

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, jiht.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 значимо 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 искомых

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  $k-\varepsilon$  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.

**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](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.