

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора –

начальник центра динамики

У «ЦАГИ»

З. Ляпунов

« / »

2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о научно-практической ценности диссертации

Трубицыной Лукерьи Петровны

на тему

«Механизм формирования и газодинамические параметры высоконапорного слоя в области присоединения сверхзвукового отрывного течения»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы

1. Актуальность избранной темы

При разработке высокоскоростного сверхзвукового летательного аппарата одной из актуальных задач является теплоизоляция элементов его конструкции. Ударно-волновые взаимодействия в потоке, такие как интерференция скачков уплотнения или отрыв и присоединение пограничного слоя, могут генерировать локальные зоны нагрева, которые создают пики тепловых потоков. В данной работе исследуются параметры «высоконапорного слоя», который может оказаться «критическим» для локального «прожигания» обшивки летательного аппарата вследствие возможного проникновения в пристенную область течения под влиянием продольных вихрей Гёртлера.

2. Анализ содержания диссертации

Представленная диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Список включает в себя 101 наименование. Объем диссертации составляет 103 страницы и 74 рисунка, расположенных в тексте.

Введение содержит описание актуальности темы, цель диссертационной работы, поставленные перед соискателем задачи, основные положения, выносимые на защиту, элементы научной новизны и практической значимости работы, описание личного вклада соискателя, обоснование достоверности результатов, указания на апробацию работы, перечень публикаций по результатам исследований, объём и структуру диссертационной работы.

В первой главе приведён обзор существующих исследований на тему отрыва сверхзвукового течения. Рассматриваются полученные ранее экспериментальные и расчётные данные разных авторов о структуре потока в зоне присоединения отрыва в угле сжатия в двумерной и трёхмерной постановке. Вводится понятие высоконапорного слоя (HPL). Уточняются цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе описывается постановка экспериментальных и численных исследований. Раздел 2.1 посвящён методике экспериментального исследования. В нём описаны сверхзвуковые аэродинамические трубы Т-326 и Т-333 ИТПМ СО РАН, и представлены используемые в работе модели. Уточнена методология проведения испытаний при помощи преобразователя давления ТДМ-А 0.01%, перемещаемого по нормали к поверхности модели. Приведены схемы визуализации течения и автоматизированной системы сбора данных. В разделе 2.2 описана методика численного расчета. Указано, что расчет проведен в двух постановках – ламинарной и турбулентной. Отмечено, что применялась дифференциальная двухпараметрическая модель турбулентности $k-\omega$ SST. В разделе 2.3 описаны особенности измерений при помощи приёмника полного давления в пристенном слое. Отмечено, что при внесении в пристенную область зонда Пито структура течения изменяется за счёт взаимодействия сдвигового течения со скачком уплотнения, формируемого торцом зонда. В этом случае отмечается появление локального пристенного максимума. Описан методический эксперимент и показано, что эффект HPL превышает эффект влияния зонда Пито более чем в 5 раз.

В третьей главе представлены результаты испытаний всех рассматриваемых в диссертации экспериментальных моделей. В разделе 3.1 проведён сравнительный обзор шлирен-фотографий и распределений давления Пито для трёх конфигураций с углом сжатия. Отмечено, что HPL фиксируется на шлирен-фотографиях в виде

узкой темной полоски, которая начинается сразу за линией присоединения отрыва к поверхности. Он также виден на профилях давления Пито. В разделе 3.2 исследована модель угла сжатия с острой передней кромкой и различными углами уступа в диапазоне $20^\circ - 50^\circ$. Отмечено, что в случае $\varphi = 50^\circ$ эффект НРЛ ослаблен из-за сильных пульсаций полного давления. Путем анализа экспериментальных данных установлено, что продольные вихри Гёртлера способствуют диссипации НРЛ вниз по потоку. В разделе 3.3 изучена структура сверхзвукового течения в угле сжатия с установленными боковыми стенками. В этом случае зафиксированы интенсивные вихри на стыках центрального клина и боковых стенок. Показано, что указанные вихри ослабляют НРЛ. В разделе 3.4 рассмотрен случай осесимметричного течения. Наряду с прочими, исследована модель с различными иглами, установленными в вершине носового конуса. В случае острой иглы эффект НРЛ подтверждается в полном объеме. В случае тупой иглы НРЛ не обнаружен. В разделе 3.5 показано, что НРЛ образуется вследствие совместного влияния вязкости в пограничном слое, изоэнтропического разворота течения в вее волн сжатия и потерь полного давления на основном скачке уплотнения.

В четвертой главе приведены результаты параметрических исследований по влиянию чисел M и Re на эффект НРЛ. Представлены детальные экспериментальные и численные результаты по структуре течения в области присоединения отрыва к поверхности. Отмечена ключевая роль области присоединения в образовании НРЛ. Установлено, что необходимым условием формирования НРЛ является высокая скорость набегающего потока. Показано, что в диапазоне $Re = 0.7 \cdot 10^6 - 2.9 \cdot 10^6$ характеристики НРЛ практически не меняются.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы.

3. Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В представленной диссертации ряд результатов и выводов обладают признаком новизны. Среди наиболее важных можно отметить:

1. Показано, что высоконапорный слой возникает вследствие совместного влияния вязкости в пограничном слое и изоэнтропического сжатия.

2. Впервые установлено существование высоконапорного слоя в осесимметричном течении.
3. Показано, что определяющими параметрами для возникновения высоконапорного слоя являются величина угла сжатия φ , число Маха набегающего потока M_∞ и число Re . Установлено, что высоконапорный слой явно выражен в угле сжатия при $M_\infty > 5$. Для $M_\infty = 6$ 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 незначительно.

Положение о том, что наличие высоконапорного слоя необходимо учитывать при проектировании новых воздухозаборников до настоящего времени не встречалось в открытой литературе.

4. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений

Обоснованность и достоверность научных положений, сформированных в рамках данной диссертации, обеспечена комплексным использованием современных экспериментальных и расчетных методов, а также корректностью теоретического анализа. Применяемые методики исследования и экспериментальное оборудование ИТПМ СО РАН сертифицированы. Используемые в расчете алгоритмы и модель турбулентности $k-\omega$ SST прошли верификацию и валидацию за более чем десятилетний период активного использования. Оценочные расчеты выполнены в рамках подходов классической газовой динамики. Выводы и заключение сформулированы как констатация экспериментальных результатов и сомнений не вызывают.

5. Опубликование основных результатов диссертации в научной печати

Результаты диссертации прошли апробацию на семи конференциях высокого уровня. Анализ показал, что соискателем опубликовано 14 научных работ, в том числе 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ. Степень участия соискателя в публикациях не установлена и по этой причине принят принцип равного участия всех соавторов. Основные результаты исследований

опубликованы. Это соответствует требованиям п. 13 «Положения о присуждении ученых степеней», постановление Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 01.10.2018, с изм. от 26.05.2020) «О порядке присуждения ученых степеней».

6. Соблюдение правил цитирования в диссертации

Соискатель ученой степени ссылается на источники заимствования материалов или отдельных результатов в соответствии с п. 14 «Положения о присуждении ученых степеней», постановление Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 01.10.2018, с изм. от 26.05.2020) «О порядке присуждения ученых степеней».

7. Дискуссионные вопросы и замечания

По диссертационной работе и автореферату соискателю могут быть высказаны следующие замечания дискуссионного и редакционного характера:

1. В диссертации речь идет о «высоконапорном слое», который определяется как «область с повышенным полным давлением» (стр. 32). С другой стороны, во всех экспериментах исследовано давление Пито, которое существенно зависит от числа M перед зондом Пито. Следует отметить, что напор (скоростной напор) в аэродинамическом эксперименте определяется как разность между полным и статическим давлениями (с учетом поправки на сжимаемость) в измерительной точке. Исходя из логики термина «высоконапорный слой», исследовать надо именно скоростной напор, а не давление Пито.
2. Соискатель пишет (стр. 84) «потери полного давления в пересекающихся характеристиках веера волн сжатия CF ». Если речь идет о характеристиках, то потери полного давления равны нулю и говорить о потерях в данном контексте неуместно.
3. В заключении соискатель пишет (стр. 96) «высоконапорный слой возникает вследствие совместного влияния вязкости в пограничном слое и изоэнтропического сжатия». Это неточная формулировка. Можно рассмотреть воздухозаборник с изоэнтропическим конусом, где

реализуется «совместное влияние вязкости в пограничном слое и изоэнтропическое сжатие», но высоконапорный слой не возникает.

4. В разделе «Научная новизна» соискатель пишет «Впервые представлены формулы для расчёта параметров течения в высоконапорном слое». Действительно, в разделе 3.5 диссертации представлены формулы достаточно простого газодинамического расчета, которые играют определенную роль в структуре диссертации, но претендовать на научную новизну не могут.
5. В разделе 2.2 описана методология численного расчета и представлены некоторые результаты. Раздел подготовлен формально. По имеющейся информации трудно восстановить методику расчета. Отсутствуют блоки и структура сетки. Из результатов, наряду с несколькими графиками приведена только одна визуализация (рис. 36) течения с трубкой Пито. Но на следующем рисунке (рис. 37) расчетная кривая приведена уже без учета зонда и не моделирует исследуемое явление «локального пика» (при этом надписи на рис. 37 перепутаны. Надо понимать, что красная линия – это расчет, а черная – эксперимент).

8. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационного исследования

Высоконапорный слой образуется за линией присоединения сверхзвукового отрывного течения в угле сжатия. С другой стороны, угол сжатия является частью конструкции воздухозаборника. Полученные результаты по условиям возникновения, развития и диссипации высоконапорного слоя рекомендуется использовать при расчете систем теплозащиты и запуска новых типов воздухозаборников. С этой точки зрения, представленная диссертация имеет не только фундаментальный, но и практический интерес.

9. Общее заключение

Диссертация Трубицыной Лукерьи Петровны на тему «Механизм формирования и газодинамические параметры динамического слоя в области присоединения

сверхзвукового отрывного течения» является самостоятельной законченной научно-исследовательской работой, обоснованность и достоверность выводов основных научных положений и практических рекомендаций которой не вызывает сомнений. Работа содержит практические решения, касающиеся вопросов проектирования систем теплозащиты и запуска новых типов воздухозаборников двигателей скоростных летательных аппаратов. В рамках диссертационного исследования автором впервые установлено существование высоконапорного слоя в осесимметричном течении. При этом использованы современные методы экспериментальных исследований и проведен расчет с применением высокоточных подходов вычислительной аэродинамики. Применение научных положений диссертационного исследования внесет заметный вклад в развитие теории и практики исследований тонких физических явлений. Область диссертационного исследования соответствует паспорту научных специальностей ВАК Минобрнауки России по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы по следующим разделам: 4 – Ламинарные и турбулентные течения, 5 – Течения сжимаемых сред и ударные волны, 12 – Пограничные слои, слои смешения, течения в следе. Положения диссертационного исследования Трубицыной Лукерьи Петровны, выносимые на защиту, отражены в 14 работах, из них 6 статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации. Предложенные автором методики прошли успешную апробацию на ряде научно-практических конференций. Автореферат в полной мере отражает содержание и основные положения диссертационного исследования. По объему полученных данных, новизне поставленных и решенных задач, научному и практическому значению полученных результатов диссертационная работа Трубицыной Лукерьи Петровны соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» (утв. Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 №842 (ред. от 01.10.2018, с изм. от 26.05.2020)), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор Трубицына Лукерья Петровна заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв обсужден на заседании научно-технического совета НИО-1 ФАУ «ЦАГИ»
№133/3 от 10.04.2023.

Отзыв подготовлен Босняковым Сергеем Михайловичем, доктором технических наук, главным научным сотрудником

Адрес: ФАУ ЦАГИ, 140180, г. Жуковский МО, ул. Жуковского д.1

тел.: (495)556-43-23

e-mail: bosnyakov@tsagi.ru

Главный научный сотрудник,

доктор технических наук

_____ С.М. Босняков

Подпись главного научного сотрудника Сергея Михайловича Боснякова заверяю

Ученый секретарь диссертационного со.

доктор физ.-мат. наук

/ I.A. Брутян

Сведения о ведущей организации по диссертации
Трубицыной Лукерьи Петровны
"Механизм формирования и газодинамические параметры высоконапорного слоя в области присоединения сверхзвукового отрывного течения" по специальности
 01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы
 на соискание ученой степени **кандидата физико-математических наук.**

Полное наименование организации в соответствии с уставом:	Федеральное автономное учреждение "Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского"
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом:	ФАУ «ЦАГИ»
Ведомственная принадлежность организации	Министерство промышленности и торговли РФ
Полное наименование структурного подразделения, составляющего отзыв:	отделение аэродинамики силовых установок
Почтовый адрес организации:	ул. Жуковского, 1, Жуковский, Московская обл., 140181
Веб-сайт	http://www.tsagi.ru/
Телефон	8 (495) 556-40-32
Адрес электронной почты	info@tsagi.ru

Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющего отзыв, в рецензируемых научных изданиях за последние пять лет по теме диссертации (не более 15 публикаций).

№	Авторы	Название	Издательство, журнал, год, №, страницы	Вид, год
1	С.М. Босняков, В.В. Маленко, А.Н. Морозов, М.А. Николаев, Д.В. Ливерко	Экспериментальное исследование низкочастотных пульсаций в слое смешения струи натурной аэродинамической трубы при наличии и отсутствии вихрегенераторов	Ученые записки ЦАГИ, №3, 2021. С. 46-57.	2021, статья
2	С.М. Босняков, И.С. Матяш, С.В. Михайлов	Численное исследование низкочастотных пульсаций в слое смешения струи натурной аэродинамической трубы и опыт моделирования струйного актуатора для их подавления	Математическое моделирование. 2021, т.33, №7, с.79-92. DOI: 10.20948/mm-2021-07-06	2021, статья

3	Hirsch, C., Hillewaert, K., Hartmann, R., Couaillier, V., Boussuge, J.-F., Chalot, F., Bosniakov, S., Haase, W.	TILDA: Towards Industrial LES/DNS in Aeronautics	Paving the Way for Future Accurate CFD - Results of the H2020 Research Project TILDA, Funded by the European Union, 2015 -2018. Editors: Hirsch, C., Hillewaert, K., Hartmann, R., Couaillier, V., Boussuge, J.-F., Chalot, F., Bosniakov, S., Haase, W. (Eds.). Covers development and application of high-order methods for high-fidelity CFD. ISBN 978-3-030-62047-9. Jan 2021.	2021, книга
4	Bosnyakov, I., Bosnyakov, S., Mikhaylov, S., Troshin, A., Wolkov, A.	Validation of a Discontinuous Galerkin Based DES Solver in Flow Problems Using High Performance Computing	Сборник трудов конференции «32nd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2021», 2021. Shanghai, 6 September 2021 до 10 September 2021	2021, статья
5	Bosnyakov, S., Mikhaylov, S., Podaruev, V., Troshin, A., Wolkov, A.	Detached-Eddy Simulation of Dual Stream Nozzle Jet Using High Order Discontinuous Galerkin Method	Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, 2021, 148, стр. 519–532. DOI: 10.1007/978-3-030-62048- 6_19. Издатель:Springer Nature. ISSN:1612-2909, E-ISSN:1860- 0824	2021, статья
6	Bosnyakov I., Bosnyakov S., Matyash S., Mikhailov S., Volkov A.	Calculation of the Civil Aircraft Wing Characteristics in Critical Flight Modes	AIP Conference Proceedings, 2020, 2288, 030008. https://doi.org/10.1063/5.0028994 .	2020, статья
7	Bosnyakov I.S., Bosnyakov S.M., Engulatova M.F., Matyash I.S., Mikhailov S.V., Podaruev V.Yu., Volkov A.V.	An effective high-order numerical method for solving the Reynolds equation system in the case of civil aircraft high lift wing	AIP Conference Proceedings, 2020, 2288, 020003. https://doi.org/10.1063/5.0029238 .	2020, статья
8	Босняков С.М., Власенко В.В., Енгулатова М.Ф., Матяш С.В., Михайлов С.В., Молев С.С.	Об эффективности двух подходов к расчету обтекания крыла с выпущенной механизацией при наличии отрывных зон.	Журнал вычислительной математики и математической физики, 2019, том 59, № 1, с.87-101.	2019, статья

9	Бахнэ С., Босняков С.М., Михайлов С.В., Трошин А.И.	Сравнение методов аппроксимации градиентов в схемах, ориентированных на вихреразрешающие расчеты	Математическое моделирование. 2019. Т. 31. № 10. С. 7-21.	2019, статья
10	Босняков С.М., Дубень А.П., Желтоводов А.А., Козубская Т.К., Матяш С.В., Михайлов С.В.	Численное моделирование сверхзвукового отрывного обтекания обратного наклонного уступа методами RANS и LES	Математическое моделирование. 2019. Т. 31. № 11. С. 3-20.	2019, статья
11	Bosnyakov S.M., Mikhaylov S.V., Podaruev V.Y., Troshin A.I.	Unsteady Discontinuous Galerkin Method of a High Order of Accuracy for Modeling Turbulent Flows	Mathematical Models and Computer Simulations. 2019. Т. 11. № 1. С. 22-34.	2019, статья
12	Босняков С.М., Михайлов С.В., Подаруев В.Ю., Трошин А.И.	Нестационарный разрывный метод Галеркина высокого порядка точности для моделирования турбулентных течений	Математическое моделирование. 2018. Т. 30. № 5. С. 37-56.	2018, статья
13	Босняков С.М., Горбушин А.Р., Курсаков И.А., Матяш С.В., Михайлов С.В., Подаруев В.Ю.	О верификации и валидации вычислительных методов и программ на основе метода Годунова	Ученые записки ЦАГИ. 2017. Т. 48. № 7. С. 1-17.	2017, статья
14	Kursakov I.A., Gorbushin A.R., Bosnyakov S.M., Glazkov S.A., Lysenkov A.V., Matyash S.V.	A Numerical Approach for Assessing Slotted Wall Interference Using the CRM Model at ETW	CEAS Aeronautical Journal. 2017. № 6/н. С. 1-20	2017, статья

Заместитель Генерального директора -
начальник комплекса аэродинамики и динамики полета

Ляпунов