

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Трубицыной Лукерьи Петровны
на тему: «Механизм формирования и газодинамические параметры
высоконапорного слоя в области присоединения сверхзвукового отрывного
течения»
по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы**

Сверхзвуковые пространственные отрывные течения вязкого газа представляют собой фундаментальную проблему прикладного характера как в связи с приложениями, так и в научных аспектах гидро- и аэротермодинамики. Экспериментальные и численные исследования таких течений необходимы для установления закономерностей обтекания сверхзвуковыми потоками газов поверхностей сложной геометрии, знание которых необходимо при разработке и проектировании планеров летательных аппаратов.

Тема диссертации Л.П. Трубицыной актуальна, потому что направлена на получение новых экспериментальных и расчетных данных фундаментального характера о сложных газодинамических структурах при сверхзвуковых течениях вязкого газа в углах сжатия, в конфигурациях, моделирующих обтекание внешних элементов поверхности ЛА или внутренних поверхностей воздухозаборников. Это важный класс течений, где имеют место пространственная интерференция скачков уплотнения, отрыв и присоединение потоков к поверхности. Важным структурным элементом такого течения является тонкий высоконапорный слой за линией присоединения сверхзвукового отрывного течения, который характеризуется высоким значением полного давления. Данная диссертация направлена на экспериментальное и численное исследование механизма формирования и изучение условий существования этих малоизученных газодинамических объектов с применением методов шпирен-визуализации и прецизионных измерений полного давления в тонких слоях у поверхности моделей. Информация о структуре и параметрах высоконапорного слоя, механизме его возникновения, а также о его влиянии на характеристики пристенного течения важна как с фундаментальной, так и с практической точки зрения. Одним из важных аспектов в научном и прикладном плане является взаимодействие вихрей гёртлеровского типа вблизи поверхности угла сжатия с находящимся над ними высоконапорным слоем газа.

В диссертации Л.П. Трубицыной решены следующие новые задачи.

1. Проведено экспериментальное и численное исследование высоконапорного слоя в сверхзвуковом отрывном течении для различных конфигураций угла сжатия:

- в пространственном угле сжатия (трёхмерное течение);
- в угле сжатия с установленными боковыми стенками (квазидвумерное течение);
- в осесимметричном угле сжатия (двумерное течение).

2. Уточнена формулировка механизма образования высоконапорного слоя на основе анализа полученных данных.

3. Проведено экспериментальное и численное исследование течения в пространственном угле сжатия в диапазоне чисел Маха $M_\infty = 3 - 8$ и чисел Рейнольдса $Re_L = 0.6 \cdot 10^6 - 2.7 \cdot 10^6$.

Для решения этих задач потребовалось существенное повышение точности и информативности газодинамического эксперимента на гиперзвуковой и сверхзвуковой аэродинамических трубах Т-326 и Т-333 ИТПМ СО РАН. В экспериментах использован внушительный набор моделей: четыре угла сжатия с углом наклонного уступа от 20° до 50° , угол сжатия с углом наклонного уступа 30° , оснащенный боковыми стенками, и коническое тело (угол раствора конуса 30°) с острыми и тупыми иглами.

Принципиальным научным достижением автора является рациональное сочетание классических экспериментальных методов визуализации сверхзвуковых течений с ударно-волновыми структурами около тел сложной формы, измерений профилей полного давления в тонких пристенных областях и численного моделирования трехмерного стационарного обтекания моделей сложной геометрии в рамках уравнений Навье-Стокса и Рейнольдса, соответственно для ламинарных и турбулентных режимов течений вязкого газа. Именно такой комбинированный подход позволил выявить тонкую сильно неоднородную структуру пристенного течения с высоконапорным слоем вблизи поверхностей углов сжатия и конических тел с иглой.

В части эксперимента многоплановая работа автора включает постановку эксперимента, калибровку измерительных приборов, измерения полного давления зондами Пито с высоким пространственным разрешением, шлирен-визуализацию отрывных сверхзвуковых течений в углах сжатия различной конфигурации, метод маслосажевой визуализации картин течения на поверхностях моделей, автоматизированный сбор и обработку экспериментальных данных и анализ результатов. Получены высоко информативные шлирен-фотографии сверхзвуковых отрывных течений в углах сжатия при наклонах уступа $20^\circ - 50^\circ$, на коническом теле с острой и тупой иглой. Картины отрывного течения на поверхностях углов сжатия 30° с боковыми стенками и без них, в том числе положения линий отрыва и присоединения, размеры и период

продольных вихревых структур в зоне присоединения получены методом маслосажевой визуализации. Прецизионные измерения распределений давления Пито в тонких слоях вблизи поверхности моделей произведены при перемещении измерительного зонда с помощью уникального трехосевого координатного устройства с погрешностью позиционирования ± 0.02 мм и диапазоном перемещений $200 \times 200 \times 200$ мм. Для лучшего разрешения структуры пристенного течения и пограничного слоя шаг измерения вблизи поверхности модели уменьшался до 20 мкм.

Для условий экспериментов с пространственными углами сжатия выполнены численные расчеты трехмерных стационарных сверхзвуковых течений вязкого теплопроводного совершенного газа. Для решения трехмерных уравнений Навье-Стокса и уравнений Рейнольдса соответственно для ламинарных и турбулентных отрывных течений использовался программный пакет ANSYS Fluent. Моделирование ламинарного отрывного обтекания модели выполнено для чисел $M = 6-8$, а турбулентного отрывного течения при числах $M = 3-5$ с использованием дифференциальной двухпараметрической модели $k-\omega$ SST. Для угла сжатия 20° и $M = 6$ приведена расчетная картина течения, которая включает высоконапорный слой и сложную систему взаимодействующих пристенных вихрей. Показана эволюция продольных вихрей вниз по потоку, в результате которой под влиянием вихрей высоконапорный слой "размывается" и превращается в серию локальных областей с повышенным средним давлением.

В целом такая систематическая экспериментальная проработка всех аспектов формирования тонкой структуры высоконапорных струй в зоне присоединения для одиннадцати моделей сложной геометрии с применением численного моделирования течений в ламинарных и турбулентных режимах пространственного обтекания проделана впервые, что и определяет принципиальную новизну рассматриваемой диссертации.

В результате обработки больших массивов экспериментальных и численных данных, включая двумерные шпирен-фотографии и расчетные картины отрывных течений в плоскости симметрии, профили полного давления, измеренные в поперечных сечениях около наклонных поверхностей, подтверждено существование высоконапорного слоя вблизи стенок моделей угла сжатия с наклонными уступами.

Установлено, что высоконапорный слой формируется при числе Маха набегающего потока $M > 5$, как при ламинарном, так и турбулентном режимах течения. Для $M = 6$ показано, что в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 0.6 \cdot 10^6 - 2.7 \cdot 10^6$ структура отрывного течения и характеристики высоконапорного слоя меняются слабо.

В работе впервые обнаружены высоконапорные слои в течениях вокруг конического тела с иглами и в угле сжатия с боковыми стенками. Установлено, что фактором,

препятствующим развитию высоконапорного слоя, являются интенсивные вихри в зоне присоединения потока. Уточнен механизм образования высоконапорного слоя в результате сжатия в изэнтропическом веере волн, в то время как потери полного давления в пограничном слое и за скачком присоединения значительны. Экспериментально показано, что на конусе с тупой иглой за линией присоединения сверхзвукового потока высоконапорный слой отсутствует из-за отошедшего прямого головного скачка уплотнения перед тупым носиком модели, в котором существенно падает полное давление.

На основе сравнительного анализа мгновенных и усредненных по времени шлирен-изображений получены новые экспериментальные данные о детальной структуре пристеночных течений в углах сжатия, включая головной скачок уплотнения, скачок отрыва, веер волн сжатия, скачок присоединения, сдвиговый слой, зону возвратного течения, область присоединения, пограничный слой и высоконапорный слой. В диссертации получены важные результаты о характере присоединения сверхзвукового отрывного течения и в теоретическом плане. Последовательно выполнен расчет статического давления в набегающем потоке и полного давления за прямым скачком уплотнения, затем параметров за скачком присоединения и наконец определены число Маха и давление Пито в высоконапорном слое. Хорошее согласие экспериментальных и расчетных значений давления Пито для угла сжатия 30° убедительно подтверждает предложенный механизм образования высоконапорного слоя за линией присоединения сверхзвукового отрывного течения в угле сжатия. Выявлено, что механизм образования высоконапорного слоя в пространственном угле сжатия и при обтекании конического тела с иглой имеет общий характер. В целом, получены приоритетные научные результаты, как фундаментального так и прикладного характера. В результате двух независимых подходов получены согласованные данные о масштабах и геометрии высоконапорных слоев в углах сжатия в двумерной, квазидвумерной и пространственной конфигурациях.

Научные положения диссертации, предъявленные к защите, обоснованы высоким уровнем исследования, как в экспериментальном, так и теоретическом плане. Экспериментальные данные получены с использованием современной оптической аппаратуры для шлирен-визуализации пространственных сверхзвуковых течений газов и уникального зонда Пито с прямоугольной приемной частью малого размера 0.2×1.1 мм.

Проведено методическое зондирование потока над поверхностью горизонтально установленной пластины, клина под углами атаки 10 , 20 и 30° и угла сжатия с углом наклонной поверхности 30° . Для решения принципиального вопроса о влиянии зонда на измеряемое им полное давление в пристеночной области в рамках уравнений Навье-Стокса с использованием программного пакета ANSYS Fluent проведены расчеты пространственного течения над

горизонтальной пластиной в двух случаях: с установленным над ней зондом Пито на расстоянии 0.5 мм и без зонда. В результате установлено, что зонд полного давления влияет на результаты измерений в сверхзвуковых тонких пограничных слоях из-за зоны отрыва потока, индуцированной скачком уплотнения перед приемным торцом тонкого зонда. В тоже время, при измерении полного давления в высоконапорном слое, формирующимся в зоне присоединения сверхзвукового ламинарного отрывного течения, ошибка измерения, вносимая зондом в пограничный слой, мала.

Выводы диссертации опираются на тщательный анализ результатов экспериментов и численного моделирования, выполненных автором на высоком научном уровне. Автор внес существенный научный вклад в части экспериментальной газовой динамики и вычислительной аэротермодинамики сверхзвуковых отрывных течений вязкого газа. Диссертация содержит обширный верифицированный экспериментальный и расчетный материал, который весьма важен и полезен для решения современных задач аэротермодинамики. Научные и технические подходы, предложенные автором, позволяют повысить точность и информативность измерений в газодинамическом эксперименте. Полученный ценный экспериментальный материал и результаты численного моделирования безусловно будут стимулировать дальнейшее развитие экспериментальных и численных исследований сверхзвуковых отрывных течений.

По содержанию диссертации имеется ряд замечаний и вопросов.

- 1) Нет выводов о толщине и протяженности высоконапорных слоев, которые обобщили бы полученный автором большой объем экспериментальных данных с использованием уникального набора экспериментальных моделей различной геометрии.
- 2) Мало внимания уделено взаимодействию высоконапорного слоя с гёртлеровскими вихрями, в заключении вообще не сформулированы результаты, касающиеся этого интересного вопроса.
- 3) Нет анализа разброса и воспроизводимости результатов измерений полного давления в тонких высоконапорных слоях, хотя для этого имеется достаточно большой объем экспериментальных данных.
- 4) Не обсуждается возможность практического использования представленных результатов для аэродинамики поверхностей, в состав которых входят углы сжатия. В связи с этим остается вопрос: может ли высоконапорный слой создавать дополнительную силовую или тепловую нагрузку на аэродинамическую поверхность?

Вместе с тем, указанные замечания и вопросы не умаляют научной и практической значимости диссертационной работы Л.П. Трубицыной, которая вносит существенный вклад в решение современных задач аэротермодинамики сверхзвуковых отрывных течений вязких газов. Данное экспериментально-теоретическое исследование, выполненное на высоком

научном уровне, является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Научные результаты, предъявляемые Л.П. Трубицыной к защите, достаточно полно опубликованы в научной литературе, автореферат правильно отражает содержание диссертации.

На основании изложенного считаю, что диссертация «Механизм формирования и газодинамические параметры высоконапорного слоя в области присоединения сверхзвукового отрывного течения» отвечает критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Трубицына Лукерья Петровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9- «Механика жидкости, газа и плазмы».

Я, Колесников Анатолий Фёдорович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой Диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент Колесников Анатолий Фёдорович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией взаимодействия плазмы и излучения с материалами Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН).

Адрес: 119526, г. Москва, пр-кт Вернадского, 101, кор. 1,

тел.: +7-495-434-00-17,

e-mail: koles@immnet.ru

_____ Колесников Анатолий Фёдорович

Подпись г.н.с., д.ф.-м.н. Колесникова Анатолия Фёдоровича заверяю

Ученый секретарь ИПМех РАН

к.ф.-м.н. М.А. Котов

Председателю
диссертационного совета
Д 003035.02
академику В.М. Фомину

ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Я, Колесников Анатолий Фёдорович, даю свое согласие выступить в качестве официального оппонента по диссертации Трубицыной Лукерьи Петровны на тему: Механизм формирования и газодинамические параметры высоконапорного слоя в области присоединения сверхзвукового отрывного течения 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	Специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы
Ученое звание	-
Академическое звание	-
Тел:	8 (916) 869 43 23
E-mail:	koles@ipmnet.ru
Должность	Главный научный сотрудник, зав. лабораторией
Подразделение организации	Лаборатория взаимодействия плазмы и излучения с материалами
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской Академии Наук
Ведомственная принадлежность орг.	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Адрес служебный: Почтовый индекс, город, улица, дом	119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1, ИПМех РАН
Web-сайт организации.	https://ipmnet.ru
Телефон организации.	+7-495-434-00-17
E-mail организации.	ipm@ipmnet.ru

По теме рассматриваемой диссертации имею 107 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	Васильевский С.А., Гордеев А.Н., Колесников А.Ф.	Локальное моделирование аэродинамического нагрева поверхности затупленного тела в дозвуковых высокоэнтальпийных потоках воздуха: теория и эксперимент на ВЧ-плазмотроне	Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2017. № 1. С. 160–167	Статья, 2017
2	Гордеев А.Н., Колесников А.Ф., Сахаров В.И.	Эксперимент на ВЧ-плазмотроне и численное моделирование теплообмена в недорасширенных струях диссоциированного азота	Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2017. № 6. С. 79–88	Статья, 2017
3	Гордеев А.Н., Колесников А.Ф., Сахаров В.И.	Экспериментальное и численное исследование теплообмена высокоэнтальпийных недорасширенных струй воздуха с цилиндрическими моделями	Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2018. № 5. С. 125–133	Статья, 2018
4	Колесников А.Ф., Гордеев А.Н., Васильевский С.А.	Теплообмен в дозвуковых струях диссоциированного азота: эксперимент на ВЧ-плазмотроне и численное моделирование	Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56, № 3. С. 417–423	Статья, 2018
5	Васильевский С.А., Гордеев А.Н., Колесников А.Ф., Сахаров В.И., Чаплыгин А.В.	Экспериментальное и численное исследование теплового эффекта катализа на поверхностях металлов и кварца в недорасширенных струях диссоциированного воздуха	Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2018. Т. 19, № 4. С. 1–11	Статья в электронном журнале, 2018
6	Васильевский С.А., Гордеев А.Н., Колесников А.Ф.	Теплообмен и теплофизика дозвуковых струй диссоциированного воздуха, обтекающих цилиндрические модели в индукционном ВЧ-плазмотроне	Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2019, № 3. С. 98–112	Статья, 2019
7	Колесников А.Ф., Гордеев А.Н., Васильевский С.А., Тептеева Е.С.	Влияние геометрии разрядного канала ВЧ-плазмотрона на теплообмен в высокоэнтальпийных дозвуковых струях воздуха	Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57, № 4. С. 509–517	Статья, 2019
8	Васильевский С.А., Гордеев А.Н., Колесников А.Ф., Чаплыгин А.В.	Тепловой эффект поверхностного катализа в дозвуковых струях диссоциированного воздуха: эксперимент на ВЧ-	Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2020. № 5. С. 137–150	Статья, 2020

		плазмотроне и численное моделирование		
9	Васильевский С.А., Колесников А.Ф., Сахаров В.И.	Исследование точности моделирования конвективного теплообмена в дозвуковых струях диссоциированного воздуха в ВЧ-плазмотроне	Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2020. Т. 21, № 2. С. 1–13	Статья в электронном журнале, 2020
10	Колесников А.Ф., Щелоков С.Л.	Анализ условий моделирования аэродинамического нагрева в дозвуковых струях высокоэнтальпийного воздуха ВЧ-плазмотрона ВГУ-4	Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2021. № 2. С. 91–96	Статья, 2021
11	Колесников А.Ф., Лукомский И.В., Сахаров В.И., Чаплыгин А.В.	Экспериментальное и численное моделирование теплообмена поверхности графита в недорасширенных струях диссоциированного азота	Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2021. № 6. С. 136–144	Статья, 2021
12	Галкин С.С., Колесников А.Ф., Сахаров В.И., Чаплыгин А.В.	Исследование влияния формы модели на конвективные тепловые потоки к холодной каталитической поверхности в сверхзвуковых струях диссоциированного воздуха в ВЧ-плазмотроне	Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2021. Т. 22, № 3. С. 1–10	Статья в электронном журнале, 2021
13	Брызгалов А.И., Якуш С.Е., Васильевский С.А., Колесников А.Ф.	Численное моделирование неравновесных дозвуковых течений диссоциированного воздуха около цилиндрического тела	Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2021. Т. 22, № 5. С. 1–14	Статья в электронном журнале, 2021

Не являюсь членом экспертного совета ВАК.

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

21 июня 2022 г.

А.Ф. Колесников

Подпись А.Ф. Колесни
ученый секретарь ИПМ
к.ф.-м.н.

М.А. Котов