

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Лукашевича Сергея Валерьевича «Экспериментальное исследование влияния пористых покрытий на устойчивость и переход гиперзвуковых пограничных слоев», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

В диссертации Лукашевича С.В. экспериментально исследуется влияние пористых покрытий на развитие возмущений и положение ламинарно-турбулентного перехода в гиперзвуковом пограничном слое. Увеличение ламинарного участка пограничного слоя является актуальной задачей для целей снижения аэродинамических потерь и тепловых потоков при движении гиперзвукового летательного аппарата и создания надежных методов их проектирования. Использование ультразвук - поглощающих пористых покрытий (УПП) в условиях гиперзвукового обтекания позволяет затянуть ламинарно-турбулентный переход за счет стабилизации роста возмущений акустической моды.

**Научная новизна работы** заключается в получении экспериментальных данных по затягиванию ламинарно-турбулентного перехода гиперзвукового пограничного слоя при помощи пористого покрытия на модели затупленного конуса. Получены экспериментальные данные по влиянию степени пористости и толщины покрытия на эффективность стабилизации возмущений второй моды в гиперзвуковом пограничном слое на остром конусе. Экспериментально определено влияние положения и протяженности пористого покрытия на рост возмущений в пограничном слое. К наиболее важным и интересным результатам можно отнести данные экспериментов и их физическая интерпретация о двойном механизме влияния пористого покрытия, как на стабилизацию, так и

дестабилизацию возмущения акустической моды в зависимости от его расположения и протяженности. Эти данные обладают существенным элементом новизны.

**Научная и практическая ценность работы** состоит в экспериментальном определении параметров пористого покрытия, которые позволяют получить максимальное увеличение ламинарного участка пограничного слоя на поверхности модели обтекаемой гиперзвуковым потоком. Показано, что пористые покрытия подходят для стабилизации гиперзвукового пограничного слоя на моделях с затуплением. Результаты исследования могут быть использованы при разработке современных инженерных методов расчета и при проектировании гиперзвуковых летательных аппаратов с целью уменьшения тепловых нагрузок и сопротивления.

Диссертационная работа содержит 106 страниц, включая введение, пять глав, заключение и списка литературы из 80 источников.

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, их актуальность, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В главе 1** приводится обзор работ по исследованию ламинарно-турбулентного перехода гиперзвукового пограничного слоя, проводится анализ существующих способов управления. Автор акцентирует свое внимание на работах по использованию пористых покрытий для задержки положения перехода гиперзвукового пограничного слоя. Описываются результаты теоретических и экспериментальных исследований подтверждающих возможность увеличения ламинарного участка при помощи УПП. Отмечается отсутствие экспериментальных работ по исследованию влияния толщины, степени пористости, протяженности и положения УПП на развитие возмущений в гиперзвуковом пограничном слое. Автор подчеркивает, что все предыдущие работы выполнены на моделях острых конусов без анализа влияния скругления переднего носика.

**Глава 2** содержит описание экспериментального оборудования, включая описание двух аэродинамических труб, в которых проводились эксперименты и трех типов экспериментальных моделей. Приводится описание средств измерения и методики обработки результатов, даны оценки погрешностей измерения.

**Глава 3** посвящена экспериментальному исследованию возможности затягивания ламинарно-турбулентного перехода гиперзвукового пограничного слоя на модели конуса с различными затуплениями носовой части. Полученные результаты показывают, что использование УПП позволяет увеличить ламинарный участок гиперзвукового пограничного слоя на затупленном конусе от 30 до 85%.

**В главе 4** приводятся результаты экспериментов по определению влияния толщины и степени пористости УПП на замедление роста возмущений второй моды. Впервые экспериментально установлена предельная толщина покрытия, при котором рост возмущений второй моды оказывается минимальным. Дальнейшее превышение данного предельного значения толщины не приводит к увеличению эффективности УПП. Так же показано, что максимальный эффект замедления роста возмущений второй моды при использовании покрытий с различной степенью пористости  $S = 44\%$  и  $S = 64\%$  практически одинаков.

**В главе 5** описаны результаты экспериментальных исследований влияния протяженности и положения пористого покрытия на рост возмущений второй моды в гиперзвуковом пограничном слое на модели острого конуса под нулевым углом атаки. Обнаружено, что в зависимости от протяженности и положения пористое покрытие может оказывать как стабилизирующий, так и дестабилизирующий эффект. Так показано, что расположение УПП в области устойчивости возмущений второй моды для сплошной поверхности приводит к преждевременному росту этих возмущений.

В заключении формулируются основные выводы по результатам работы.

Работа выполнена на высоком научном уровне и с использованием, без преувеличения, уникальных установок и диагностических методик. В частности, для идентификации границ ламинарно-турбулентного перехода автор применяет три метода измерений-пульсаций давления и теплового потока в весьма широком диапазоне измерения частот, а также распределения числа Стентона по длине модели. Все это представляет собой сложную в методическом плане проблему. И как об этом свидетельствуют результаты, автор с ней успешно справился.

Нет сомнений и в том, что представленный в диссертации комплекс данных, соответствует высокому мировому уровню. Важный момент, который хотелось особо подчеркнуть, что параллельно с экспериментами проводились численные исследования ЛТП при идентичных условиях и показана хорошая корреляция между теорией и экспериментом. Это является дополнительным, совместно с анализом неопределенностей измерений, свидетельством достоверности полученных данных.

Работа не лишена недостатков. По диссертации можно сделать следующие замечания:

1. При определении критического числа ламинарно-турбулентного перехода автору следовало бы сделать оценки его интегрального значения, построенного по толщине энергии. Этим самым можно было убедиться в универсальности (или, напротив, в не универсальности) его использовании для условий гиперзвукового течения. Хорошо известно, что такой параметр можно с успехом применять для широкого класса задач до и – сверхзвуковых течений.

2. При описании данных по распределению коэффициента теплоотдачи по поверхности конуса не очень четко сформулированы тепловые граничные условия. Непонятно, что означает модифицированное число Стентона (3.1) и зачем для его определения привлекать аналогию Рейнольдса (3.2)? Что

означают на рис. 3.1.11 – 3.1.14 несколько параллельных линий закона теплообмена для турбулентного режима течения?

3. В работе отсутствуют оценки постоянной времени калориметрического сенсора теплового потока, что является важным в условиях импульсного режима работы аэродинамических труб.

4. Весьма скудно описаны характеристики высокочастотных датчиков давления и тепловых потоков. Отсутствуют результаты тестовых испытаний, что особенно важно в проблеме идентификации вихревой и акустической мод возмущений.

5. Открытым остался вопрос о влиянии проницаемости пористых элементов на характер развития возмущений. Использование двух достаточно близких их значений (44% и 64%) дало практически одни и те же результаты. Возникает вопрос, сохранится ли эта закономерность и для иных, более широких диапазонов изменения параметра  $S$ ? Отсюда вытекает более общая проблема, что является здесь определяющим фактором – проницаемость или структура слоя? Очевидно, что это вопрос на перспективу развития работ в данном направлении.

Указанные замечания не могут повлиять на общую высокую оценку выполненной Лукашевичем С.В. работы. Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, результаты ее докладывались на многочисленных конференциях и семинарах. Работа была полностью заслушана на расширенном семинаре Отдела термогазодинамики Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН и получила положительную оценку участников семинара (Протокол № 2-2018 от 13.03.2018 г).

Результаты в полной мере опубликованы в рецензируемых российских и зарубежных ведущих научных изданиях из перечня ВАК. Автореферат в полной мере отражает содержание и основные результаты диссертационной работы.

Таким образом, диссертация Лукашевича С.В. является законченной научно-квалификационной работой, удовлетворяющей требованиям п.9

«Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям на соискание степени кандидата наук. Материалы диссертационной работы соответствуют выбранной специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы. Автор настоящей диссертации Лукашевич С.В. заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по данной специальности.

Официальный оппонент,

Терехов Виктор Иванович  
д.т.н., профессор,

Специальность: 01.04.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.  
Зав. отделом термогазодинамики  
ФНГУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
Заслуженный деятель науки РФ.  
630090, Новосибирск. Пр. Ак. Лаврентьева, 1,  
Тел. 8383306736  
E-mail: [terekhov@itp.nsc.ru](mailto:terekhov@itp.nsc.ru)

Я, Терехов Виктор Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Лукашевича Сергея Валерьевича и их дальнейшую обработку.

Подпись Терехова Виктора Ивановича, заверяю  
Должность, звание Ф.И.О. (подпись дата) М.П.

Председателю  
диссертационного совета  
Д 003035.02  
академику В.М. Фомину

## ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Я, Терехов Виктор Иванович, даю свое согласие выступить в качестве официального оппонента по диссертации Лукашевича Сергея Валерьевича на тему: «Экспериментальное исследование влияния пористых покрытий на устойчивость и переход гиперзвуковых пограничных слоев» на соискание ученой степени *кандидата физико-математических наук* по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

О себе сообщаю:

Ученая степень: д.т.н.

По специальности 01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Ученое звание: профессор

Служебный тел: 8(383) 330-67-36, E-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Должность, подразделение организации: Заведующий отдела термогазодинамики

Полное наименование организации, являющейся основным местом работы: ФАНО России, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес служебный: Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1., director@itp.nsc.ru, <http://www.itp.nsc.ru/>.

По теме рассматриваемой диссертации имею 57 научных работ, в том числе в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. М. А. Пахомов, В. И. Терехов Влияние размера воздушных пузырьков на интенсификацию теплопереноса в импактной жидкостной струе// ТВТ, 2016, том 54, выпуск 1, страницы 147–149.
2. V.I. Terekhov ·T.V. Bogatko Effect of dynamic and thermal prehistory on aerodynamic characteristics and heat transfer behind a sudden expansion in a round tube// Heat Mass Transfer, 2016, DOI: 10.1007/s00231-016-1857-7.
3. Бочкарева Е. М., Немцев В. А., Сорокин В. В., Терехов В. В., Терехов В. И. Снижение давления пара при конденсации на холодных каплях жидкости// ИФЖ, 2016. Том 89, № 3, с. 542-547.
4. Терехов В.В., Терехов В.И. Влияние поперечного потока на структуру отрывного турбулентного течения и теплообмен за обратным уступом // ПМТФ. 2017. Т. 58, №2. С. 78– 89.
5. А.Ю. Дьяченко, В.Л.Жданов, Я.И. Смутьский, В.И. Терехов Управление отрывным потоком за уступом с помощью разрезных ребер//ИФЖ.-2017.-т. 90, №3. с. 575-583.
6. Пахомов М.А., Терехов В.И. Распространение твердых частиц в газодисперсном ограниченном закрученном потоке. Эйлерово и полное лагранжево описания // Теплофизика и аэромеханика. - 2017. - Т. 24. - № 3. - С. 335–348.
7. V.I. Terekhov, A.L. Ekaid, and K.F. Yassin Heat transfer at a laminar free convection and separated flow past a rib in a vertical channel with isothermal walls// Thermophysics and Aeromechanics, 2017, Vol. 24, No. 4, p. 577-581.

8. A.V. Chinak, A.E. Gorelikova, O.N. Kashinsky, M.A. Pakhomov, V.V. Randin, V.I. Terekhov  
Hydrodynamics and heat transfer in an inclined bubbly flow // Int. J. of Heat and Mass Transfer 118  
(2018) 785–801 и др.

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

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

20.02.2018

В.И. Терехов

Подпись В.И. Терехова удостоверяю