волнового пакета согласуется с результатами, полученными в рамках линейной теории устойчивости, а высокочастотные наиболее быстро растущие волны имеют значительно большие поперечные волновые числа  $\beta$ , чем предсказывает линейная теория. При этом для высокочастотной части волнового пакета наблюдаются значительные неоднородности в фазовых распределениях, что указывает на нелинейный характер развития возмущения в пограничном слое.

В главе 4 описаны результаты экспериментальных исследований развития волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла при числе Маха 2. Анализ пространственной структуры волнового пакета в пограничном слое показал, что в начальном сечении возмущение от импульсного разряда представляется локализованным дефектом течения. Начальный пакет возмущений распространяется вдоль направления набегающего потока, а на его боковых фронтах формируются пульсации, растущие вниз по потоку. Из частотно-волнового анализа развития возмущений следует, что в измеряемом диапазоне частот фаза волнового пакета нарастает линейно вниз по потоку. Определены наиболее растущие вниз по потоку моды волнового пакета. Получено, что они характеризуются диапазонами частот  $f = 20 \div 26$  кГц и поперечных волновых чисел  $\beta' = 1,5 \div 2$  рад/мм. Оценены коэффициенты пространственного роста возмущений и проведено сравнение с теоретическими расчетами по линейной теории устойчивости. Показано, что волновой пакет в пограничном слое скользящего крыла в измеряемом диапазоне развивается в соответствии с линейной теорией.

В заключении сформулированы основные выводы работы.

В приложении 1 представлены оценки влияния случайного сигнала на распределение амплитуд по поперечным волновым числам, а в приложении 2 – список опубликованных работ автора по теме диссертации.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в следующем:

- 1) впервые при числе Маха 2 получены экспериментальные данные по пространственно-временному развитию локализованных возмущений в пограничных слоях плоской пластины и скользящего крыла с углом стреловидности  $40^\circ$ ;
- 2) экспериментально изучено влияние временных и энергетических характеристик импульсного тлеющего поверхностного разряда на возбуждаемые им локализованные возмущения в сверхзвуковом пограничном слое на пластине при числах Маха 2, 3 и 4;
- 3) определены скорости распространения локализованных возмущений в сверхзвуковом пограничном слое на пластине при числах Маха 2, 3 и 4;
- 4) определены нарастающие моды волнового пакета в пограничных слоях на плоской пластине и скользящем крыле при числе Маха 2.

**Практическая значимость.** Полученные комплексные экспериментальные результаты по пространственно-временному развитию локализованных волновых пакетов и оценки их волновых характеристик развивают и дополняют общепринятые представления о физических механизмах, приводящих к переходу ламинарного течения в сверхзвуковых двумерных и трехмерных пограничных слоях в турбулентное состояние. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для тестирования и усовершенствования расчетных методов предсказания перехода на элементах реальных летательных аппаратов.

**Достоверность** результатов диссертационной работы обеспечена тем, что работа выполнена на экспериментальной 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 широкое обсуждение 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 правильно отражает содержание диссертации.

В качестве замечаний по диссертации можно высказать следующее:

1) В работе указано, что развитие искусственных локализованных волновых пакетов моделирует естественный ламинарно-турбулентный переход. Однако сравнения спектров искусственных возмущений с естественными пульсациями пограничного слоя не приведено.

2) Физическая интерпретация экспериментальных данных по развитию волнового пакета в пограничном слое скользящего крыла недостаточно подробна. В частности, не указано, содержит ли возмущение первую моду или поперечную моду.

3) В работе имеются опечатки и орфографические ошибки.

В целом, представленная диссертация является законченной научной работой, а полученные результаты соответствуют поставленным целям и задачам и носят фундаментальный характер. Материалы диссертации могут быть использованы при разработках перспективных сверхзвуковых летательных аппаратов и исследованиях сверхзвуковых течений в ЦАГИ, ЦНИИМаш, ЦИАМ, НИИ механики МГУ, КБ и других организациях, связанных с этим научным направлением.

Диссертационная работа Яцких Алексея Анатольевича полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы.

Работа А.А. Яцких обсуждена на заседании кафедры теоретической и прикладной аэрогидромеханики ФАКТ МФТИ 14 января 2020 г., протокол № 3.

Директор ФАКТ МФТИ (НИУ)

к.т.н., профессор

С.С. Негодяев

Заведующий кафедрой, теоретической и прикладной аэрогидромеханики ФАКТ МФТИ (НИУ)

д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН

Гайфуллин А.М.

Профессор кафедры теоретической и прикладной аэрогидромеханики ФАКТ МФТИ (НИУ)

д.ф.-м.н., доцент

В.И. Шалаев

«17» 01 2020г.

Негодяев Сергей Серафимович

к.т.н., профессор

Должность: директор Физтех-школы аэрокосмических технологий (ФАКТ) МФТИ

Телефон: рабочий (495)408–53–44)

Адрес электронной почты: [dasr@mipt.ru](mailto:dasr@mipt.ru)

Гайфуллин Александр Марксович

д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН

Должность: заведующий кафедрой, теоретической и прикладной аэрогидромеханики ФАКТ МФТИ

Телефон: рабочий 8(495)556-38-28

Адрес электронной почты: [amgaif@mail.ru](mailto:amgaif@mail.ru)

Шалаев Владимир Иванович

д.ф.-м.н., доцент

Телефон: рабочий 8(495)556-49-80

Адрес электронной почты: [shalaev@falt.ru](mailto:shalaev@falt.ru)

Должность: профессор кафедр информатики и вычислительной математики МФТИ, теоретической и прикладной аэрогидромеханики ФАКТ МФТИ

Наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ)

Адрес организации: ул. Институтский переулок, д. 9, г. Долгопрудный, Московская область, 141700

Интернет страница МФТИ: <http://mipt.ru>,

Телефон: (495) 408–45–54

Адрес электронной почты: [info@mipt.ru](mailto:info@mipt.ru)

Сведения о ведущей организации  
по диссертации **Яцких Алексея Анатольевича**  
«Экспериментальное исследование возбуждения и эволюции волнового пакета в  
сверхзвуковых пограничных слоях»  
по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	МФТИ
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Место нахождения	г. Москва
Почтовый индекс, адрес организации	141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9
Веб-сайт	<a href="http://www.mipt.ru">http://www.mipt.ru</a>
Телефон	8 (495) 408-57-00
Адрес электронной почты	<a href="mailto:rector@mipt.ru">rector@mipt.ru</a>
Список публикаций сотрудников МФТИ по теме диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Александров С.В., Ваганов А.В., Шалаев В.И. Физические механизмы образования продольных вихрей, появления зон высоких тепловых потоков и раннего перехода в гиперзвуковом течении около треугольного крыла с затупленными передними кромками // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая Техника. 2016. № 45. С. 9-31.</li> <li>2. Шалаев В.И. Об особенностях уравнений трехмерного пограничного слоя и структуре течения в их окрестности // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая Техника. 2016. № 47. С. 7-35.</li> <li>3. V.I. Shalaev, A.V. Vaganov, D. V. Grachikov, V. M. Kashin, V. D. Nemykin, A. Yu. Noev, V. N. Radchenko, A. S. Skuratov. Laminar-turbulent transition in the vicinity of blunt leading edge of flat delta wing in hypersonic flow // AIP Conference Proceedings <b>1893</b>, 030070 (2017); pp. 030070-1 - 030070-6 <a href="https://doi.org/10.1063/1.5007528">https://doi.org/10.1063/1.5007528</a></li> <li>4. V.I. Shalaev. Control of laminar-turbulent transition and its influence on flow structure // AIP Conf. Proc. 2027, pp. 020002-1–020002-9; <a href="https://doi.org/10.1063/1.5065080">https://doi.org/10.1063/1.5065080</a></li> <li>5. V.I. Shalaev. 3D Boundary Layer Theory // Chapter of the book "Boundary Layer Flows - Theory, Applications and Numerical Methods." Ed. V. R. Prasad. London: IntechOpen, 2019, 23 p.</li> <li>6. Динь К.Х., Егоров И.В., Федоров А.В. Влияние</li> </ol>

- волн Маха на ламинарно-турбулентный переход при сверхзвуковом обтекании плоской пластины // Изв. РАН. МЖГ. 2018. № 5. С. 113-124.
7. Динь К.Х., Егоров И.В., Федоров А.В. Взаимодействие волн Маха и пограничного слоя при сверхзвуковом обтекании пластины с острой передней кромкой // Уч. зап. ЦАГИ. 2017. Т. 48. № 4. С. 10-19.
8. 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.
9. Chuvakhov P., Fedorov A. Spontaneous radiation of sound by instability of a highly cooled hypersonic boundary layer // Journal of Fluid Mechanics. 2016. Vol. 805. P. 188-206
10. 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.
11. Novikov A., Egorov I., Fedorov A. Direct Numerical Simulation of Wave Packets in Hypersonic Compression-Corner Flow // AIAA Journal. 2016. Vol. 54, No. 7. P. 2034-2050.
12. Fedorov A., Tumin A. Receptivity of high-speed boundary layers to kinetic fluctuations // AIAA Journal. 2017. Vol. 55, No. 7. P. 2335-2348.
13. Tritarelli R.C., Lele S.K., Fedorov A. Stabilization of a hypersonic boundary layer using a felt-metal porous coating // Journal of Fluid Mechanics. 2015. Vol. 769. P. 729-739.

«Верно»

Проректор по научной работе  
и программам развития, к.ф.-м.н.

Баган Виталий Анатольевич