

**Отзыв**

официального оппонента, доктора технических наук, директора исследовательского центра «Аэрокосмические двигатели и химмотология» федерального автономного учреждения «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» Арефьева Константина Юрьевича 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

**Актуальность** диссертационной работы Мельникова А.Ю. подтверждается тем, что в настоящее время сверхзвуковые течения во внутренних каналах реализуются во многих современных газодинамических устройствах, таких как аэродинамические трубы, воздухозаборные устройства, эжекторы, диффузоры, газодинамические насадки и т.п. Анализ торможения потока вязкого газа в таких устройствах связан с необходимостью детального изучения фундаментальных процессов взаимодействия цепочки скачков уплотнения с пограничным слоем у поверхности стенки. В замкнутых каналах такую цепочку скачков уплотнения принято называть псевдоскачком, протяженность которого может быть достаточно большой. Вместе с тем, на данный момент существует недостаток расчетных и экспериментальных данных, описывающих поведение псевдоскачка в каналах различной длины.

Автор в своем исследовании расширил диапазон данных в части сверхзвукового течения в каналах с образованием псевдоскачка, что позволяет уточнить прогнозирование и, в последующем, создать методы управления структурой ударных волн, образующихся в результате торможения потока.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 117 страниц, 59 рисунков и 5 таблиц. Библиография из 97 наименований отражает ключевой

перечень известных современных исследований в рассматриваемой автором области науки, хотя может быть дополнена и рядом других исследований, на которые автор не ссылается.

**Во введении** автор отразил и обосновал актуальность темы диссертации, привел диапазон длин каналов представленных в литературе, в которых производились исследования сверхзвукового потока с псевдоскачком, сформулировал цель диссертации и кратко изложил полученные результаты. Цель диссертации сформулирована как изучение влияния газодинамических параметров потока и геометрии цилиндрических каналов на процесс торможения сверхзвукового потока газа с образованием псевдоскачка.

**В первой главе** представлен обзор и анализ известных работ по тематике торможения сверхзвуковых потоков и образования псевдоскачка во внутренних течениях. Рассмотрены работы, описывающие общие принципы торможения сверхзвуковых потоков и переход к дозвуковому режиму течения через систему скачков уплотнения. Подробно рассмотрены работы других авторов, которые описывают:

- картину взаимодействия между прямым скачком уплотнения и турбулентным пограничным слоем в канале постоянного сечения;
- цепочку скачков уплотнения и распределения газодинамических параметров потока в псевдоскачке;
- свойства псевдоскачка в каналах с постоянной площадью и условием адиабатической стенки;
- образование псевдоскачка в различных аэродинамических устройствах.

**Во второй главе** представлены результаты экспериментального исследования сверхзвукового потока с образованием псевдоскачка в каналах различной длины. Автор дал описание экспериментальной установки, включающей профилированные сверхзвуковые сопла с числами Маха от 2 до 4.5 и цилиндрические каналы относительной длины до 64 калибров.

Приведены результаты экспериментального исследования торможения сверхзвукового потока в «коротком канале» при числах Рейнольдса от  $2,3 \cdot 10^5$

до  $5,1 \cdot 10^6$ . Автором представлены продольные распределения статического давления на стенке канала при нарастающем давлении в вакуумной емкости. Мельников А.Ю. отметил, что псевдоскачок образуется в выходном сечении канала и по мере увеличения давления в вакуумной емкости перемещается вверх по потоку. В данной конфигурации канала увеличение числа Рейнольдса не оказывает изменений на поток.

После увеличения длины канала, Мельникову А.Ю. удалось установить, что псевдоскачок формируется в промежуточном сечении при минимальном давлении в вакуумной емкости. Показано, что псевдоскачок занимает свое стационарное положение до значения противодавления  $P_{\text{вак}}/P_0=0,074$ . При дальнейшем увеличении давления в вакуумной емкости происходит перемещение псевдоскачка в сторону входного сечения, как и в случае «короткого канала».

Автор рассмотрел описание существующих методов определения коэффициента потерь полного давления для дозвуковых и сверхзвуковых потоков, после чего им было предложено использовать для оценки потерь полного давления метод на основе уравнения Дарси, ранее применяемый для дозвуковых потоков.

**Третья глава** посвящена численному моделированию процессов торможения и образования псевдоскачка в «длинных цилиндрических каналах». Автор использовал пакет прикладных программ ANSYS Fluent, задачу решал в стационарной осесимметричной постановке с использованием RANS метода и модели турбулентности  $k-\omega$  SST.

Автором были рассчитаны коэффициенты потерь полного давления; определено влияние длины канала на образование выбитой головной ударной волны; смоделирован процесс формирования псевдоскачка при различном противодавлении. Численным моделированием было подтверждено, что в каналах большой длины положение псевдоскачка остается постоянным в некотором диапазоне противодавлений.

**В четвертой главе** представлено численное моделирование сверхзвукового

течения в цилиндрических каналах с диффузорами больших углов расширения. Описаны осесимметричные конфигурации каналов, для проведения численного моделирования и изложен метод расчета с учетом теплового дросселирования. В результате расчетов автор показал, что переход к дозвуковому течению происходит в псевдоскачке. По утверждению автора, рассматриваемые диффузоры обеспечивают изменение полного давления примерно в 3 раза без нарушения течения на входе в горло и не зависят от угла раскрытия диффузоров. Автору удалось обобщить результаты и получить гиперболическую зависимость для теплового и геометрического воздействий.

В **заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы, которые соответствуют фактически полученным результатам.

Ключевая составляющая **научной новизны** работы, по мнению оппонента, заключается в:

- полученных автором распределениях параметров сверхзвукового потока в длинных каналах при наличии псевдоскачка и степени возможного повышения противодавления без нарушения режимов течения;

- установлении соотношения между геометрическим и тепловым дросселированием для псевдоскачкового режима течения в диффузорах с большими углами раскрытия.

**Практическая значимость** диссертационного исследования заключается в том, что результаты работы Мельников А.Ю. (такие как неравномерности профиля скорости, значения давлений и их отношений) могут быть применены в дальнейшем при проведении экспериментальных и численных исследований взаимодействия сверхзвуковых потоков и пограничных слоев в каналах.

**Апробация** подтверждена участием автора с докладами по тематике работы на 9-ти Международных и Всероссийских конференциях и семинарах. Основные результаты диссертации опубликованы в 2-х рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 7-ми статьях в сборниках конференций индексируемых в Scopus и WoS, а также 2-х статьях в журналах из перечня ВАК.

Полученные автором результаты можно считать достаточно **достоверными**,

так как они проверены путем прямого сравнения расчетных и экспериментальных данных, в том числе полученных в исследованиях, представленных в диссертации и в работах других авторов. В частности, в проведенных экспериментальных исследованиях и численных расчетах были получены значения безразмерной длины псевдоскачка и распределения давления. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

По диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**:

1) Требуется дать более детальное пояснение, в каких практически значимых аэродинамических или газодинамических устройствах имеют место диффузоры относительной длины 32 и 64 калибра.

2) При описании экспериментальной установки и полученных эмпирических данных желательным является более подробно указать геометрическую конфигурацию канала и привести метрологические данные по всем измеряемым параметрам. Для дальнейших исследований было бы полезным провести визуализацию структуры течения, например, теневыми методами.

3) Требуется более подробно обосновать существенные допущения, используемые автором при математическом моделировании течения: использование стационарной постановки задачи и RANS метода в совокупности с моделью турбулентности  $k-\omega$  SST.

4) В работе было бы полезно дать более четкое определение «псевдоскачка», «отрицательного градиента давления» и ряда других терминов, которые использует автор. Неточности в определениях могут внести неоднозначное толкование полученных результатов.

5) Учитывая сильное влияние теплоподвода и теплоотвода, в расчетах и/или экспериментах было бы полезным варьировать уровень тепловых потоков в стенке рассматриваемого канала.

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки работы и не влияют на основные результаты. Диссертация Мельникова А.Ю. является научно-квалификационной работой, включающей новые научные результаты,

их обоснование и приложение к практическому применению. Цель работы достигнута.

Диссертация соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, и «Изменений, которые вносятся в Положение о присуждении ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации № 335 от 21 апреля 2016 года. Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой исследованы принципы формирования псевдоскачка в каналах различной формы. Автор диссертации Мельников Алексей Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

директор исследовательского центра «Аэрокосмические двигатели и химмотология» доктор технических наук

Арефьев Константин Юрьевич

« 04 » 03 2024 г.

Федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»)

Адрес: 111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2

Телефон: +7 (495) 362-49-50

E-mail: kyarefev@ciam.ru

<http://www.ciam.ru/>

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

### ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОППОНЕНТА

Я, Арефьев Константин Юрьевич, 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.т.н.
Научные специальности, по которым защищена диссертация	05.07.05 – тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов
Ученое звание	–
Академическое звание	–
Телефон	+7915417:
E-mail	arefyev@rambler.ru
Должность	Директор исследовательского центра
Подразделение организации	Исследовательский центр «Аэрокосмические двигатели и химмотология»
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы	Государственный научный центр, федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»
Ведомственная принадлежность орг.	Министерство промышленности и торговли РФ
Адрес служебный: Почтовый индекс, город, улица, дом	111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2
Web-сайт организации.	<a href="https://ciam.ru/">https://ciam.ru/</a>
Телефон организации.	+7 (499) 763-61-67
E-mail организации	info@ciam.ru

По теме рассматриваемой диссертации имею 25 научных работ, в том числе в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 работ):

№	Авторы	Название статьи, журнал, год, том, №, страницы
1	Яновский Л.С., Вараксин А.Ю., Арефьев К.Ю., Ежов В.М.,	Исследование воспламенения и горения синтетических высокомолекулярных углеводородов в высокоэнталийном воздушном потоке // ФГВ, 2023. Т. 59. № 4. С. 35-43.

	Мартыненко С.И., Червонная Н.А.	
2	К. Ю. Арефьев, М. А. Абрамов, А. В. Воронецкий, Э. Е. Сон	Оптимизация инжекции двухфазных продуктов газификации энергетических конденсированных составов в модельную камеру сгорания малого удлинения // ТВТ, 2022. Т. 60. № 1. С. 94-102.
3	Арефьев К.Ю.	Аналитический обзор современных тенденций в зарубежных разработках высокоскоростных летательных аппаратов // Авиационные двигатели. 2022. № 3 (16). С. 59-72.
4	Ananyan M.V., Aleksandrov V.Y., Arefiev K.Y.	Determination of the stagnation temperature of high-enthalpy supersonic air flows using a thermoelectric transducer with shielded measuring junction // Thermophysics and Aeromechanics. 2021. Т. 28. № 5. С. 619-630.
5	Арефьев К.Ю., Александров В.Ю., Рудинский А.В., Федотова К.В., Крикунова А.И., Панов В.А.	Исследование плазменного воздействия на эффективность горения газообразного метана в сверхзвуковом потоке // ТВТ, 2021. Т. 59. № 4. С. 548.
6	Voronetskii A.V., Aref'ev K.Y., Abramov M.A.	Simulation study for injection of two-phase fuel mixture into a cylindrical afterburner with asymmetric air inlet // Thermophysics and Aeromechanics. 2020. Т. 27. № 6. С. 793-810.

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

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

« 06 » 02 2024 г.

Арефьев