

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу

Мельникова Алексея Юрьевича «Исследование торможения вязкого сверхзвукового потока с образованием псевдоскачка в цилиндрических каналах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа Мельникова А.Ю. представляет собой законченное исследование, в котором экспериментальным и расчетным путем определены свойства течений с псевдоскачком в протяженных каналах постоянного сечения.

В работе решается задача влияния газодинамических параметров течения на процесс торможения сверхзвукового потока газа в протяженных цилиндрических каналах.

Актуальность диссертации связана с задачами оптимизации процесса торможения потока в ВЗУ, организации запуска и работы аэродинамических установок с протяженными трактами. Несмотря на достаточно хорошо известные и описанные в литературе свойства псевдоскачка, а также предложенные Л. Крокко, Е.С. Щетинковым, П.К. Третьяковым физические модели, остаются открытыми вопросы возникновения волновых структур при отсутствии дросселирования на выходе или внутри протяженного канала. Обычно в расчетах течений с псевдоскачком в априори задается его наличие, и затем уже определяются его местоположение и структура.

Диссертация включает в себя: введение, 4 главы, заключение и список литературы (97 источников). Полный объем диссертации составляет 117 страниц, включая 59 рисунков и 5 таблиц.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации; поставлены цели и задачи, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость; кратко описаны методы исследования; сформулированы

основные положения, выносимые на защиту; выделен личный вклад автора в работу; сжато изложено содержание диссертации.

В первой главе приведен обзор литературы по теме диссертации. Показано, что псевдоскачок является сложной трехмерной газодинамической структурой, имеющей значительную протяженность вдоль потока. На псевдоскачок оказывают влияние многие параметры: числа Маха и Рейнольдса, геометрия канала, наличие теплоотвода в стенку и пр. Характеристиками псевдоскачка являются: его протяженность, положение, интенсивность, распределение давления по его длине. Изучение свойств псевдоскачка проводилось многими исследователями, что отмечается в обзоре. В обзоре также рассмотрены различные ситуации, связанные с техническими устройствами, в которых наблюдается данное явление.

Как правило, для организации течения с псевдоскачком в экспериментах осуществляется дросселирование на выходе из канала. Автор предлагает схему эксперимента, в которой дросселирование на выходе заменяется торможением за счет трения на стенке.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям возникновения течения с псевдоскачком при дросселировании и за счет трения на стенке протяженного канала. Получены данные о положении псевдоскачка и распределения статического давления на стенке по длине канала. Для заданных чисел Маха на входе цилиндрического канала получены протяженности каналов, в которых может сохраняться сверхзвуковая скорость газа на всей длине. Выполнены оценки потерь на трение в канале, и сделано сравнение с потерями полного давления в псевдоскачке.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования возникновения псевдоскачка в протяженном канале. В расчетах показано, что без дросселирования в каналах протяженностью менее 40 калибров не возникает отрыва пограничного слоя и образования псевдоскачка. Интересным является сам факт самостоятельного возникновения в расчете

течения с псевдоскачком. Численные исследования показали хорошее согласие с экспериментом. Автор не рассматривал вариантов с дросселированием и последующем открытием канала. В этом случае предельная длина канала, в котором возможно существование псевдоскачка, значительно сократится.

В четвертой главе отображены результаты расчета течения в диффузоре с тепловым и механическим дросселированием. Рассмотрены два случая: внезапное расширение ($\theta=90^\circ$) и под заданным углом ($\theta=10^\circ$). В расчете наблюдаются типичные картины нерасчетного истечения в диффузор. При определенном дросселировании (механическом или тепловом) возникает запирание диффузора. Получено согласие с утверждением, выдвинутым Д. Руэзом, что в рамках теории малых возмущений источники теплоты и массы эквивалентны. Показана связь между механическим и тепловым дросселированием, выраженная в квадратической зависимости относительного теплоподвода к изменению сечения выхода.

В заключении кратко приведены результаты работы по основным положениям, выносимым на защиту.

Достоверность представленных автором результатов подтверждена квалифицированным использованием экспериментальных методик и оборудования, применением сравнительного анализа данных, полученных в эксперименте и расчете, а также согласование с результатами исследований других авторов.

Отметим наиболее интересные результаты, полученные автором:

- В протяженном канале ($L/D > 40$) возможна реализация течения с псевдоскачком без дополнительного дросселирования выхода, что было получено в экспериментальном и расчетно-теоретическом исследовании. При этом в расчете режим с псевдоскачком возникает самостоятельно без ввода дополнительных ограничений на поток.

- Продемонстрирована эквивалентность теплового и механического дросселирования. Показана связь между механическим и тепловым дросселированием, выраженная в квадратической зависимости относительного теплоподвода к изменению сечения выхода.
- Определены условия существования ударно-волновых структур в протяженных каналах и коротких диффузорах.

По тексту диссертации имеются следующие замечания и вопросы:

1) В обзоре при описании свойств псевдоскачка не указана основная особенность течения в нем. А именно, что параметр неравновесности

$$\eta = \left[\frac{p}{p_n} + \frac{\gamma-1}{2\gamma} \left(1 + \gamma M_n^2 - \frac{p}{p_n} \right) \right] \frac{1 + \gamma M_n^2 - \frac{p}{p_n}}{\gamma M_n^2 \left(1 + \frac{1}{2}(\gamma-1)M_n^2 \right)}$$

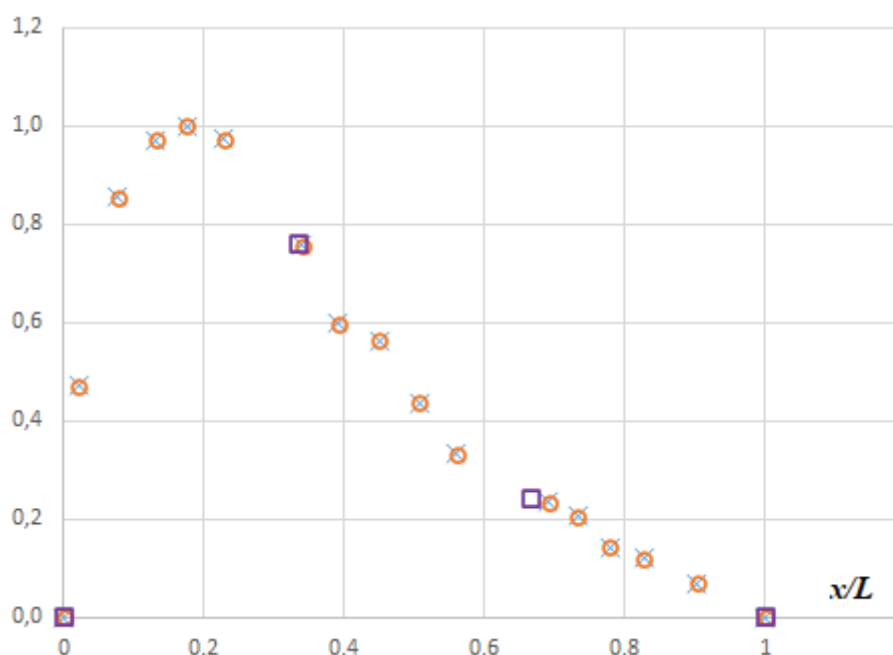
имеет следующую связь с

распределением давления по длине псевдоскачка

$$\frac{\eta-1}{\eta_{\max}-1} = 4 \frac{p-p_n}{p_k-p_n} \left[1 - \frac{p-p_n}{p_k-p_n} \right], \quad \text{где} \quad \eta_{\max} = \frac{(1+\gamma M_n^2)^2}{(\gamma+1)M_n^2 [2+(\gamma-1)M_n^2]},$$

индексы

«н» обозначают параметры в начале псевдоскачка, а «к» в его конце. Данные с рисунка 7 на стр.30 (источник [34]) в таком представлении приведены на рисунке ниже.



На рисунке $\times - \frac{\eta - 1}{\eta_{\max} - 1}$, $\circ - f = 4 \frac{p - p_n}{p_k - p_n} \left[1 - \frac{p - p_n}{p_k - p_n} \right]$, $\square -$ эксперимент автора

($x/L=0$ начало, $x/L=1$ конец псевдоскачка). На этот график лягут данные, полученные автором, если учесть, что в начале псевдоскачка число Маха отлично от расчетного на входе канала, так как торможение потока идет с самого начала, а не только в псевдоскачке. Так для данных графика 5 рис.23 δ , при числе Маха на входе $M_{\text{вх}}=3.95$, псевдоскачок начинается с $M_1 \approx 2.5$ ($\pi(\lambda)=P_{\text{ст}}/P^*=0.016$), и для этой ситуации нанесены квадратные точки на приведенном рисунке.

2) При анализе распределений статического давления отсутствуют данные по восстановлению (либо оценке) распределения чисел Маха вдоль канала, том числе в отсутствии псевдоскачка, что вызывает трудности в определении значимости полученных результатов. Хотя, используя, например, модель Третьякова П.К., в которой теплоподвод принимается равным нулю, можно восстановить распределения параметров по длине псевдоскачка (число Маха, полное давление). Кроме того, 4-х точек измерения на длине псевдоскачка мало, чтобы делать выводы об изменениях в газодинамике течения при создании волновых структур за счет трения на стенке. В эксперименте от стенок в поток подводится тепло (тепловые потоки никак не оценивались в работе), увеличивая торможение. При использовании модели Третьякова П.К. это надо будет учитывать в отличии от случаев горячих потоков, когда эффекты трения и теплоотвода противоположно направлены и нивелируют друг друга, упрощая анализ.

3) На рис. 34 неверный масштаб по ординате. В канале не может происходить увеличение полного давления без подвода энергии.

4) Как согласовать между собой два утверждения в §4.1 главы 4: «Полное давление при подводе тепла к дозвуковому потоку уменьшается не более чем на 15%, поэтому на этом участке можно считать, что полное давление здесь остается постоянным ($P_{05} = P_{06}$)» и ниже «Видно, что при максимально

возможных значениях температуры T_{06} (до 3000 К) полное давление в камере повышения давления может увеличиться примерно в 2,5 раза [95] по сравнению с давлением при $T_{06} = 600$ К»?

Приведенные замечания не являются критичными при общей оценке диссертации. Работа выполнена на высоком научном уровне, обладает научной новизной и значимостью.

Личный вклад автора

Все результаты расчётов и опытов, выносимые на защиту, получены лично автором. Автор принимал активное участие в планировании и проведении экспериментальных исследований, самостоятельно выполнял расчет и анализ данных.

Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 4 статьях рецензируемых периодических изданий рекомендованных ВАК., входящих в базы данных Web of Science, Scopus и РИНЦ, докладывались и обсуждались на международных и Российских научных мероприятиях различного уровня.

Автореферат в полной степени отражает основные положения и выводы диссертации.

Результаты диссертационной работы Мельникова А.Ю. могут быть использованы для определения параметров запуска и выхода на режим газодинамических установок имеющих протяженный тракт.

Таким образом, диссертация Мельникова А.Ю. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований экспериментальным и расчетным путем определены свойства течений с псевдоскачком в протяженных цилиндрических каналах постоянного сечения.

Диссертационная работа Мельникова А.Ю. удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук и соответствует требованиям пункта 9

Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а Мельников А.Ю. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

Тупикин Андрей Викторович,
д.ф.-м.н. (специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы),
старший научный сотрудник лаборатории №7.4 «Лаборатория физических основ энергетических технологий» ИТ СО РАН.

Телефон: +7 (913) 462-88-63

E-mail: tupikin@itp.nsc.ru

Институт теплофизики СО РАН,

Пр. Ак. Лаврентьева, д.1, Новосибирск, Россия, 630090,

сайт: <http://itp.nsc.ru/>, E-mail: director@itp.nsc.ru

тел.: +7 (383) 330-90-40, факс: +7(383) 330-84-80

Я, Тупикин Андрей Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Мельникова Алексея Юрьевича, и их дальнейшую обработку.

26.02.2024 г.

А.В. Тупикин

Подпись Тупикина Андр
Учёный секретарь ИТ СО
к.ф.-м.н.

М.С. Макаров

Председателю
диссертационного совета
24.1.125.01 (Д 003035.02)
академику В.М. Фомину

ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОППОНЕНТА

Я, Тупикин Андрей Викторович, даю свое согласие выступить в качестве оппонента по диссертации Мельникова Алексея Юрьевича на тему: Исследование торможения вязкого сверхзвукового потока с образованием псевдоскачка в цилиндрических каналах на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

О себе сообщаю:

Ученая степень, отрасли науки	Д.ф-м.н., физико-математические науки
Научные специальности, по которым защищена диссертация	01.02.05- "Механика жидкости, газа и плазмы"
Ученое звание	Без звания
Академическое звание	Без звания
Тел:	+79134628863
E-mail:	tupikin@itp.nsc.ru
Должность	Старший научный сотрудник
Подразделение организации	Лаборатория физических основ энергетических технологий
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 орг.	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Адрес служебный: Почтовый индекс, город, улица, дом	630090, Новосибирская область, город Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1.
Web-сайт организации.	https://www.itp.nsc.ru/
Телефон организации.	+7(383) 330-90-40
E-mail организации.	director@itp.nsc.ru

Список основных публикаций официального оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 работ):

№	Авторы	Название статьи, журнал, год, том, №, страницы
1	Абашев В.М., Еремкин И.Н., Животов Н.П., Замураев В.П., Калинина А.П., Третьяков П.К., Тупикин А.В.	Экспериментальное и численное моделирование процессов сверхзвукового истечения из полузакрытого канала // Инженерно-физический журнал, Т.91, No.2, С. 361-370, 2018 г.
2	Тупикин А.В., Замашиков В.В.	Растяжение ламинарного пламени в слабом электрическом поле // Физика горения и взрыва. Т.56, No.2. С. 3-9, 2020 г.
3	Третьяков П.К., Тупикин А.В., Куранов А.Л., Колосенок С.В., Саваровский А.А., Абашев В.М.	Применение синтез-газа для интенсификации горения керосина в сверхзвуковом потоке // Физика горения и взрыва. No 5, С. 45-48, 2020 г.
4	Третьяков П.К. Тупикин А.В., Зудов В.Н.	Горение керосина в псевдоскачке при изменении условий на входе в модель камеры сгорания СПВРД // Физика горения и взрыва. Т. 57, № 6. С. 3-7, 2021 г.
5	Зудов В.Н., Тупикин А.В.	Влияние внешнего электрического поля на оптический разряд в скоростном потоке // Журнал технической физики. Т.92, вып. 2. С. 209-215, 2022 г.
6	Третьяков П.К., Тупикин А.В.	Режимы горения керосина в канале постоянного сечения при числе Маха $M=1.7$ на входе // Физика горения и взрыва. Т.58, № 5. С.28-32, 2022 г.
7	Arbuzov V.A., Arbuzov E.V., Dubnishchev Yu.N., Zolotukhina O.S., Lukashov V.V. and Tupikin A.V	Hilbert-optic diagnostics of hydrogen-oxygen inverse diffusion flame // Energies. V.15, Iss.24. P.9566, 2022
8	Зудов В.Н., Тупикин А.В.	Иницирование гомогенного горения в высокоскоростной струе совместным воздействием оптического и электрического разрядов // Физика горения и взрыва. Т.59, №1. Р. 25-31, 2023 г.
9	Тупикин А.В., Третьяков П.К.	Стабилизация оптическим разрядом водородно-воздушного пламени в высокоскоростном потоке // Физика горения и взрыва. Т.59, №6. Р. 3-9, 2023 г.

Не являюсь членом экспертного совета ВАК.

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

«26» февраля 2024 г.

д.ф.-м.н., старший научный сотрудник

лаборатории №7.4 ИТ

А.В. Тупикин

Учёный секретарь ИТ

к.ф.-м.н.

М.С. Макаров