

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета

24.1.193.01 (Д 002.110.02)

на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Объединенного института высоких температур Российской академии наук
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)
от 14 декабря 2022 г. (протокол № 31)

**Защита диссертации Хазова Дмитрия Евгеньевича
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
«Численное моделирование процессов энергоразделения
в потоках сжимаемого газа»**

Специальность

1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Объединенного института высоких температур Российской академии наук
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)
Протокол № 31 от 12 декабря 2022 г.

Диссертационный совет 24.1.193.01 (Д 002.110.02) утвержден Приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 26.01.2022 г. № 86/нк в составе 31 человека. На заседании присутствуют 22 человека, из них 10 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 9 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

Председатель – зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01
(Д 002.110.02) д.ф.-м.н., профессор Андреев Н.Е.

Ученый секретарь – ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01
(Д 002.110.02) к.ф.-м.н. Тимофеев А.В.

1	ПЕТРОВ О.Ф.	академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
2	АНДРЕЕВ Н.Е.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
3	ХРАПАК А.Г.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
4	ТИМОФЕЕВ А.В.	к.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
5	АГРАНАТ М.Б.	д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.14	Подключен
6	АМИРОВ Р.Х.	д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.9	Отсутствует
7	БАЖЕНОВА Т.В.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
8	ВАРАКСИН А.Ю.	чл.-корр. РАН, профессор	1.3.14	Присутствует
9	ВАСИЛЬЕВ М.М.	д.ф.-м.н.	1.3.9	Подключен
10	ВАСИЛЬЕВ М.Н.	д.т.н., профессор	1.3.14	Присутствует
11	ВАСИЛЯК Л.М.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
12	ВОРОБЬЕВ В.С.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
13	ГАВРИКОВ А.В.	д.ф.-м.н., доцент	1.3.9	Подключен
14	ГОЛУБ В.В.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
15	ГРЯЗНОВ В.К.	д.ф.-м.н.	1.3.14	Подключен
16	ДЬЯЧКОВ Л.Г.	д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
17	ЕРЕМИН А.В.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
18	ЗЕЙГАРНИК Ю.А.	д.т.н., с.н.с.	1.3.14	Присутствует
19	ЗЕЛЕНЕР Б.Б.	д.ф.-м.н.	1.3.9	Подключен
20	ИОСИЛЕВСКИЙ И.Л.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
21	КИВЕРИН А.Д.	д.ф.-м.н.	1.3.14	Присутствует
22	КИРИЛЛИН А.В.	д.ф.-м.н.	1.3.14	Отсутствует
23	ЛАГАРЬКОВ А.Н.	академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
24	ЛЕВАШОВ П.Р.	к.ф.-м.н.	1.3.14	Присутствует
25	ЛОМОНОСОВ И.В.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
26	МЕДИН С.А.	д.т.н., профессор	1.3.14	Подключен
27	НОРМАН Г.Э.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
28	ПИКУЗ С.А.	к.ф.-м.н.	1.3.9	Подключен
29	САВВАТИМСКИЙ А.И.	д.т.н.	1.3.14	Отсутствует
30	ФИЛЛИПОВ А.В.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
31	ЯНЬКОВ Г.Г.	д.т.н., с.н.с.	1.3.14	Отсутствует

ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации ведущего инженера лаборатории гиперзвуковой аэродинамики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова) **Хазова Дмитрия Евгеньевича** на тему «Численное моделирование процессов энергоразделения в потоках сжимаемого газа». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Диссертация выполнена в лаборатории гиперзвуковой аэродинамики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова) (119192, г. Москва, Мичуринский проспект, д.1, imes.msu.ru).

Научный руководитель:

Леонтьев Александр Иванович — д.т.н., академик, профессор, главный научный сотрудник лаборатории гиперзвуковой аэродинамики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва.

Официальные оппоненты:

Смирнов Евгений Михайлович — гражданин РФ, д.ф.-м.н., профессор, профессор высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Россия, СПбПУ; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29).

Яновский Леонид Самойлович — гражданин РФ, д.т.н., профессор, начальник отдела специальных авиационных двигателей и химмотологии государственного научного центра, федерального автономного учреждения «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ЦИАМ; Россия, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, 2).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. (ИТ СО РАН; Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1).

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н., профессор Смирнов Е.М. (онлайн) и д.т.н., профессор Яновский Л.С.

СТЕНОГРАММА

Председатель

Доброе утро, уважаемые члены совета и присутствующие. Мы приступаем к реализации нашей повестки, где у нас один пункт: защита диссертации Хазова Дмитрия Евгеньевича. Я попрошу Алексея Владимировича ознакомить нас с документами, которые необходимы для того, чтобы эта защита состоялась.

Ученый секретарь

(Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства науки и высшего образования РФ).

Председатель

Мы переходим к докладу соискателя, прошу уложиться в двадцать минут по регламенту.

Хазов Д.Е.

Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Хазова Д.Е. прилагается).

Председатель

Спасибо, Дмитрий Евгеньевич. Пожалуйста вопросы соискателю. Да, Павел Ремирович, пожалуйста.

Левашов П.Р.

Использовались какие-нибудь подгоночные параметры в этих моделях для того, чтобы описать эксперимент или нет, таких параметров не было у Вас?

Хазов Д.Е.

Единственный параметр, который мы меняли турбулентное число Прандтля в ядре потока. Мы получили значение 0.82 и стоит отметить, что наш коллега из Новосибирска М.С. Макаров, который тоже занимается исследованием подобных устройств, в его работах это значение — 0.83. Т.е. тоже близкое значение. А так, по сути, больше никакого подбора не было.

Председатель

Спасибо, ещё вопросы есть? Нет? Да, пожалуйста.

Левашов П.Р.

У Вас при валидации моделей с пористой, проницаемой стенкой, там где 1D и 2D. 1D модель лучше описывает эксперимент, чем 2D. С чем Вы это связываете?

Хазов Д.Е.

Да, совершенно справедливо. Дело в том, что здесь сложно сказать. Она (1D) лучше не сильно, вот по температуре здесь всё-таки есть расхождение. Это, я думаю, связано с выбором теорий, описывающих коэффициент восстановления и влияния вдува/отсоса. Или даже так я коротко скажу. Это связано с тем, что предельная асимптотическая теория Кутателадзе-Леонтьева очень хорошая.

Председатель

Ещё вопросы есть? Если нет, я хотел бы уточнить. Когда Вы говорите об одномерной теории, понятно, что у Вас параметры течения меняются и по радиусу, и по длине. Значит, по-видимому, Вам удалось так заменить радиальное распределение такими хорошими граничными условиями, что одномерная модель что-то описывает. Одномерная модель — вдоль направления распространения. Но, наверное, должно быть какое-то ограничение на поперечный размер для того, чтобы это можно было использовать.

Хазов Д.Е.

Здесь, по сути, речь идёт о течении в трубе. Понятно, что у нас есть профиль скорости. Даже если посмотреть, я специально их (профили) выводил. Вот, например, при течении, в устройстве газодинамического энергоразделения. (*Демонстрирует соответствующий слайд*). Вот в разных сечениях показаны профили скорости по центральному каналу и по кольцевому, дозвуковому каналу. Конечно радиальное распределение, оно присутствует, но замена его одномерным. Существуют ли ограничения? Ну, честно говоря, не думаю, что в этом смысле. Если мы перейдем к числам Рейнольдса, к безразмерным параметрам, не думаю, что здесь какое-то есть ограничение.

Председатель

Но что-то должно быть такое. Даже глядя на эти графики, смотрите, у Вас сначала, действительно, распределение по радиусу равномерное, а дальше, на конце уже довольно сильное радиальное распределение и, в принципе, если Вы сразу будете использовать более широкий канал, то, по-видимому, вклад поперечного распределения будет больше. С этим мой вопрос связан. Или Вы хотите сказать, что для любых сечений трубы, то, что Вы написали будет работать так же хорошо.

Хазов Д.Е.

Если не будет никаких воздействий. Мы же знаем, что всё-таки течение в трубе одномерно описывается достаточно хорошо и это здесь видно. Здесь вносятся дополнительные воздействия: тепловое, расходное. Хотя в случае расходного, здесь отсос, а он как раз выравнивает профили. Поэтому, я думаю, что на первый взгляд не видится ограничений. Но об этом надо подумать.

Председатель

Спасибо. У кого ещё вопросы? Пожалуйста.

Киверин А.Д.

А не могли бы Вы немного раскрыть про пористые материалы. Во-первых, что они из себя представляют и какие-то рекомендации по использованию материалов, какие лучше использовать? Но так и по моделям

Хазов Д.Е.

Да, спасибо. В данном случае обсчитывался эксперимент. В эксперименте использовалась трубка из спечённого электрокорунда и мы описывали, полученную экспериментальную расходную характеристику, т.е. изменение плотности тока в зависимости от перепада давления (*Демонстрирует соответствующий слайд*). Были получены вот такие точки. И, соответственно, использовалось уравнение Дарси-Форхгеймера, вязкостные и

инерционные члены подбирались из вот этих корреляций. И здесь, соответственно, подбирались параметр пористости и диаметр частиц, чтобы попасть в эту кривую. И удивительным образом, эти параметры (ϵ и диаметр частиц). ϵ , по-моему, порядка 30%, если я не ошибаюсь, это открытая пористость и диаметр частиц порядка 70 мкм. Эти значения оказались очень близки к паспорту этой физической, пористой трубки. И вот такое описание оно вполне, как мы видим, очень хорошо подходит и описывает вполне корректно процессы, происходящие в этом устройстве.

Киверин А.Д.

Вы можете же Ваши модели как-то использовать для того, чтобы прогнозировать какие лучше использовать материалы?

Хазов Д.Е.

По какому критерию лучше?

Киверин А.Д.

Это интересно от Вас услышать.

Хазов Д.Е.

Здесь мы видим, что эта модель, уравнение Дарси-Форхгеймера корректно описывает и нас это вполне устраивает. Как дельнейшие шаги можно вводить саму пористую стенку, как расчётную область и смотреть, что происходит в ней. В данной, конкретной задаче это не сильно интересно, но, в принципе, такое тоже возможно.

Киверин А.Д.

Спасибо.

Председатель

Ещё вопросы есть? Если нет, тогда спасибо. Мы переходим к ознакомлению с различными отзывами. Сначала отзыв научного руководителя.

Ученый секретарь

Уважаемые коллеги! 30 ноября 2022 года на 96 году ушел из жизни академик РАН Александр Иванович Леонтьев. В связи с озвученными обстоятельствами отзыв научного руководителя зачитаем мы, зачитаем полностью (*Зачитывает отзыв научного руководителя А.И. Леонтьева*).

Председатель

Спасибо. Пожалуйста, ознакомьте нас с остальными отзывами.

Ученый секретарь

Коллеги, в деле имеется заключение организации, где была выполнена диссертация. Это НИИ механики МГУ. В заключении описаны актуальность темы, модели и методы исследования, подробно описаны результаты, практическая значимость, апробация работы, публикации, личный вклад автора. Если позволите, я это пропущу, так как мы уже заслушали диссертацию. В целом диссертация Д.Е. Хазова на тему «Численное моделирование процессов энергоразделения в потоках сжимаемого газа» является самостоятельной законченной научно-исследовательской работой, содержащей новые

результаты по безмашинному энергоразделению в каналах с непроницаемыми теплопроводными и газопроницаемыми стенками и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. Заключение принято на заседании секции «Аэромеханика» ученого Совета НИИ механики МГУ «27» июля 2022 г. Подписали председатель секции «Аэромеханика» Учёного Совета НИИ механики МГУ, зав. лаб., доцент, к.ф.-м.н. С.В. Гувернюк и учёный секретарь секции в.н.с., к.ф.-м.н. М.А. Зубин. Утвердил документ и.о. директора НИИ механики МГУ Д.В. Георгиевский. Кроме того, если позволите, то я перейду к следующим отзывам. Получен отзыв от ведущей организации. В отзыве достаточно подробно описана диссертация и все необходимые элементы, кроме того, указано восемь замечаний и пожеланий. Отзыв составлен учёным секретарём ФГБУН Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН к.ф.-м.н. М.С. Макаровым и главным научным сотрудником лаборатории «Термогазодинамика» ФГБУН Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН д.т.н., профессором Тереховым В. И. и утверждён директором Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе академиком РАН Д.М. Марковичем. Если позволите, я перейду только к замечаниям.

Несмотря на высокий уровень проведённых исследований, по тексту диссертации и автореферата можно сделать ряд замечаний.

1. Обзор литературы по теме диссертации нельзя назвать полным. Нет критического анализа цитированных работ, особенно касающихся теоретического описания рассматриваемого эффекта и устройств на его основе, что приводит к отсутствию чёткого обоснования цели и задач исследования. В автореферате диссертации цитируется только две работы, хотя тема развивается с 1997 г.
2. В работе рассматриваются «безмашинные» методы энергоразделения, однако не сказано, чем они отличаются от машинных. В то же время, используемые автором параметры эффективности, основаны на сравнении температурного перепада, возникающего за счёт энергоразделения, с температурным перепадом в термодинамически совершенном адиабатном детандере.
3. В работе большое внимание уделено валидации разработанных математических моделей для численного анализа энергоразделения в трубе Леонтьева и трубе с проницаемой стенкой, что является сильной частью работы. Однако отсутствует верификация двумерных моделей по сеточной сходимости, не представлены критерии сходимости по итерациям, не представлены в полной мере выбранные численные методы и граничные условия.
4. На стр. 17 представлено уравнение (1.4) для стационарного течения в пограничном слое, однако субстанциональная производная не расписана, что приводит к недопониманию, есть ли производная по времени?
5. В диссертации часто употребляется словосочетание «смесь инертных газов», применительно к смесям с малым числом Прандтля, при этом в основном рассматривается смесь водорода с ксеноном. Очевидно, для данной смеси определение «смесь инертных газов» не подходит. На стр. 37 приводится значение показателя адиабаты равное 1.67 для смеси водород-ксенон, что не соответствует действительности, т.к. водород двухатомный газ и в смеси с ксеноном даёт значение показателя адиабаты 1.46 при $\gamma=0.2$.
6. На стр. 43 в таблице 2 не ясно, что означает величина b .
7. На стр. 71 в сноске дано пояснение, что рассматриваемая система является закрытой, т.е. допускает обмен энергией с окружающей средой. В классической термодинамике обмен энергией с окружающей средой возможен в не

изолированной системе. Закрытая система — это система, которая не обменивается с окружающей средой веществом, и эта система может быть изолированной. В пояснении, по-видимому, ошибка.

8. К сожалению, в тексте диссертации встречаются орфографические и грамматические ошибки, например, стр. 4, 29, 37, 60, 106, 107, 138.

Отмеченные выше недостатки не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная задача процесса газодинамического энергоразделения в широком диапазоне изменения параметров. Работа соответствует всем критериям положения о порядке присуждения учёных степеней, её автор Хазов Дмитрий Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. Если позволите, остальные элементы отзыва зачитывать не буду. Зачитал основное, что нам сейчас важно для рассмотрения и не повторяющееся с другими отзывами.

Кроме того, у нас было получено семь отзывов на автореферат. Последовательно их зачитаю. Все отзывы положительные, но с замечаниями. Если позволите, буду концентрироваться на замечаниях.

Первый отзыв представил зав. лабораторией фундаментальных исследований «Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации», д.ф.-м.н., профессор С.А. Исаев. Подпись профессора Исаева удостоверена проректором по науке и цифровизации Г.А. Костиным. Следующие замечания отмечены по автореферату:

1. Недостаточно раскрыт бекграунд диссертации. Не упомянуты предшественники.
2. Не понятно, возникают ли скачки уплотнения в рассматриваемых схемах.
3. Как физически объяснить наблюдаемое на рис.2 резкое увеличение температуры наружной стенки в эксперименте и при использовании двумерной модели? Почему относительная длина ограничена 125? Можно ли ее увеличить?
4. Как влияет на процессы разделения турбулентность?
5. Каковы подробности постановки граничных условий на проницаемой стенке со вдувом-отсосом? Применяются ли пристеночные функции, учитывающие вдув-отсос?

В целом отзыв положительный и подтверждает, что автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата наук.

Перехожу к следующему отзыву на автореферат. Он представлен д.ф.-м.н., профессором Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» Г.В. Кузнецовым. Заверено учёным секретарём Томского политехнического университета. Отзыв положительный, замечаний нет.

Следующий отзыв на автореферат представлен зам. заведующего кафедрой теплотехники и тепловых двигателей Самарского университета д.т.н., профессор В.В. Бирюком. Заверено начальником отдела сопровождения деятельности ученых советов Самарского университета. Отзыв положительный, есть два замечания:

1. В работе не представлена оценка влияния расходов по дозвуковому каналу в сравнении со сверхзвуковым.
2. Представляет сомнение некоторое несоответствие потерь давления в дозвуковом и сверхзвуковом потоке (стр. 9 автореферата).

Отзыв положительный.

Следующий отзыв представлен заведующим научно-исследовательской лабораторией моделирования процессов конвективного теплопереноса Томского государственного университета, д.ф.-м.н., доцентом М.А. Шереметом. Отзыв положительный есть три замечания.

1. Принимая во внимание вычислительную ориентацию диссертационного исследования, в автореферате стоило представить используемые одномерную и двумерную математические модели. Более того, в третьей главе соискатель отмечает разработку специального граничного условия, позволяющего учитывать взаимодействие между основным потоком и проницаемой стенкой при наличии вдува/отсоса. При этом математическая формулировка этого граничного условия также отсутствует в автореферате. Справедливости ради стоит отметить, что текст диссертации содержит описание рассматриваемых моделей.
2. Следовало более подробно изложить детали используемых вычислительных технологий как при реализации двумерной модели (размерность разностной сетки, величины шагов по времени и по пространству), так и при получении решения на основе одномерного приближения.
3. При проведении численных расчетов на основе двумерного приближения использовались модели турбулентности семейств $k-\varepsilon$ и $k-\omega$. В результате соискатель отмечает, что наилучшее совпадение с экспериментом демонстрирует стандартная $k-\omega$ модель. Следовало более подробно описать использование конкретных моделей с учетом специфики граничных условий.

Отзыв положительный.

Перехожу к следующему отзыву. Он составлен д.ф.-м.н., профессором, главным научным сотрудником отделения твердотопливных ракетных двигателей АО ГНЦ «Центр Келдыша» С. Г. Черкасовым. Подпись заверена учёным секретарём АО ГНЦ «Центр Келдыша». Отзыв положительный, есть замечание:

- Хотя диссертация имеет расчетно-теоретический характер, автореферат не содержит ни одной формулы. В частности, физико-математические модели, положенные в основу расчетов, описаны в автореферате исключительно словесно.

Отзыв положительный.

Следующий отзыв представлен профессором кафедры инженерной теплофизики имени В.А. Кириллина федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» Г.Г. Яньковым, д.т.н. Отзыв положительный, есть пять замечаний по материалам автореферата:

1. Полезно было бы представить расчётные области, соответствующие схемам на рис.1, 6 и сформулировать краевые условия для искомых переменных. В частности – «выходные» краевые условия, а также «специальное граничное условие», упомянутое на с.10 автореферата.
2. Неясно, на базе какой модели шаровой засыпки рассчитывались вязкостный и инерционный коэффициенты для определения градиента давления в пористой стенке. Как эти коэффициенты соотносятся с коэффициентами в формуле Эргуна?

3. Не поясняется причина пульсаций на профилях, представленных на рис.7, при малых x/d .
4. На с.9 вскользь упоминается об анализе различных способов охлаждения потока для повышения давления торможения. Какие способы анализировались, кроме капельного охлаждения, не сообщается. Что же касается капельного охлаждения, то какая-либо информация об используемой модели (за исключением того, что она одномерная) в автореферате отсутствует.
5. На рис. 12 безразмерные профили представлены вплоть до $y^+ = 10^{-2}$. Что вызвало необходимость использования столь плотной сетки? Обычно ограничиваются координатой ближайшего к стенке узла, соответствующей $y^+=10^{-1}$.

Отзыв положительный.

И перехожу к последнему отзыву, полученному на автореферат. Отзыв составили и.о. директора института «Авиационные технологии и инженерная физика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», д.т.н. А. И. Гурьянов, кроме того, к.т.н. С.В. Веретенников. И их подписи заверил ученый секретарь С.А. Волков. Отзыв положительный, есть замечание:

- Неясно, почему автор не использовал 3D численные модели.

Опять же, отзыв положительный.

На этом отзывы закончены.

Председатель

Спасибо, Алексей Владимирович.

Дмитрий Евгеньевич, пожалуйста. Ответьте на замечания и, если возможно, то их сгруппируйте, потому что часть из них повторялась.

Хазов Д.Е.

Итак, первое замечание было от ведущей организации. Обзор литературы неполный. Я с этим не соглашусь. Действительно, тематика развивается с 1997 г., когда было предложено это устройство, и, мне кажется, что все значимые работы перечислены. А если говорить о двух ссылках в автореферате, то это, естественно, никакой не обзор, а всего лишь ссылки на используемые экспериментальные данные моих коллег, которые я использовал для валидации.

Машинные-безмашинные (методы), с этим я согласен.

Следующее можно сгруппировать, так как это замечание было в нескольких отзывах. Не представлена «вычислительная кухня». Я с этим согласен, можно было бы представить.

Уравнение (1.4) на стр. 17 записано для стационарного течения в пограничном слое. Действительно, субстанциональная производная там написана, но она равна нулю, но и в заголовке этого подпункта указано в тексте диссертации, что рассматривается стационарный пограничный слой.

Смесь инертных газов — согласен. По поводу показателя адиабаты 1.67. Да, действительно, это ошибка, но она не влияет на основные результаты диссертации, т.к. это

ошибочное значение использовалось только для оценки предельных значений по модели Вигдоровича-Леонтьева. Во всех остальных двумерных и одномерных расчётах использовались корректные свойства, рассчитанные по мелодике НАСА.

Величина b (стр. 43) — это функция отношения молекулярного числа Прандтля к турбулентному для коэффициента восстановления по зависимости Ротта.

По поводу закрытой термодинамической системы. Я с этим замечанием не согласен. Потому что, если посмотреть монографию В.И. Крутова, по которой я учился, монографию Бэра «Техническая термодинамика», то закрытая термодинамическая система — это система, не допускающая обмена массой с окружающей средой, но допускающая обмен энергией. Исходя из этого я и использовал термин закрытая система. А, соответственно, изолированная система не допускает никакого обмена. С ведущей организацией всё.

Теперь отзывы на автореферат. У меня несколько другая последовательность, но, я думаю, это не принципиально.

Самарский университет. В работе не представлена оценка влияния расходов. С этим я не согласен, потому что как раз в работе и показано энергоразделение в зависимости от соотношения расходов. Несоответствие потерь давления в дозвуковом и сверхзвуковом потоках. Тоже не согласен. Мне кажется это очевидный факт, что чем выше скорость, тем выше потери. Квадрат скорости — это и есть потери полного давления и, соответственно, в сверхзвуковом потоке они выше.

Отзыв из МЭИ. Расчётные области показаны в тексте диссертации.

По поводу уравнений для вязкостного и инерционного коэффициентов и коэффициентов уравнения Эргуна. Я подготовил слайд. *(Демонстрирует соответствующий слайд)* Справа показано то, что использовалось в данной работе из монографии Белова, а слева классические уравнения Эргуна. Мы видим, что структура определения коэффициентов та же самая с точностью до эмпирических коэффициентов. Т.е. это очень близкие вещи.

Причина пульсаций на профилях, это тоже позволю себе продемонстрировать *(Демонстрирует соответствующий слайд)*. Дело в том, что обсчитывалась реальная экспериментальная установка, а в ней присутствовала ступенька при переходе от сопла к проницаемой стенке. Обратная ступенька и, соответственно, она являлась генератором вот этих небольших скачков, о которых речь и идёт. В эксперименте этого не наблюдалось, потому что мы не рассматривали в явном виде пористую стенку, а в эксперименте это всё размазывалось теплопроводностью самой стенки. У нас этого просто в расчётах нет.

По поводу способов охлаждения. Из-за объёма автореферата эта информация не приведена, всё это приводится в основном тексте диссертации. Рассматривалось конвективное охлаждение и воздействие многих параметров на него и второе — это испарительное охлаждение.

Безразмерные профили до $u+$ до 10^{-2} . Это как раз и вызвано тем, что применение специального граничного условия, когда мы в первой пристеночной ячейке задаём вдув или отсос, они и требуют задания таких тонких сеток.

Отзыв С.А. Исаева. Недостаточный бекграунд диссертации. Опять-таки, это не упомянуто в автореферате в силу ограничений. В тексте диссертации это есть. Скачки уплотнения в таких системах, т.к. есть сверхзвук, они, естественно, возникают и было показано, что у нас в коническом канале есть псевдоскачок на выходе, но это, естественно, паразитное явление. Длина канала ограничена 125 калибрами. Это для устройства газодинамического энергоразделения. Эта длина соответствует экспериментальной установке и была выбрана не случайно. Установка проектировалась исходя из того, что истечение будет происходить в атмосферу, т.е. при достижении этой длины будет реализовываться прямой скачок уплотнения. Длину эту можно увеличить, если поставить на выходе диффузор или предпринять какие-то меры по физической реализации такого течения.

Влияние турбулентности. Как такового влияния уровня турбулентности мы не исследовали в данной работе. Единственное, мы варьировали значение турбулентного числа Прандтля.

Подробности постановки граничных условий на пористой стенке. Они описаны в тексте диссертации.

Из Томского Государственного Университета. В тексте описано вдув-отсос. «Кухня» — согласен, что не описана. И использование $k-\omega$ и $k-\epsilon$ моделей — согласен.

С.Г. Черкасов. Действительно, в тексте автореферате в силу экономии места не приведена ни одна формула, но все формулы, все модели описаны в тексте диссертации

Из Рыбинска: почему автор не использовал 3D модели. Я не вижу смысла их использовать, так как у нас и геометрия осесимметричная и граничные условия осесимметричные и 3D, эффектам взяться здесь, казалось бы, неоткуда. И сопоставление с экспериментом показывает, что вполне достаточно тех подходов, которые мы используем.

На этом всё. Спасибо.

Председатель

Спасибо. На этом мы переходим к заслушиванию официальных оппонентов. У нас один оппонент присутствует лично, и мы начнем с выступления Л.С. Яновского. И если Вы не настаиваете, я бы Вас попросил не описывать подробно содержание диссертации, с которой мы уже ознакомились. Спасибо.

Яновский Л.С.

Уважаемый председатель, члены диссертационного совета, поскольку я выступаю по этой диссертации уже второй раз, я позволю себе, естественно, не использовать материалы отзыва в полной мере, а отмечу несколько особенностей, которые характеризуют данную диссертацию. Прежде всего, эта диссертация в какой-то мере завершает цикл исследований в области безмашинных методов разделения энергии, связанных с использованием пористых материалов. Это идея, ушедшего от нас, А.И. Леонтьева. Она

давно рассматривалась, эта идея. И вот Д.Е. (Хазов) в своей работе, представленной в качестве кандидатской диссертации сумел построить математические модели, которые позволяют нам при проведении научных проектных исследований оценивать влияния различных геометрических, режимных факторов на эффективность того или иного устройства. В качестве достоинств этой работы является то обстоятельство, что он использовал и валидировал свои результаты, свои модели на надёжных экспериментальных данных, которые длительно были наработаны в институте механике МГУ. Это известная школа, установки все давным-давно работали по этой тематике и поэтому доверие к тому, что диссертант валидировал, конечно, у лично никаких сомнений не вызывает. Это первое. Таким образом, можно считать, что все те выводы, которые он сделал, они весьма обстоятельны и достоверны. Им можно доверять и их можно использовать. Почему это важно. Потому что на сегодняшний день вопросы энергоразделения у нас вызывают большой интерес в части использования малогабаритных систем. Особенно в геометриях довольно сложных, не такой, какая у него была выбрана, а в более изощренных конфигурациях. И там возникает вопрос, как использовать тогда эти данные, если бы мы им не доверяли. В данном случае, и это та самая ситуация, когда материалы, полученные диссертантом, были положены в основу оценок эффективности энергоразделения для малогабаритных, беспилотных летальных аппаратов с большим временем барражирования. Что является достоинством этой работы? Это обнаруженные, как говорится, на кончике пера несколько эффектов. Это эффект, связанный с наличием максимума энергоэффективности, особенно при малых расходах. Это влияние или отсутствие влияния схемы: прямоточная, противоточная схемы при малых соотношениях расхода газа в дозвуковом и сверхзвуковом потоках. Это, по сути дела, действительно новые вещи, которые также представляли для нас интерес.

В качестве замечаний я бы отметил следующее. Автор не учёл то обстоятельство, что пористые материалы имеют свойство во время эксплуатации менять свои гидравлические характеристики. И вот это надо было бы учесть. Тем более, что ни одно рабочее тело не является идеально чистым. Второе обстоятельство. Хотелось бы посмотреть каким образом влияет угол наклона выдува или отсоса на эффективность энергоразделения. Такие работы были выполнены. Исследования при пористом вдуве/отсосе при наличии наклонных потоков, выдуваемых через наклонную пористую стенку выполнялись и было показано, что критические параметры вдува, которые здесь используются, они являются существенной функцией угла выдува по потоку или против потока. Когда выдув по нормали, рассматриваемый здесь, является частным случаем, так называемых направленных вдувов. Было бы интересно и полезно посмотреть эти вещи тем более, что это позволяет управлять процессом течения и менять энергоэффективность установки. И ещё, то, что было бы полезно посмотреть, то что испарительный метод повышения энергоэффективности требует наличия в системе узлов подачи и регулирования воды. Это, естественно ухудшает весовую энергетическую отдачу газодинамического устройства и его также надо учитывать, когда вы оцениваете энергоэффективность данной установки. В диссертации имеются, как всегда в любой работе, некие недочеты в виде опечаток, но я думаю, что они не существенны. Самое главное, это то, что, с моей точки зрения, диссертация представляется собой законченную научно-квалификационную работу. Квалификация диссертанта не вызывает у меня, как у оппонента, ни малейших сомнений. Я считаю, что диссертация, выполненная автором, полностью соответствует

всем критериям, установленным в п. 9-11 положения о порядке присуждения учёных степеней и автор, Д.Е. Хазов безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. У меня всё, спасибо.

Председатель

Спасибо большое, Леонид Самойлович. Дмитрий Евгеньевич, пожалуйста.

Хазов Д.Е.

Спасибо, Леонид Самойлович. Мои ответы. Первое, это влияние засорения пористой поверхности. Действительно, в работе такое не рассматривалось, но это можно косвенным образом оценить, потому что в работе рассматривалось изменение постоянного по длине отсоса при разных уровнях этого отсоса. Соответственно, исходя из этого можно предположить, что снижение уровня отсоса — это и есть засорение. Правда, это несколько модельное представление и по этому уже оценить.

По поводу учета затрат на подготовку воды при испарительном охлаждении. Действительно, в работе рассматривался только сам этот метод. Установка в целом, она не рассматривалась и это, конечно, можно сделать в дальнейшем.

Ну и плюс, направленный вдув, направленный отсос. Это тоже, конечно, интересно и, наверняка мы это рассмотрим в будущем. На этом у меня всё. Спасибо.

Председатель

Переходим к заслушиванию мнения второго официального оппонента. Е.М. Смирнов у нас из Санкт-Петербурга будет дистанционно сообщать нам своё мнение. Да, пожалуйста.

Смирнов Е.М.

Добрый день, коллеги. Я, с вашего позволения, тоже не буду освещать отзыв в полном объёме, в сокращённом виде. Что хочу сказать сразу, что актуальность, выполненного Д. Хазовым, исследования сомнений не вызывает. Она обусловлена как фундаментальным значением, пополняемого объёма знаний по физике процесса безмашинного энергоразделения и его эффективности, так и возникающими задачами по совершенствованию опытных образцов устройств энергоразделения по методу Леонтьева и обобщённого на случай каналов с проницаемой стенкой. По первой главе, которая является обзорной, у меня сложилось впечатление, что автор достаточно полно осветил предыдущие работы по тематике диссертации. Замечание было от ведущей организации, но я тоже присоединюсь к мнению, что достаточно полно, по крайней мере, для меня это прозвучало. Что касается содержательных глав, второй и третьей, то здесь красной нитью проходит изложение и сопоставление результатов, полученных по двум моделям: по одномерной и по двумерной, осесимметричной. Одномерная модель, она предусматривает включение эмпирических зависимостей для отражения взаимодействия потока со стенкой, они достаточно известные, классические, но в случае проницаемой стенки канала автор обоснованно и ожидаемо включил влияние вдува-отсоса на коэффициент трения и на коэффициент восстановления температуры по методу Кутателадзе-Леонтьева. А в случае двумерной задачи, которая решалась с применением пакета ANSYS Fluent, он ввёл дополнительные возможности, введением граничного условия взаимодействия со стенкой, если она проницаемая. Этого в пакете Fluent, это каждый раз приходится делать. В целом

я хочу сказать, что путём разработанных двух моделей, постоянного сопоставления, валидации автору удалось получить ряд важных, во многом новых результатов. Они отражены и в докладе, и в выступлении первого оппонента. Я их не буду зачитывать. Я согласен с тем, что автор в автореферате, в диссертации отметил. Достоверность результатов представляется достаточно высокой. Она обоснована сопоставлением результатов двух моделей, так и валидированием результатов экспериментом и не противоречием физике. Теперь я перехожу к замечаниям. Их достаточно много, но они больше связаны с характером изложения.

1. Оценки предельного энергоразделения в аппарате, включающем соосные осесимметричные каналы, проводятся на основе одномерной модели Вигдоровича-Леонтьева (Изв. РАН, Механика жидкости и газа, 2013), однако эта модель описана в работе весьма фрагментарно, и без обращения к первоисточнику трудно понять излагаемый в диссертации материал, относящийся к этим оценкам. Желательно было бы дать полное описание модели Вигдоровича-Леонтьева, хотя бы в Приложении.
2. На стр. 42 автор пишет, что в случае одномерной модели «для расчета коэффициентов теплоотдачи использовались также соотношения и для ламинарного течения [57]. Переключение между режимами осуществлялось по следующему правилу: » (ссылка на формулу (2.21)). Однако из формулы (2.21) следует, что она определяет эффективное число Нуссельта посредством взвешивания значений для ламинарного и турбулентного режимов (в зависимости от числа Рейнольдса), а не условия «переключения между режимами».
3. Неясно, почему система осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) и уравнения энергии, (2.27)–(2.29), записана с сохранением нестационарного членов, если все исследованные в работе задачи ставятся как стационарные. Или же в отдельных случаях автору, при расчетах по пакету ANSYS Fluent приходилось активировать опцию «Unsteady RANS» для получения сошедшегося стационарного решения? Соответствующие пояснения в работе отсутствуют.
4. В диссертации практически отсутствует информация об использованных расчетных сетках и сеточной чувствительности численных решений, получаемых по двумерной модели. Вместе с тем, включение в текст диссертации информации данного рода было бы весьма желательным, особенно в разделах, посвященных валидационным расчетам.
5. На страницах автореферата и диссертации автор с излишним «разработческим» акцентом пишет: «Для двумерной модели было разработано специальное граничное условие (...), позволяющее учитывать взаимодействие между основным потоком и проницаемой стенкой при наличии вдува/отсоса. Разработанный подход был тщательно валидирован на широком круге задач». Здесь, однако, следует заметить, что в рамках метода конечных объемов, основанного на применении балансовых соотношений для каждой расчетной ячейки, подход, при котором вклад конвективного потока, проходящего через прилегающую к проницаемой стенке грань, может быть подменен эффективным объемным источником, вполне очевиден и ранее неоднократно использовался другими расчетчиками, в том числе и при расчетах по коду ANSYS Fluent. Другое дело, что для адекватного

применения этого подхода требуются сетки, достаточно измельченные вблизи проницаемой стенки. Данный аспект в диссертационной работе не отражается, а применимость подхода «с подменой» обосновывается результатами валидационных расчетов, что не вполне корректно.

6. Поскольку в ряде случаев в моделируемом поле сверхзвукового течения формируются скачки уплотнения, то важным становится вопрос о выборе той или иной численной схемы для расчета конвективных потоков в течениях сжимаемого газа. К сожалению, автор не сообщает, какую из опций, реализованных в пакете ANSYS Fluent он выбрал и почему?
7. В тексте диссертации встречаются неудачные построения и неточности, синтаксические погрешности. Они отмечены в отзыве, и я их зачитывать не буду.

Высказанные замечания относятся к представлению материала на страницах диссертации и не изменяют общую положительную оценку диссертационной работы соискателя. Представленная Д.Е. Хазовым диссертация является научно-исследовательской работой, содержащей весьма значительный объем результатов и обобщающих положений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области теплофизики.

Результаты исследований достаточно полно опубликованы и содержание автореферата соответствует основным положениям, выводам, представленным в работе.

Тема диссертации и характер выполненных исследований соответствует специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Считаю, что диссертация Хазова Дмитрия Евгеньевича является завершённой научно-квалификационной работой, соответствующей критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук согласно пунктам положения ВАК. Автор диссертации Хазов Дмитрий Евгеньевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Спасибо за внимание.

Председатель

Спасибо, Евгений Михайлович. Пожалуйста, Дмитрий Евгеньевич, мы послушаем Ваши ответы замечания.

Хазов Д.Е.

Спасибо, Евгений Михайлович. Мои ответы. По поводу модели Вигдоровича-Леонтьева. Действительно в тексте не приводится полная выкладка этой модели, но есть ссылка на первоисточник, соответственно, можно ознакомиться.

По поводу переключения между режимами: ламинарный/турбулентный. Действительно, может быть неудачная формулировка. Вводится промежуточная зона, где «взвешивается» число Нуссельта в зависимости от числа Рейнольдса. По-видимому, просто неудачная формулировка.

По поводу нестационарного члена в уравнениях Навье-Стокса. Анализировалась всегда только стационарная задача. Но дело в том, что использовался солвер, основанный на плотности, так называемый, density-based solver. В этом случае используются маршевые методы расчета, поэтому нестационарный член учитывался.

Про «вычислительную кухню» мы уже говорили, это принимается.

По поводу граничного условия (вдува-отсоса) и его описания. Я не претендую на авторство этого подхода, более того, в работе есть ссылки на работы предшественников по этой тематике. Здесь речь шла о конкретном воплощении для конкретных задач.

Схема расщепления потоков. В данной работе использовалась схема Роэ. Так как одна достаточно робастна к внешним воздействиям. Хорошую сходимость обеспечивает. Существует вторая возможность использования адвективной схемы, но она более капризная. Были попытки её использования, вроде она точнее. Но сходимость гораздо хуже, поэтому мы её не использовали.

А с остальными замечаниями я согласен. Спасибо.

Председатель

Спасибо, Дмитрий Евгеньевич. Таким образом мы заслушали все мнения, которые существуют по этой диссертации из вне. И у нас время и место для дискуссии. Пожалуйста, кто хочет высказаться. Да, пожалуйста.

Вараксин А.Ю.

Работа хорошо известна в теплофизических кругах. Есть свои плюсы-минусы, есть много противников этого исследования. Потому что есть вихревая труба, над которой бьются. Там коэффициент полезного действия передач, трансформации энергии при разделении потоков тоже крайне низкий получается. Здесь тоже он не высок. И он по определению не может быть высоким. Но есть свои ниши использования. Тот объем работ, те несколько кандидатских диссертаций, которые были учениками А.И. Леонтьева защищены показывают перспективность этого исследования. Есть ниши прикладных исследований. Здесь мне очень понравился, второй раз это уже было озвучено оппонентом Л.С. Яновским, реальные направления, где это реально может быть востребовано. И это очень приятно.

Диссертант является выпускником той кафедры, которой я заведую уже десять лет, по совместительству являясь сотрудником ОИВТ. Он является выпускником этой кафедры, я прекрасно знаю диссертанта на протяжении десятилетий. Знаю эту школу, которая работала под руководством А.И. Леонтьева. Знаю квалификацию его прекрасно. Поэтому я сам буду голосовать положительно и призываю всех членов диссертационного совета поддержать эту работу. Второй раз уже. Надеюсь, что крайний.

Председатель

Спасибо, Алексей Юрьевич. И я тоже призываю всех проголосовать за утверждение этой защиты.

Таким образом, мы переходим к заключительному слову соискателя.

Хазов Д.Е.

Спасибо большое. Я хотел бы в первую очередь поблагодарить совет, председателя совета за то, что ещё раз меня выслушали. Хочу поблагодарить моих коллег по лаборатории и здесь присутствующих и тех, кто сегодня не пришёл. Тех, кто помогал мне в этой работе. И, конечно, хочу поблагодарить своего учителя, руководителя — Александра Ивановича Леонтьева, которого, к сожалению, уже нет с нами, но мы всегда будем его помнить. Спасибо.

Председатель

Спасибо. Алексей Владимирович, расскажите нам, пожалуйста, как мы должны проголосовать. Для тех, кто ещё не проголосовал.

Ученый секретарь

Дорогие коллеги, так как заседание у нас проводится в комбинированном, очно-дистанционном режиме, голосование проводится с использованием телекоммуникационных систем на сайте института. Таким образом, прошу всех присутствующих членов диссертационного совета войти под своим логином и паролем на сайт ОИВТ РАН. Можно с мобильного телефона или использовать компьютер в центре зала и проголосовать.

(Проводится процедура тайного голосования).

Председатель

Давайте мы завершим защиту. Алексей Владимирович, пожалуйста, ознакомьте нас с результатами голосования, которые мы потом должны утвердить.

Ученый секретарь

Дорогие коллеги, голосование закончено. В текущем заседании у нас учувствуют 22 члена диссертационного совета, 12 участвую очно, 10 — дистанционно, по профилю диссертации учувствуют 9 членов диссертационного совета из них 6 учувствуют очно. Голосование закончено, получено 22 голоса, все голоса за, 0 против, 0 воздержались.

Председатель

Давайте утвердим, если нет возражений. Кто за? Есть ли против или воздержавшиеся? И мы должны ознакомится дистанционно. Товарищи, кто у нас дистанционно учувствует, если есть против кто-нибудь или воздержавшиеся, пожалуйста, ознакомьте нас со своим мнением. Мы ждём. Нет возражений утвердить? Похоже, что нет. Тогда спасибо.

(Результаты голосования приняты единогласно).

Председатель

Дмитрий Евгеньевич, мы Вас поздравляем! Таким образом мы должны согласовать проект заключения.

(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения).

Уважаемы коллеги, если больше сейчас замечаний нет, то я прошу, с учётом сделанных замечаний утвердить проект нашего заключения.

Кто за? Против или воздержавшиеся? Пожалуйста, голосующие дистанционно, если есть какие-то замечания, предложения, пожалуйста дайте знать. Судя по полному молчанию, будем считать, что проект нашего заключения принят. Всем спасибо, на этом защита диссертации закончена.

(Проект заключения принят единогласно).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
24.1.193.01 (Д 002.110.02), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 14.12.2022 г. № 31

О присуждении Хазову Дмитрию Евгеньевичу, гражданину Российской Федерации учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Численное моделирование процессов энергоразделения в потоках сжимаемого газа» по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 03.10.2022 г., (протокол заседания № 20) диссертационным советом 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, iht.ru), утверждённого Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 86/нк от 26.01.2022г.

Соискатель Хазов Дмитрий Евгеньевич 1980 года рождения, в 2003 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Работает в должности ведущего инженера лаборатории гиперзвуковой аэродинамики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова).

В 2006 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Диссертация выполнена в лаборатории гиперзвуковой аэродинамики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова).

Научный руководитель доктор технических наук, профессор, академик, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова) Леонтьев Александр Иванович.

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, профессор, профессор высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Федерального государственного автономного

образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого» Смирнов Евгений Михайлович;
- доктор технических наук, профессор, начальник отдела специальных авиационных двигателей и химмотологии, Государственного научного центра, федерального автономного учреждения «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» Яновский Леонид Самойлович
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск) в своём положительном заключении, составленном учёным секретарём к.ф.-м.н. Макаровым М.С. и главным научным сотрудником лаборатории термогазодинамики д.т.н., профессором Тереховым В.И. указала, что среди наиболее значимых научных результатов, развивающих фундаментальные представления о процессах энергоразделения в сжимаемых потоках можно выделить следующие:

1. Построены математические модели устройств газодинамического энергоразделения (трубы Леонтьева и трубы с проницаемой стенкой) в одномерной и двумерной постановке, проведена тщательная валидация моделей.
2. Численное моделирование позволило определить влияние массового расхода в дозвуковом канале трубы Леонтьева на величину энергоразделения при различных схемах течения. Показано наличие максимума охлаждения при малых расходах для противопоточной схемы организации течения.
3. Показано, что для повышения эффективности энергоразделения следует использовать сверхзвуковой канал постоянного числа Маха.
4. Показано, что отвод тепла от нагреваемого сверхзвукового потока не позволяет значительно повысить давление торможения, что делает бесперспективным такой подход к повышению эффективности энергоразделения в рассматриваемых устройствах.
5. На базе одномерной модели устройства испарительного охлаждения (аэротермопрессора) показано, что при впрыске капель воды в высокоскоростной и высокотемпературный поток газа возможно достичь степени повышения давления торможения 1.25 при скорости впрыскиваемых капель равной скорости основного потока, что дает основание для использования данного метода повышения эффективности высокотемпературных устройств энергоразделения.
6. Предложено оригинальное устройство энергоразделения с проницаемой стенкой. Проанализировано влияние числа Маха на входе в устройство, а также числа Прандтля газа. Показано, что энергоразделение в трубе с проницаемой стенкой увеличивается при увеличении числа Маха и уменьшении числа Прандтля теплоносителя. Наибольшие значения коэффициента температурной эффективности и адиабатного КПД для трубы с проницаемой стенкой и трубы Леонтьева сопоставимы по величине.
7. Показана возможность перехода от сверхзвукового потока к дозвуковому без скачка уплотнения за счёт отсоса газа через стенку трубы.

Полученные данные и разработанные модели могут быть использованы в инженерных расчётах устройств, основанных на эффекте газодинамического энергоразделения, при проектировании теплообменного оборудования. Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, а также в организациях, разрабатывающих энергетическое оборудование, в частности, в Объединённом институте высоких температур РАН, в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого, в МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), в Национальном исследовательском университете «МЭИ».

Соискатель имеет 24 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 24 работы, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 5 работ, 19 тезисов докладов и материалов конференций:

1. *Хазов Д. Е.* К вопросу об эффекте повышения полного давления // Огнеупоры и техническая керамика. 2006. № 11. С. 39–43.
2. *Хазов Д. Е.* Численное исследование безмашинного энергоразделения воздушного потока // Тепловые процессы в технике. 2018. Т. 10, № 1-2. С. 25–36.
3. *Khazov D. E.* On the question of gas-dynamic temperature stratification device optimization // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 891, no. 1. P. 012078.
4. *Khazov Dmitry.* Nonmachine energy separation in channel with permeable walls // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1129, no. 1. P. 012018.
5. *Khazov D.E., Leontiev A.I., Zditovets A.G. et al.* Energy separation in a channel with permeable wall // Energy. 2022. Vol. 239. P. 122427.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет)** (зам. заведующего кафедрой теплотехники и тепловых двигателей Самарского университета д.т.н., профессор Бирюк В.В.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- В работе не представлена оценка влияния расходов по дозвуковому каналу в сравнении со сверхзвуковым.
- Представляет сомнение некоторое несоответствие потерь давления в дозвуковом и сверхзвуковом потоке (стр.9 автореферата).

2. **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»** (зав. научно-исследовательской лабораторией моделирования процессов конвективного теплопереноса, д.ф.-м.н. Кузнецов Г.В.) - отзыв положительный, без замечаний.

3. **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»** (профессор кафедры инженерной теплофизики имени В.А. Кириллина д.т.н., с.н.с. Яньков Г.Г.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- Полезно было бы представить расчётные области, соответствующие схемам на рис.1, 6 и сформулировать краевые условия для искомым переменных. В частности – «выходные» краевые условия, а также «специальное граничное условие», упомянутое на с.10 автореферата.
- Неясно, на базе какой модели шаровой засыпки рассчитывались вязкостный и инерционный коэффициенты для определения градиента давления в пористой стенке. Как эти коэффициенты соотносятся с коэффициентами в формуле Эргуна?
- Не поясняется причина пульсаций на профилях, представленных на рис.7, при малых x/d .
- На с.9 вскользь упоминается об анализе различных способов охлаждения потока для повышения давления торможения. Какие способы анализировались, кроме капельного охлаждения, не сообщается. Что же касается капельного охлаждения, то какая-либо информация об используемой модели (за исключением того, что она одномерная) в автореферате отсутствует.

- На рис. 12 безразмерные профили представлены вплоть до $y^+ = 10-2$. Что вызвало необходимость использования столь плотной сетки? Обычно ограничиваются координатой ближайшего к стенке узла, соответствующей $y^+ \sim 10-1$.

4. **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации»** (зав. лабораторией фундаментальных исследований д.ф.-м.н., профессор Исаев С.А.) - отзыв положительный, с замечаниями:

- Недостаточно раскрыт бекграунд диссертации. Не упомянуты предшественники.
- Не понятно, возникают ли скачки уплотнения в рассматриваемых схемах.
- Как физически объяснить наблюдаемое на рис.2 резкое увеличение температуры наружной стенки в эксперименте и при использовании двумерной модели? Почему относительная длина ограничена 125? Можно ли ее увеличить?
- Как влияет на процессы разделения турбулентность?
- Каковы подробности постановки граничных условий на проницаемой стенке со вдувом-отсосом? Применяются ли пристеночные функции, учитывающие вдув-отсос?

5. **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»** (профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Инженерной школы энергетики, д.ф.-м.н., доцент Шеремет М.А.) - отзыв положительный, с замечаниями:

- Принимая во внимание вычислительную ориентацию диссертационного исследования, в автореферате стоило представить используемые одномерную и двумерную математические модели. Более того, в третьей главе соискатель отмечает разработку специального граничного условия, позволяющего учитывать взаимодействие между основным потоком и проницаемой стенкой при наличии вдува/отсоса. При этом математическая формулировка этого граничного условия также отсутствует в автореферате. Справедливости ради стоит отметить, что текст диссертации содержит описание рассматриваемых моделей.
- Следовало более подробно изложить детали используемых вычислительных технологий как при реализации двумерной модели (размерность разностной сетки, величины шагов по времени и по пространству), так и при получении решения на основе одномерного приближения.
- При проведении численных расчетов на основе двумерного приближения использовались модели турбулентности семейств $k-\epsilon$ и $k-\omega$. В результате соискатель отмечает, что наилучшее совпадение с экспериментом демонстрирует стандартная $k-\epsilon$ модель. Следовало более подробно описать использование конкретных моделей с учетом специфики граничных условий.

6. **Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша»** (главный научный сотрудник отделения твердотопливных ракетных двигателей, д.ф.-м.н., профессор Черкасов С. Г.) - отзыв положительный, с замечанием:

- Хотя диссертация имеет расчетно-теоретический характер, автореферат не содержит ни одной формулы. В частности, физико-математические модели, положенные в основу расчетов, описаны в автореферате исключительно словесно.

7. **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»** (И.о. директора института «Авиационные технологии и инженерная физика», д.т.н. Гурьянов А. И.) - отзыв положительный, с замечанием:

- Неясно, почему автор не использовал 3D численные модели.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- д.ф.-м.н., профессор Смирнов Е.М. является известным ученым в области динамики вязкой жидкости и конвективного теплообмена, а также крупным специалистом по численному моделированию процессов тепло- и массопереноса.

1. Колесник Е.В., Смирнов Е.М. Численное исследование вихревых структур и теплообмена при сверхзвуковом обтекании области сопряжения затупленного тела и пластины // Журнал технической физики. 2020. Т. 90, № 2. С. 185–192. DOI 10.21883/JTF.2020.02.48807.263-19;

2. Колесник Е.В., Смирновский А.А., Смирнов Е.М. Двойственность вихревой структуры, возникающей при сверхзвуковом обтекании области сопряжения затупленного тела и пластины вязким газом // Письма в Журнал технической физики. 2020. Т. 46, № 12. С. 10–13. DOI 10.21883/PJTF.2020.12.49519.18275;

3. Smirnov E., Panov D., Ris V. et al. Towards DES in CFD-based optimization: The case of a sharp U-bend with/without rotation. // J. Mech. Sci. Technol. 2020. Vol. 34, P. 1557–1566. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0318-x>.

- д.т.н., профессор Яновский Леонид Самойлович является признанным специалистом в области теплофизики и химмотологии энергоносителей авиационного назначения.

1. Картовицкий Л.Л., Левин В.М., Яновский Л.С. Анализ газодинамического сжатия на основе модифицированной модели псевдоскачка Крокко // Труды МАИ. 2020. №113. DOI: 10.34759/trd-2020-113-05;

2. Размыслов А.В., Султанов В.Г., Яновский Л.С. Закономерности газификации структурированного заряда твердого горючего в низкотемпературном газогенераторе // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12, №2. С. 50–57. DOI: 10.34759/tpt-2020-12-2-50-57;

3. Volokhov V., Martynenko S., Toktaliev P., Yanovskiy, L., Varlamov, D., Volokhov, A. The High-Performance Parallel Algorithms for the Numerical Solution of Boundary Value Problems. In: Sokolinsky, L., Zymbler, M. (eds) Parallel Computational Technologies. PCT 2017. Communications in Computer and Information Science. 2017. Vol. 753. Springer. Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67035-5_12.

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук является одним из ведущих научных учреждений в России, занимающимися исследованиями теплообмена и газодинамики в до- и сверхзвуковых потоках, в том числе вопросами безмашинного энергоразделения потоков.

1. Sakhnov A.Yu. Local laminarization at negligible light gas injection into the compressible weakly accelerated boundary layer. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 182. P. 121975. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121975>;

2. Makarov M. S., Makarova S. N. Entropy change in a single Leontiev tube during energy separation of low-Prandtl gas mixture. 2021. Vol. 2057, no. 1. P. 012029. DOI:10.1088/1742-6596/2057/1/012029;

3. Salomatov V. V., Salomatov V. V. Computational Modeling of Turbulent Flows. Journal of Engineering Thermophysics. 2020. Vol. 29, no. 1, P. 156–169. <https://doi.org/10.1134/S1810232820010117>.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– обнаружен максимум охлаждения при малых расходах в дозвуковом канале устройства газодинамического энергоразделения при противопоточной схеме организации течения;

– показано, что для повышения энергоразделения следует применять сверхзвуковой канал, реализующий постоянное по длине число Маха;

– на базе одномерной модели устройства испарительного охлаждения показано, что при впрыске капель воды в высокоскоростной высокотемпературный поток газа возможно достичь повышения давления торможения;

– обнаружено наличие экстремума температур торможения для охлаждаемого и нагреваемого потоков в зависимости от начального давления торможения в устройстве с проницаемой стенкой;

– показана, проанализирована и теоретически обоснована возможность бескачкового торможения сверхзвукового потока в канале постоянного сечения при наличии трения и отсоса газа через стенки канала;

– показано влияние уровня отсоса на распределение температуры торможения в пограничном слое: величина максимума температуры торможения существенно увеличивается по сравнению с непроницаемой стенкой и смещается по направлению к стенке с увеличением уровня отсоса.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– разработаны математические модели двух устройств энергоразделения, проведена тщательная валидация моделей на доступных экспериментальных данных;

– проведено параметрическое исследование энергоразделения в широком диапазоне изменения входных параметров.

Значение полученных соискателем результатов **исследования для практики подтверждается** тем, что:

– разработанные модели могут быть использованы для проведения проектно-исследовательских работ по созданию высокоэффективных газодинамических устройств энергоразделения для различных практических целей;

Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, а также в организациях, разрабатывающих энергетическое оборудование, в частности, в ФГБУН ОИВТ РАН, ФГАОУ ВО «СПбПУ», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», ПАО «РКК «Энергия», ГНЦ ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» и др.

Оценка достоверности результатов подтверждается сопоставлением данных моделирования с доступными экспериментальными данными других авторов. Результаты, полученные по одномерной и двумерной моделям, удовлетворительно согласуются между собой.

Личный вклад соискателя состоит в разработке общей концепции и методики проведения численных исследований. Автором разработан способ моделирования, позволяющий учитывать взаимодействие между потоком и проницаемой стенкой при наличии вдува/отсоса. Автором предложено использовать испарительное охлаждение для повышения давления торможения в сверхзвуковом канале устройства газодинамического энергоразделения. Автором проведены численные исследования течений в устройстве газодинамического энергоразделения и канале с проницаемыми стенками. Автором получены результаты влияния основных факторов на величину энергоразделения.

Апробация результатов исследования проводилась на многих ведущих российских и международных конференциях и симпозиумах начиная с 2007 года и по настоящее

время. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены при определяющем участии автора.

На заседании от 14.12.2022 г. диссертационный совет принял решение присудить Хазову Дмитрию Евгеньевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 22 человек, из них очно: 4 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 6 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, дистанционно: 6 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 3 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 22, против 0, недействительных бюллетеней - 0.

Зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)
д.ф.-м.н., профессор

Андреев Н.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)
к.ф.-м.н.

Тимофеев А.В.
14.12.2022 г.

