

ОТЗЫВ

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

Диссертационная работа Трубицыной Лукерьи Петровны посвящена экспериментальному и численному изучению механизма формирования высоконапорного слоя за линией присоединения сверхзвукового отрывного течения в угле сжатия и условиям существования этого слоя в зависимости от параметров течения. Исследуемых параметров в настоящей задаче достаточно много. Прежде всего, это тип отрывного потока - трехмерный, квази - двумерный и двумерный, а также режим течения - ламинарный или турбулентный. Интенсивность высоконапорного слоя и его наличие или отсутствие зависит от числа Маха, угла сжатия и числа Рейнольдса. Одним из важных выводов работы является слабая зависимость характеристик напорного слоя от числа Рейнольдса, что вызывает много вопросов о причине подобной автомодельности, но, тем не менее, это экспериментально доказанный диссертантом факт. При обтекании конуса сильные эффекты могут оказывать как геометрия центральной иглы, так и ее форма. Все отмеченное говорит о сложности и многопараметричности решаемой в работе задачи. Тема этой работы является актуальной, поскольку структура сверхзвукового отрывного течения в угле сжатия, в том числе образование вихрей Тэйлора-Гёртлера за линией присоединения течения является важной проблемой современной аэрогазодинамики и теплофизики. Несмотря на значительный прогресс в этой области, из-за сложности трёхмерной структуры течения в угле сжатия, многие механизмы формирования течения остаются не описанными. Кроме того, известно, что при высоких скоростях на поверхности летательного аппарата могут возникать локальные зоны отрыва потока, которые могут приводить к повышенным силовым и тепловым нагрузкам на его поверхность. Поэтому, результаты, полученные в диссертации для сверхзвукового течения в угле сжатия, имеют как фундаментальное, так и несомненное прикладное значение.

Диссертационная работа содержит введение, четыре главы, заключение и список цитируемых источников из 101 наименования. Общий объем работы составляет 103 страницы, включая 79 рисунков и 2 таблицы. Автореферат напечатан на 22 страницах и

содержит 15 рисунков. Основное содержание диссертации опубликовано в 6 работах, в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

В диссертации поставлены и решены следующие 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 $Re_L = 6 \cdot 10^5 - 2.7 \cdot 10^6$.

Данные задачи решены в ходе комплексного экспериментального и численного исследования течения в угле сжатия в ряде различных постановок: угол сжатия с углом наклонного уступа $20^\circ - 50^\circ$, угол сжатия с боковыми стенками, и коническое тело с установленной на носу иглой. Эксперименты проведены на сверхзвуковых аэродинамических трубах Т-326 и Т-333 ИТПМ СО РАН с использованием независимых методов измерения (шлирен-визуализация и зондирование потока при помощи приёмника полного давления). Численные расчёты проведены в пакете Ansys Fluent в трёхмерной постановке. Проведено методическое исследование, в ходе которого показано, что измерения полного давления в пристенном течении при помощи зонда Пито корректны, несмотря на взаимодействие зонда с пограничным слоем. Этому вопросу в диссертации уделено особое внимание, поскольку измерения насадком Пито являются базовыми в экспериментальной части работы. Достоверность полученных в диссертации результатов основана на применении обоснованных экспериментальных и численных методов аэрофизики. Достоверность экспериментальных результатов дополнительно подтверждается также использованием независимых методов исследования и сопоставлением результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

В диссертации представлен механизм формирования высоконапорного слоя и зависимость его параметров от геометрии течения – величины угла сжатия и наличия бокового стекания в зоне присоединения. Показано, что высоконапорный слой формируется вследствие совместного влияния изоэнтропического сжатия течения и вязкости в пограничном слое за линией присоединения. Представлены формулы для

расчёта параметров течения в высоконапорном слое. Величина давления Пито в высоконапорном слое, рассчитанная в соответствии с предложенным механизмом, соответствует экспериментальным данным. Высоконапорный слой регистрируется для всех трёх типов (пространственное, квазидвумерное, осесимметричное) обтекания моделей, а его существование не зависит от типа течения. Показано, что высоконапорный слой в угле сжатия формируется в области присоединения сверхзвукового отрывного течения в диапазоне углов наклона уступа $20 - 50^\circ$. Установлено влияние вихревой структуры течения в области присоединения на параметры высоконапорного слоя. В случае осесимметричного течения установлено влияние формы носовой части иглы на существование высоконапорного слоя. Дан диапазон чисел Маха, для которых существует высоконапорный слой. Показано, что влияние числа Рейнольдса на существование высоконапорного слоя незначительно. Отмеченные результаты и составляют научную новизну диссертационной работы, которые в существенной мере расширяют представления о механизмах формирования высоконапорных слоев в сверхзвуковых отрывных потоках.

По диссертационной работе имеется несколько замечаний:

1. Известно, что в дозвуковых отрывных потоках линия повторного присоединения является, как правило, криволинейной и нестационарной. Такие же эффекты, по-видимому, следует ожидать и при сверхзвуковых скоростях течения и это может сказаться на особенностях образования высоконапорного слоя. Однако эти вопросы не получили должного отражения в работе.
2. Автору следовало бы обратить более пристальное внимание на возможные последствия воздействия напорного слоя на процессы пристенного переноса энергии и импульса. В работе есть только общие фразы о высокой интенсивности влияния на динамические и тепловые характеристики. Понятно, что экспериментально это сделать сложно, но в расчетной части такой анализ мог бы дать много полезной информации, в том числе и для практических приложений.
3. В работе получен интересный результат о слабом влиянии числа Рейнольдса на параметры высоконапорного слоя. По мнению рецензента, сущность данного явления раскрыта не полностью. Из числа возможных факторов, воздействующих на формирование слоя, почему то удалена толщина пограничного слоя или толщина вытеснения. В дозвуковых отрывных потоках этот параметр является одним из определяющих.

4. В работе следовало бы уделить больше внимания изучению процесса взаимодействия высоконапорного слоя с образующимися на поверхности вихрями Тэйлора-Гёртлера.
5. Полученные результаты систематических исследований могли бы послужить основой для создания режимных карт течения, в которых можно было бы отразить как пределы существования напорного слоя, так и его интенсивность. Это замечание можно рассматривать как пожелание на развитие работ данного направления.
6. Больших претензий по стилю и ясности изложения нет. Однако имеются досадные огрехи в оформлении графического материала. На ряде рисунков опытные точки различных режимов трудно различимы, например, рис. 40, рис. 45. На рис. 6 автореферата нет обозначений линий 1 и 2.

Приведенные замечания не влияют на высокую оценку диссертации в целом. Исследование выполнено на высоком научном уровне, решает актуальные задачи аэрогазодинамики и является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей специальности 1.1.9 - «Механика жидкости, газа и плазмы». Автором в значительной мере расширены представления о механизме образования высоконапорного слоя в отрывном сверхзвуковом потоке в широком диапазоне изменения параметров течения. В работе впервые получены данные при квази – двумерном и двумерном отрыве потока, показана аналогия течения с режимом трехмерного отрыва.

Научные результаты работы, представленные к защите, являются новыми. Они достаточно полно опубликованы в научной литературе и представлены на ведущих научных форумах. Автореферат корректно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Трубицыной Л.П. была полностью заслушана на расширенном семинаре лаборатории термогазодинамики Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН 20.12.2022 г. и получила положительную оценку.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что диссертационная работа «Механизм формирования и газодинамические параметры высоконапорного слоя в области присоединения сверхзвукового отрывного течения» представляет собой законченное научное исследование и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук в соответствии с «Положением о присуждении учёных степеней», а её автор - Трубицына Лукерья Петровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Я, Терехов Виктор Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

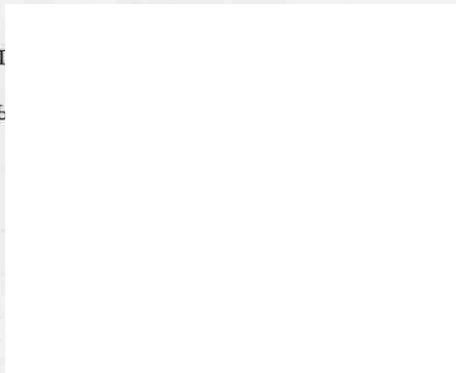
Официальный оппонент - Терехов Виктор Иванович,
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
лаборатории термогазодинамики Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С.
Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.
Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1
тел.: +7(383) 330-90-40,
e-mail terekhov@itp.nsc.ru



Терехов Виктор Иванович

15.05.2023

Подпись г.н.с., д.т.
Ученый секретарь



заверяю:

Макаров М.С.

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 *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.т.н.
Научные специальности, по которым защищена диссертация	01.04.14 (теплофизика и теоретическая теплотехника)
Ученое звание	профессор
Академическое звание	
Тел:	8 (383) 3306736
E-mail:	terekhov@itp.nsc.ru
Должность	главный научный сотрудник
Подразделение организации	Лаборатория термогазодинамики
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Адрес служебный: Почтовый индекс, город, улица, дом	Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1
Web-сайт организации.	itp.nsc.ru
Телефон организации.	+7(383) 330-90-40
E-mail организации.	director@itp.nsc.ru

По теме рассматриваемой диссертации имею 150 научных работ, в том числе в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 работ):

1. Shishkin N.E., Terekhov V.I. The effect of liquid phase temperature and concentration on gas - droplet cooling efficiency // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2020. – V. 153. – Article 119639.
2. Terekhov V.I., Gorbachev M.V., Khafaji H.Q.A. Heat and mass transfer during ethanol evaporation on the walls of a flat channel at forced convection of humid air // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2020. – V. 156. – Article 119821.

3. Terekhov V.I., Karpov P.N., Nazarov A.D., Serov A.F. Unsteady heat transfer at impinging of a single spray pulse with various durations// *Int. J. Heat Mass Transfer.* –2020.– V. 158.– Article 120057.
4. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Effect of evaporating droplets on flow structure and heat transfer in an axisymmetrical separated turbulent flow // *Int. J. of Heat and Mass Transfer.* – 2019. – V. 140. – P. 767-776.
5. В.Л. Жданов, И.Г. Кухарчук, В.И. Терехов Поле скорости за пластиной, установленной во внутренней области турбулентного пограничного слоя // *ИФЖ.* – 2020. – Т. 93, № 5. – С. 1278-1284.
6. A.F. Serov, A.D. Nazarov, V.N. Mamonov, V.I. Terekhov Experimental investigation of energy dissipation in the multi-cylinder Couette-Taylor system with independently rotating cylinders // *Applied Energy.* – 2019. – V. 251, № 1. – Article 113362, 8 p.
7. А.В. Барсуков, В.В. Терехов, В.И. Терехов Влияние пассивного возмущения на структуру течения и теплообмен в отрывной области за обратной ступенькой//*ТВТ*, 2021. 59, №1, с. 126-132.
8. В. И. Терехов, Н. Е. Шишкин Влияние поверхностно-активного вещества на интенсивность испарения подвешенных капель воды // *Коллоидный журнал*, 2021, Т. 83, № 1, стр. 107-113
9. Terekhov V.I. Heat Transfer in Highly Turbulent Separated Flows: A review. // *Energies* 2021, 14, 1005.
10. I.A. Chokhar, A.Yu. Dyachenko, M.A. Pakhomov, M.V. Philippov, V.I. Terekhov Experimental study of the effect of a transverse trench depth on film cooling effectiveness// *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 25, 100934
11. Е.М. Старинская, N.B. Miskiv, A.D. Nazarov, V.V. Terekhov, V.I. Terekhov, O. Rybdylova, S.S. Sazhin Evaporation of water/ethanol droplets in an air flow: Experimental study and modeling// *Int. J. Heat and Mass Transfer* Vol. 177, 2021, 121502.
12. V. Terekhov, A. Dyachenko & Y. Smulsky (2021) The Effect of Longitudinal Pressure Gradient on Heat Transfer in a Separated Flow Behind a Sudden Expansion of the Channel // *Heat Transfer Engineering*, 2021, 42:16, 1404-1416,
13. A.I. Ocheredko, M.A. Pakhomov, V.V. Terekhov and V.I. Terekhov Numerical Modeling of Flow Pattern and Heat Transfer at Injection of Counter-Flowing Wall Jet // *J. Engineering Thermophysics*, 2021, Vol. 30, No. 2, pp. 225–234
14. V.V. Lemanov, M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov, Z. Travnicek Non-stationary flow and heat transfer in a synthetic confined jet impingement// *Int. J. of Thermal Sciences* 179 (2022) 107607.
15. М.А. Пахомов, В.И. Терехов Влияние формы импульсов на теплоперенос в точке торможения нестационарной осесимметричной импактной газочапельной струи// *ИФЖ*, 2022, т. 95, №4,

Членом экспертного совета ВАК не являюсь.

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

14.06.2022
Дата

