



На правах рукописи

Хазов Дмитрий Евгеньевич

**Численное моделирование процессов энергоразделения
в потоках сжимаемого газа**

Специальность 1.3.14 —
«Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении 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, академик РАН, профессор, НИИ механики МГУ, главный научный сотрудник
Леонтьев Александр Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «СПбПУ», профессор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики
Смирнов Евгений Михайлович
доктор технических наук, профессор, ФАУ «ЦИАМ им. П. И. Баранова», начальник отдела специальных авиационных двигателей и химмотологии
Яновский Леонид Самойлович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

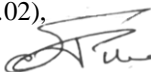
Защита состоится 6 апреля 2022 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединённый институт высоких температур Российской академии наук по адресу: 125412, Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН и на сайте https://www.jiht.ru/science/dissert-council/diss_texts/.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 125412, Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2, учёному секретарю диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02).

Автореферат разослан февраля 2022 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.1.193.01 (Д 002.110.02),
к-т физ.-мат. наук

 Тимофеев Алексей Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Энергоразделение — возникновение в газовом потоке «горячих» и «холодных» областей без подвода/отвода энергии извне. На сегодняшний день известен ряд эффектов энергоразделения. К ним относятся вихревой эффект (Ранка-Хилша), волновые процессы, резонансная накачка, эжекционные методы, энергоразделение в пограничном слое сжимаемого газа. Интерес к такого рода эффектам связан с простотой их реализации и широкими возможностями применения. Так, например, вихревой эффект используется в системах кондиционирования воздуха летательных аппаратов, в холодильных установках, для осушки газов и т.д.

Газодинамический метод энергоразделения в сверхзвуковом потоке впервые был предложен А. И. Леонтьевым. В основе метода лежит эффект энергоразделения в пограничном слое сжимаемого газа: отличие температуры теплоизолированной стенки от температуры торможения газа.

При течении высокоскоростного газового потока в канале, температура стенки канала, вследствие вязкой диссипации и конвективного переноса энергии, может существенно отличаться от температуры адиабатически заторможенного газа. Разница будет тем больше, чем больше число Маха набегающего потока. Мерой отклонения температуры теплоизолированной стенки от температуры торможения газа служит коэффициент восстановления температуры, который существенно зависит от молекулярного числа Прандтля Pr и принимает значения больше или меньше единицы в зависимости от того, больше или меньше единицы Pr .

Если между двумя газовыми потоками, истекающими из общего резервуара, но имеющими разные (дозвуковую и сверхзвуковую) скорости и $Pr \ll 1$, поместить твёрдую стенку, то через неё будет происходить обмен теплом: нагревание одной части газа за счёт охлаждения другой. Описанный физический механизм и положен в основу метода и устройства энергоразделения газового потока, предложенных А. И. Леонтьевым. Так как в процессе работы такого устройства газ не совершает техническую работу и не участвует в теплообмене с окружающей средой, то подобное энергоразделение является безмашинным, а само устройство — устройством безмашинного энергоразделения.

Другим способом использования отличия температуры теплоизолированной стенки от температуры торможения газа является применение проницаемых поверхностей. Если сверхзвуковой поток газа направить в канал с проницаемыми стенками, то при определённом запасе давления пристеночные слои газа с температурой близкой к температуре теплоизолированной стенки будут удалены из потока и среднemasсовая температура торможения на выходе из такого канала будет отличаться от начальной.

На текущий момент проведён ряд численных и экспериментальных исследований, доказывающих работоспособность газодинамического метода

энергоразделения. Однако несмотря на существующие исследования теории газодинамического метода энергоразделения далека от завершения.

Целью данной работы является исследование влияния основных параметров на величину энергоразделения в сжимаемом потоке газа; разработка рекомендаций по выбору оптимальных режимов работы при течении в устройстве газодинамического энергоразделения и канале с проницаемыми стенками.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать методики численного моделирования течений в устройстве газодинамического энергоразделения и канале с проницаемыми стенками.
2. Провести валидацию разработанных методик на доступных экспериментальных данных.
3. Провести численное исследование течений в устройстве газодинамического энергоразделения и канале с проницаемыми стенками и определить влияние следующих факторов:
 - а) режимных параметров;
 - б) вида рабочего тела;
 - в) схемы организации течения;
 - г) закона изменения площади поперечного сечения сверхзвукового канала.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Для устройства газодинамического энергоразделения определено влияние массового расхода (m_1) в канале с дозвуковой скоростью на величину энергоразделения. Показано наличие максимума охлаждения при малых расходах при противопоточной схеме организации течения.
2. Показано влияние схемы течения на величину энергоразделения:
 - а) при разгоне потока в канале со сверхзвуковой скоростью:
 - для $m_1 \{ m_2 \quad 0.2$ (m_2 — массовый расход в канале со сверхзвуковой скоростью) прямоточная схема течения демонстрирует преимущество в охлаждении дозвукового потока ($\Delta T_c \quad 21$ °С при $m_1 \quad m_2 \quad 0.01$) до 15 % по сравнению с противоточной схемой течения ($\Delta T_c \quad 18$ °С)
 - для $m_1 \{ m_2 \quad 0.2$ схема течения не влияет на величину энергоразделения
 - б) при течении в канале, реализующем постоянное число Маха схема течения не влияет на величину энергоразделения в диапазоне рассмотренных параметров.
3. Даны рекомендации по выбору оптимальной проточной части устройства газодинамического энергоразделения. Вне зависимости от основного назначения устройства, рекомендуется использовать канал, реализующий постоянное число Маха. Уровень значений чисел Маха

и соотношение расходов через до- и сверхзвуковой каналы будет определять количество переданного тепла и меру нагрева/охлаждения потоков.

4. Проведён анализ влияния отвода тепла на изменение давления торможения в высокоскоростном потоке. Рассмотрены различные способы охлаждения потока и возможность их использования для повышения давления торможения. На базе одномерной модели устройства испарительного охлаждения (аэротермопрессора) показано, что при впрыске капель воды в высокоскоростной (начальное число Маха $M_0 = 1.5$) высокотемпературный ($T_0 = 727$ °C) поток газа возможно достичь степени повышения давления торможения 1.25 при скорости впрыскиваемых капель равной скорости основного потока.
5. Показано наличие экстремума температур для охлаждаемого и нагретого потоков в зависимости от начального давления торможения при течении в канале с проницаемыми стенками (для канала с заданной геометрией и пористостью).
6. Показано, что эффект энергоразделения в канале с проницаемыми стенками зависит от начального числа Маха, начального давления торможения и числа Прандтля. При изменении начального числа Маха с $M_{is} = 1$ на $M_{is} = 3$ охлаждение воздушного потока увеличивается с $|\Delta T_c| = 5$ °C до $|\Delta T_c| = 15$ °C. При изменении числа Прандтля с $Pr = 0.7$ на $Pr = 0.2$, охлаждение потока увеличивается более чем в два раза с $|\Delta T_c| = 20$ °C до $|\Delta T_c| = 45$ °C.
7. Показана, проанализирована и теоретически обоснована возможность бескачкового торможения сверхзвукового потока в канале постоянного сечения при отсосе газа через стенки канала.
8. 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.

Практическая значимость. Результаты проведённых исследований представлены в виде наглядных зависимостей. Полученные данные и разработанные модели могут быть использованы в инженерных расчётах устройств, основанных на эффекте газодинамического энергоразделения, при проектировании теплообменного оборудования. Представленный алгоритм численного исследования и разработанные методики зарекомендовали себя как надёжный метод исследования данного круга задач, в большей части, заменяющий и/или дополняющий дорогостоящие экспериментальные исследования.

Методология и методы исследования. В работе использованы апробированные аналитические и численные методы исследования. Решения поставленных задач базируются на теоретических положениях и балансовых соотношениях законов сохранения массы, количества движения и энергии, а также на использовании экспериментальных результатов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты численного исследования процессов газодинамики и теплообмена в устройстве газодинамического энергоразделения.
2. Возможность бескачкового торможения сверхзвукового потока при течении в канале постоянного сечения при наличии трения и отсоса.
3. Результаты численного исследования процессов газодинамики и теплообмена при течении в канале с проницаемыми стенками.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современных методов математического моделирования, а также подтверждается использованием процедур верификации и валидации. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2017), XXIII и XXIV Международных конференциях «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность Не-За-Те-Ги-Ус» (Звенигород, 2018, 2020); VII Российской национальной конференции по теплообмену РНКТ (Москва, 2018); XII Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019); XIV, XIX, XX, XXI и XXII школах-семинарах под руководством академика Леонтьева А.И. (Санкт-Петербург, 2007; Орехово-Зуево, 2013; Звенигород, 2015; Санкт-Петербург, 2017; Москва, 2019); Всероссийских конференциях молодых учёных-механиков (Сочи, 2017, 2018); «Ломоносовские чтения» МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, 2017–2021); 5th International Workshop on Heat/Mass Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control (Новосибирск, 2019); V Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Крым, Ялта, 2020); Двадцать первой международной школе-семинаре «Модели и методы аэродинамики» (Крым, Евпатория, 2021).

Личный вклад. Диссертационная работа выполнена в лаборатории гиперзвуковой аэродинамики НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова. Автор принимал участие 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.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 24 печатных изданиях, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 3 в журналах, индексируемых в Scopus, 19 — в тезисах докладов.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава носит обзорный характер. Вводится понятие безмашинного энергоразделения как процесса самопроизвольного перераспределения энергии (температуры) потока газа. На основе анализа уравнения сохранения полной энергии (энтальпии торможения) газового потока выявлены основные физические механизмы влияющие на перераспределение энтальпии торможения. Вводятся количественные характеристики процесса энергоразделения как разности между среднemasсовыми температурами торможения газового потока на «горячем» ($\Delta T_{h, T_h, T_o}$) и «холодном» ($\Delta T_{c, T_c, T_o}$) выходах и на входе устройства. Рассмотрены наиболее распространённые методы энергоразделения и устройства их реализации: вихревая труба Ранка-Хилша и резонансная труба Гартмана-Шпренгера. Основное внимание уделено энергоразделению в пограничном слое. Рассмотрены два устройства для реализации данного вида энергоразделения: устройство, работающее по методу А. И. Леонтьева (устройство газодинамического энергоразделения) и канал с пористой (проницаемой) стенкой. Проведён обзор работ по исследованию описанных выше устройств.

Во второй главе исследуется устройство газодинамического энергоразделения, работающее по методу А. И. Леонтьева. На основе одномерной модели Вигдоровича-Леонтьева проведены предельные оценки энергоразделения в теплообменном аппарате, состоящем из двух соосно расположенных осесимметричных каналов. Во внутренний канал газ поступает со сверхзвуковой, а во внешний кольцевой — с дозвуковой скоростью.

Для детального исследования процессов, протекающих в устройстве газодинамического энергоразделения (см. рис. 1), разработаны одномерная и двумерная (осесимметричная) математические модели. Одномерная модель основана на известном методе Шапиро-Хоторна: дифференциал каждой из рассматриваемых величин (скорости, давления, температуры и т.д.) выражается через линейную комбинацию независимых элементарных факторов воздействия (таких, как трение, изменение площади поперечного сечения, подвод тепла и т.д.); коэффициенты этих линейных комбинаций, называемые «коэффициентами влияния», выражаются в виде функций одной переменной (числа Маха). Основная система уравнения была дополнена замыкающими соотношениями для расчёта коэффициентов трения и теплоотдачи. Для учёта сжимаемости использовались предельная асимптотическая теория турбулентного пограничного слоя Кутателадзе-Леонтьева.

Двумерная модель основана на уравнениях Навье-Стокса осреднённых по Рейнольдсу (RANS), уравнении энергии (как для жидкости, так и

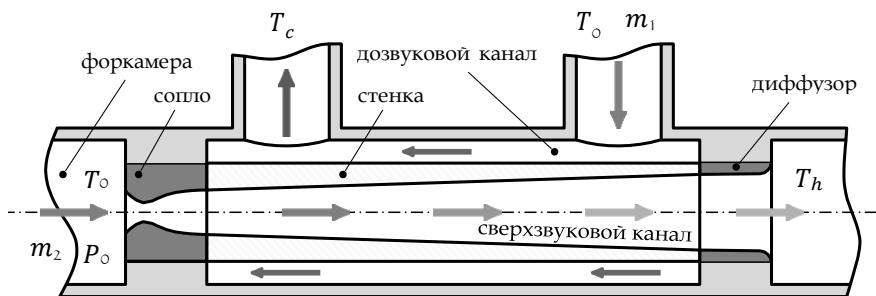


Рис. 1 — Схема устройства газодинамического энергоразделения.

для твёрдого тела) и уравнениях соответствующей модели турбулентности. Дискретизация уравнений проводилась на основе метода контрольного объёма при использовании противопоточных схем второго порядка. Для замыкания основной системы уравнений использовались двухпараметрические дифференциальные модели турбулентности семейств $k-\epsilon$ и $k-\omega$. Кроме того, для уравнения энергии турбулентное число Прандтля задавалось как постоянное значение, так и на основе аналитической модели Кейса-Кроуфорда. Для моделирования использовался коммерческий пакет ANSYS Fluent. Дополнительные модели, например, модель Кейса-Кроуфорда были реализованы в виде функций определяемых пользователем на языке C.

На основе имеющихся экспериментальных данных¹ была проведена валидация моделей. Рассмотренные устройства состояли из двух коаксиальных каналов (см. рис. 1): внешнего (дозвукового) и внутреннего (сверхзвукового). Внутренний канал образован сверхзвуковым соплом, внутренней конической или коническо-цилиндрической поверхностью (входной диаметр конического участка d_{h0} 6 мм, выходной d 20 мм; в случае коническо-цилиндрической канала d 14 мм, длина конического участка 400 мм) теплопроводной стенки (рабочим участком) и диффузором. Наружный канал представляет собой кольцевой канал постоянного поперечного сечения (d_{in} 29 мм; d_{out} 32 мм). Каналы разделены между собой теплопроводной стенкой, изготовленной из латуни (λ 234 Вт/(мК)). Общая длина рабочего участка составляет L_0 700 мм.

Сравнительный анализ показал, что наилучшие совпадение с экспериментом демонстрирует стандартная $k-\omega$ модель турбулентности (модель Вилкокса) с моделью Кейса-Кроуфорда при Pr_{t8} 0.82. На рис. 2 приведено сравнение экспериментального и расчётного распределений статического давления (а) и температуры наружной стенки (б) по длине конического сверхзвукового канала для случая $M_{2,is}$ 1.8; P_0 13.90 атм; T_0 25 °C при использовании указанной выше модели.

¹Здитовец А. Г., Виноградов Ю. А., Стронгин М. М. Экспериментальное исследование безмашинного энергоразделения воздушных потоков в трубе Леонтьева // Тепловые процессы в технике. — 2015. — № 9. — с. 397-404.

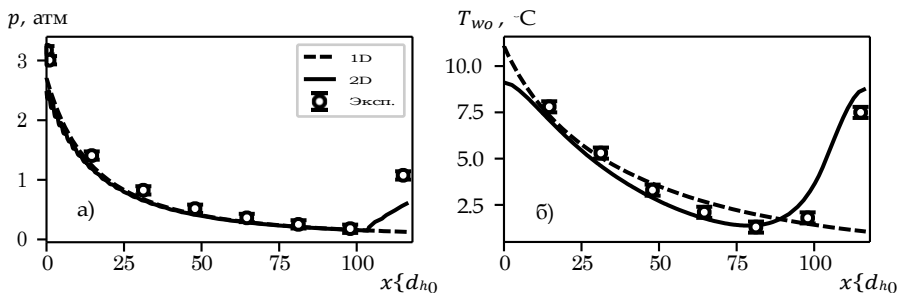


Рис. 2 — Распределение статического давления (а) и температуры наружной стенки (б) по длине конического сверхзвукового канала. $M_{2.is} = 1.8$; $P_0 = 13.90$ атм; $T_0 = 25$ °С.

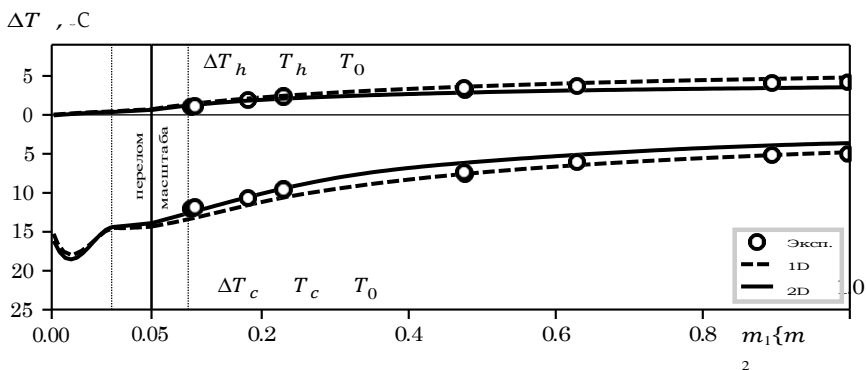


Рис. 3 — Нагрев сверхзвукового и охлаждение дозвукового потоков при противоточной схеме организации течения в зависимости от соотношения расходов. $M_{2.is} = 1.8$; $P_0 = 13.90$ атм; $T_0 = 25$ °С.

Для оценки интегрального эффекта энергоразделения были использованы разности температур торможения на входе и выходе для каждого из каналов. Результаты расчётов в сравнении с экспериментальными данными приведены на рис. 3. Нагрев сверхзвукового потока и охлаждение дозвукового представлены в зависимости от соотношения массовых расходов в дозвуковом (m_1) и сверхзвуковом каналах (m_2). Вертикальными штриховыми линиями показаны границы критических чисел Рейнольдса для дозвукового канала.

Использование численного моделирования позволило определить поведение кривой охлаждения дозвукового потока при соотношениях расходов близких к нулю: обнаружен минимум охлаждения при $m_1/m_2 = 0.01$. Это объясняется тем, что при противоточной схеме течения и при малых значениях массового расхода в дозвуковом канале температура торможения дозвукового потока довольно быстро достигает уровня адиабатной температуры сверхзвукового потока, а далее начинает расти в соответствии с изменением адиабатной температуры сверхзвукового потока. Т.е. тепловой

поток в стенку со стороны дозвукового канала q_{w1} на некоторой длине обращается в нуль, а далее, вниз по течению дозвукового потока меняет знак и становится положительным. При дальнейшем увеличении расхода существует такое значение $m_1 \{ m_2$ (в данном случае 0.01) при котором тепловой поток становится максимальным, далее с ростом $m_1 \{ m_2$ тепловой поток падает и после этого всюду сохраняют свой знак $q_{w1} \{ 0$.

Как видно из представленных выше данных обе модели (1D и 2D) демонстрируют хорошее согласование с экспериментом. Таким образом, разработанные математические модели адекватно описывают физические процессы, происходящие внутри устройства и могут быть использованы для дальнейших исследований.

При проведении параметрических исследований выявлено влияние начальной температуры на величину энергоразделения: увеличение T приводит к росту абсолютных величин ΔT_h и ΔT_c . При этом рост охлаждения ΔT_c оказывается больше, чем рост нагрева ΔT_h . Особенно это проявляется при уменьшении расхода через дозвуковой канал m_1 . Рассмотрено влияние вида рабочего тела на величины энергоразделения. При переходе от воздуха ($Pr = 0.71$) на водородо-ксеноновую смесь ($Pr = 0.18$) охлаждение дозвукового потока увеличивается почти в два раза: с 20 до 40 °С.

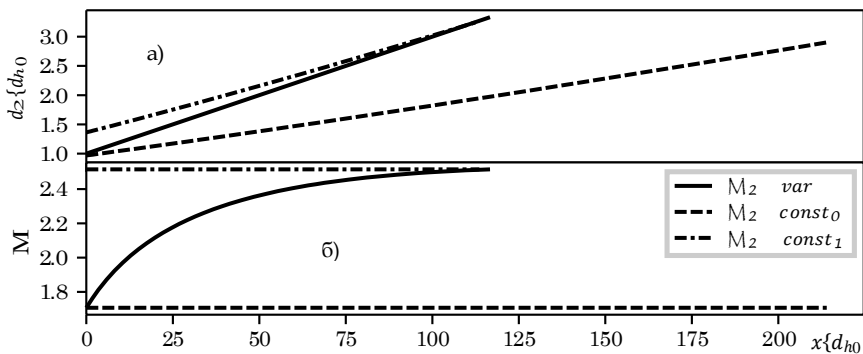


Рис. 4 — Изменения диаметра (а) и числа Маха (б) по длине сверхзвукового канала при различных законах изменения площади.
 $P = 13.90$ атм; $T = 25$ °С; $m_2 = 0.0647$ кг/с

Также определены оптимальные профили сверхзвукового канала при условии фиксированного давления торможения на входе и массового расхода воздуха через сверхзвуковой канал. Рассмотрены три канала (см. рис. 4): исходный канал с изменяющимся (возрастающим) числом Маха по длине $M_2 \text{ var}$; канал с постоянным числом Маха, равным начальному числу Маха для исходного канала $M_2 \text{ const}_0$; канал с постоянным числом Маха, равным конечному числу Маха для исходного канала $M_2 \text{ const}_1$. Длина канала определялась из условия физической реализации течения. Принимая во внимание тот факт, что сверхзвуковое

истечение будет происходить в атмосферу, предполагалось, что в выходном диффузоре реализуется прямой скачок уплотнения, после которого давление достигает уровня атмосферного, т.е. длина канала будет определяться из условия реализации прямого скачка в выходном сечении. Показано (см. рис. 5), что для области $m_1\{m_2 \approx 0.2$ и преимущественно для охлаждения дозвукового потока рекомендуется использовать канал с постоянным «большим» числом Маха $M_2 = const_1$. Для области $m_1\{m_2 \leq 0.2$ как для нагрева сверхзвукового, так и для охлаждения дозвукового потоков рекомендуется использовать канал с постоянным «невысоким» числом Маха $M_2 = const_0$.

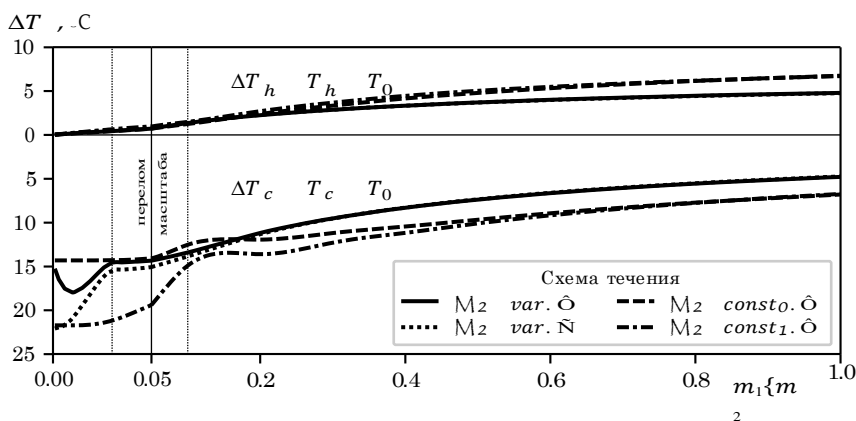


Рис. 5 — Влияние схемы течения и профиля сверхзвукового канала на величину температурного разделения.
 $M_{2, is} = 1.8$; $P = 13.90$ атм; $T = 25$ С.

Кроме того рассмотрено влияние схемы организации течения (см. рис. 5). Схема течения оказывает существенное влияние при малых расходах по дозвуковому каналу $m_1\{m_2 \approx 0.1$. В этом случае прямоточная схема, при условии разгона потока в сверхзвуковом канале, является предпочтительной, так как она позволяет получить максимальное охлаждение дозвукового потока.

Одним из достоинств устройства газодинамического энергоразделения являются малые потери давления торможения в дозвуковом канале. Однако для сверхзвукового канала величина потерь давления торможения оказывается весьма существенной (до 80%). В связи с этим рассмотрена возможность использования охлаждения потока для повышения давления торможения в сверхзвуковом канале устройства газодинамического энергоразделения. Проведён анализ влияния отвода тепла на изменение давления торможения в высокоскоростном потоке. Рассмотрены различные способы охлаждения потока и возможность их использования для повышения давления торможения. На базе одномерной модели аэротермопрессора

(устройство для повышения давления торможения за счёт испарительного

охлаждения потока) показано, что возможно достичь степени повышения давления торможения 1.25 при начальном числе Маха M_0 1.5 и скорости капле равной скорости основного потока.

Третья глава посвящена исследованию процессов трения и теплообмена при течении в канале с проницаемой стенкой (см. рис. 6). Разработанные ранее модели были адаптированы для анализа течений в проницаемых границах. В случае одномерной модели было учтено расходное воздействие, а также, при использовании асимптотической теории турбулентного пограничного слоя Кутателадзе-Леонтьева, учтено влияние процессов вдува/отсоса на коэффициенты трения и восстановления температуры. Для двумерной модели было разработано специальное граничное условие (реализовано в виде функций определяемых пользователем на языке C), позволяющее учитывать взаимодействие между основным потоком и проницаемой стенкой при наличии вдува/отсоса. Разработанный подход был тщательно валидирован на широком круге задач.

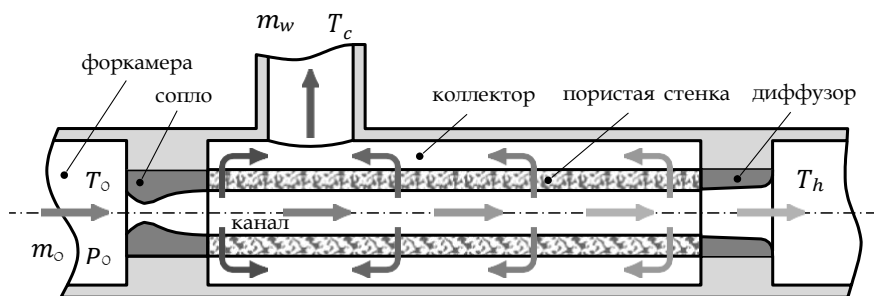


Рис. 6 — Схема устройства энергоразделения с проницаемой стенкой.

По аналогии с устройством газодинамического энергоразделения, была проведена валидация разработанных моделей на доступных экспериментальных данных². Моделировалось устройство энергоразделения, состоящее из сверхзвукового профилированного сопла (M_{is} 1.4, d_{cr} 3.2 мм) и пористой (проницаемой) цилиндрической трубки (см. рис. 6). Пористая трубка была изготовлена из спечённого электрокорунда (λ 40 Вт/мК, открытая пористость 37–38 %, диаметр пор 60–65 мкм, ρ 2210 кг/м³. Длина трубки составляла L 150 мм, внутренний диаметр — d_h 3.5 мм, наружный — d_{out} 10.5 мм. Массовая скорость через пористую стенку определялась при помощи уравнения Дарси-Форхгеймера. Вязкостный и инерционный коэффициенты рассчитывались на базе модели шаровой засыпки. Значения пористости ϵ 34 % и диаметра сферических частиц d_p 70 мкм определялись исходя из обработки имеющихся данных эксперимента. Давление окружающей среды было равно p_{amb} 1 атм.

² Experimental investigation of energy (temperature) separation of a high-velocity air flow in a cylindrical channel with a permeable wall / A. I. Leontiev, A. G. Zditovets, N. A. Kiselev et al. // Experimental Thermal and Fluid Science. — 2019. — Vol. 105. — Pp. 206–215.

На рис. 7 показано сопоставление экспериментальных и расчётных данных по длине канала с проницаемыми стенками (статическое давление p ; среднемассовое число Маха M ; относительный массовый поток через стенку \bar{j}_w и температура наружной поверхности стенки T_w) для случая давления в форкамере P_0 3.98 атм. Как видно из рисунка, данные расчётов хорошо согласуются с экспериментом.

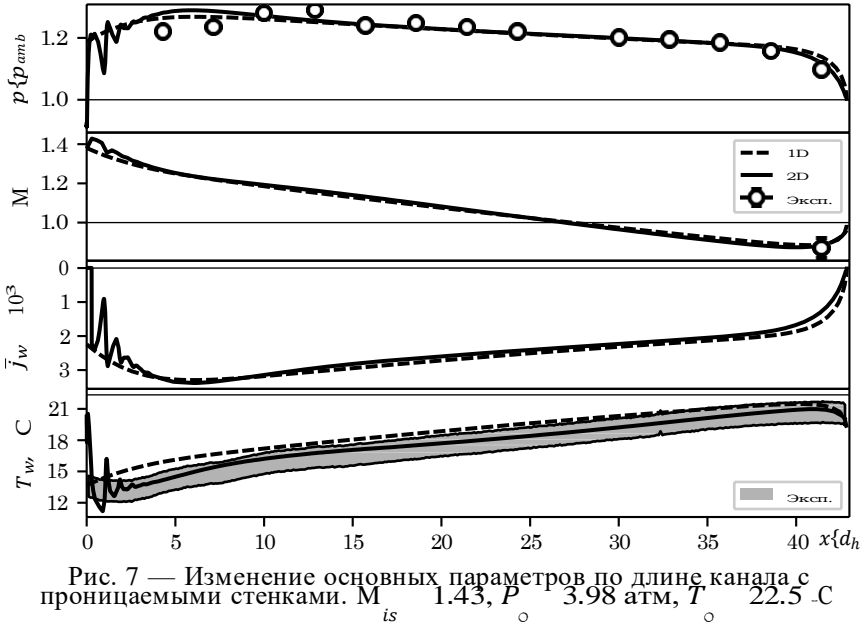


Рис. 7 — Изменение основных параметров по длине канала с проницаемыми стенками. M_{is} 1.43, P_0 3.98 атм, T_0 22.5 °C

Как видно из рис. 7, на протяжении всей длины давление в канале превышает атмосферное и, следовательно, по всей длине канала реализуется отсос газа ($\bar{j}_w < 0$) через боковую поверхность. Комбинация расходного воздействия и трения приводят к тому, что на некоторой длине ($x/d_h \approx 27$) число Маха принимает критическое значение $M = 1$, а затем число Маха переходит в дозвуковую область течения. Стоит отметить, что переход не сопровождается скачками уплотнения, о чём можно судить по замеренному распределению давления (см. рис. 7). Т.е. имеет место бескачковое торможение сверхзвукового потока в канале постоянного сечения при наличии трения и отсоса. На базе одномерной модели был проведён подробный анализ физической реализации подобного вида течений.

На рис. 8 показано изменение нагрева ΔT_h и охлаждения ΔT_c потока в зависимости от начального давления в форкамере P_0 . На рисунке приведены как экспериментальные, так и расчётные данные. Следует отметить, что для одномерной модели использовалось только уравнение состояния совершенного газа. Тогда как для 2D модели газ рассматривался и как совершенный (рис. 8б), и как реальный (рис. 8а). Далее везде, где не указано иное, использовалось уравнение состояния совершенного газа. Для расчёта

реального газа использовалось уравнение состояния Соаве-Редлиха-Квонга. Как известно, для совершенного газа эффект Джоуля-Томсона равен нулю. Для сравнения экспериментальных данных и результатов расчётов с использованием модели совершенного газа необходимо учитывать влияние эффекта Джоуля-Томсона на экспериментальные данные. В связи с этим имеющиеся экспериментальные данные были пересчитаны следующим образом (см. рис. 8б): $\Delta T_{h|c}^{corr} = \mu_{JT} \rho P_0 \Delta T_{h|c}$, где $\mu_{JT} = 0.23 \cdot C / \text{атм}$ — коэффициент Джоуля-Томсона для воздуха.

На основании проанализированных в работе задач был сделан вывод, что рассмотренный подход моделирования пористой стенки адекватно описывает процессы трения и теплообмена, а разработанные модели могут быть использованы для дальнейших исследований.

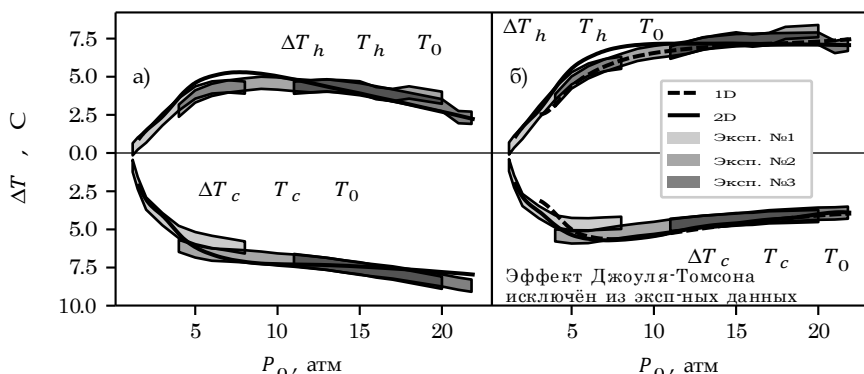


Рис. 8 — Нагрев ΔT_h и охлаждение ΔT_c потока при течении в канале с пористыми стенками. а) реальный газ; б) совершенный газ.
 $M_{is} = 1.43, T_0 = 22.5 \text{ } ^\circ\text{C}$

Рассмотрено влияние числа Маха и давления в форкамере на величину энергоразделения. Выполнены расчёты для трёх профилированных сопел $M_{is} = 1, 2$ и 3 , давление торможения на входе варьировалось в диапазоне $P_0 = 2\text{--}100$ атм. Давление окружающей среды было равно $p_{amb} = 1$ атм. Массовый поток через стенку определялся по уравнению Дарси-Форхгеймера с коэффициентами, полученными в результате процедуры валидации. Температура торможения на входе была фиксированной для всех случаев $T_0 = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Результаты 2D моделирования показаны на рис. 9 в виде разницы между температурами торможения на входе и выходах проницаемой трубки (торец и боковая поверхность) в зависимости от давления торможения на входе P_0 (рис. 9а) и отношение массового расхода m_w / m_0 (рис. 9б) (m_w — массовый расход через проницаемую стенку, m_0 — массовый расход на входе в трубку, см. рис. 6). Как видно на рис. 9, можно выделить три характерных участка. Первый участок соответствует минимальному давлению торможения на входе ($P_0 \approx 1$ атм и, следовательно, $m_w / m_0 \approx 0$,

см. рис. 9), при этих условиях величина энергоразделения стремится к нулю.

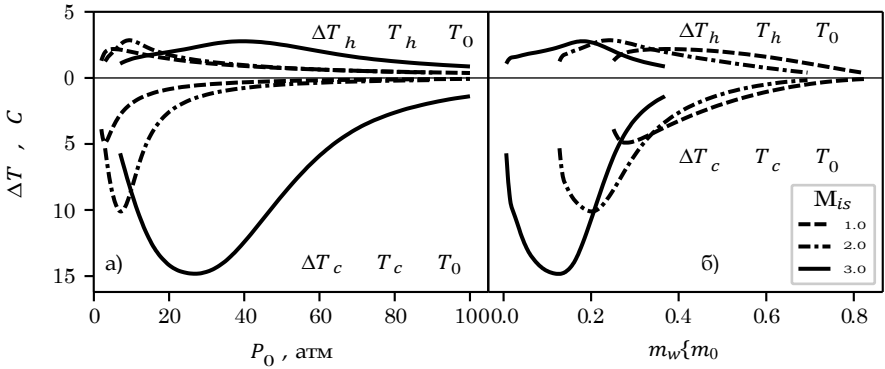


Рис. 9 — Влияние давления торможения в форкамере P_0 и числа Маха M_{is} на нагрев ΔT_h и охлаждение ΔT_c потока при течении воздуха в канале с проницаемыми стенками. $T_0 = 15^\circ$

Второй участок — область экстремума: максимум ΔT_h и, соответственно, минимум ΔT_c . Наличие экстремума может быть объяснено следующим образом. По мере увеличения давления в форкамере увеличивается количество отсасываемого воздуха, т.е. увеличивается параметр проницаемости. Как известно, рост параметра проницаемости приводит к росту коэффициента восстановления температуры r . Следовательно, температура отсасываемого газа T_{aw} увеличивается. С другой стороны отсос газа от сверхзвукового потока приводит к росту среднemasсового числа Маха в канале. Следовательно, температура отсасываемого газа T_{aw} уменьшается. Таким образом существуют два противоборствующих фактора, влияющих на значение адиабатной температуры стенки T_{aw} , которое, по сути, и определяет величину энергоразделения.

И, наконец, третий участок соответствует максимуму давления торможения на входе (максимальное значение массового потока через проницаемую стенку). В этом случае давление торможения на входе P_0 настолько велико, что приводит к асимптотическому отсосу ($r \rightarrow 1$), а величина энергоразделения стремится к нулю ($T_{aw} \rightarrow T_0$). Асимптотический отсос в этом случае реализуется в начальном сечении канала и по мере роста P_0 распространяется вниз по потоку.

Влияние длины канала с проницаемыми стенками показано на рис. 10. Рассмотрены три проницаемые трубки $L \{d_h \ 10, 20 \text{ и } 45$ для сверхзвукового сопла $M_{is} = 3$. Максимальное охлаждение потока ΔT_c наблюдается при наименьшей длине проницаемой трубки при одном и том же входном давлении, однако доля охлаждённого потока m_w/m_0 при этом минимальна. По мере увеличения длины трубки эффект охлаждения уменьшается, но доля охлаждённого потока увеличивается. В качестве примера на рис. 10 показано соответствие между давлением торможения на входе $P_0 = 35$ атм

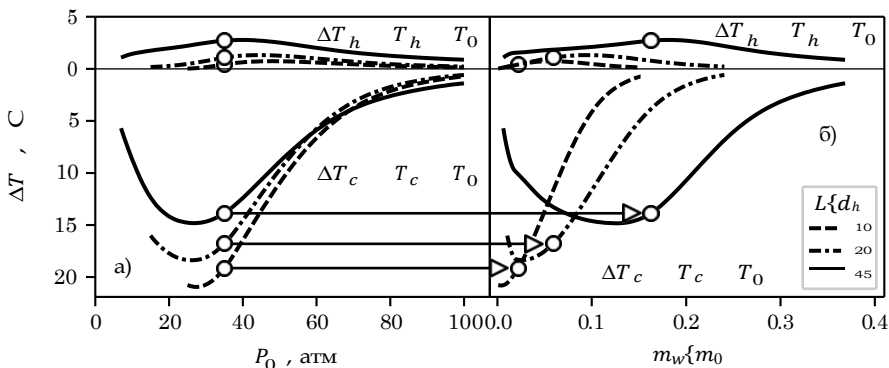


Рис. 10 — Влияние давления торможения в форкамере P и длины канала L/d_h на нагрев ΔT_h и охлаждение ΔT_c потока при течении воздуха в канале с проницаемыми стенками. $M_{is} = 3$, $T_0 = 15$ °C.

и долей охлаждённого потока m_w/m_0 (отмечены кружками) для трубок разной длины.

Рассмотрено влияние молекулярного числа Прандтля на величины нагрева ΔT_h и охлаждения потока ΔT_c (см. рис. 11). Для сопла $M_{is} = 3$ проведено сравнение величины энергоразделения для воздуха ($Pr = 0.71$) и для водорода-ксеноновой смеси ($Pr = 0.18$). Применение H_2 -Xe смеси, в данном случае, увеличивает величину энергоразделения ΔT_c более чем в два раза (с 20 до 45 °C).

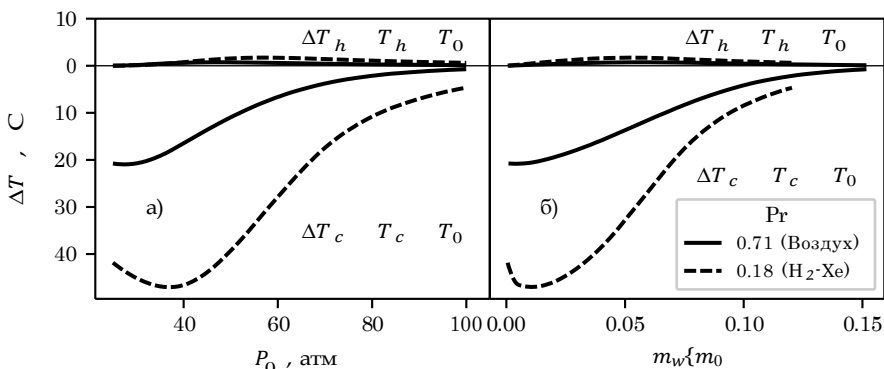


Рис. 11 — Влияние вида рабочего тела на нагрев ΔT_h и охлаждение ΔT_c потока при течении в канале с проницаемыми стенками. $M_{is} = 3$, $L/d_h = 10$, $T_0 = 15$ °C.

Варьирование P_0 в широких пределах может привести к нерасчётному режиму истечения из сопла, поэтому был рассмотрен отсос по закону $j_w^o = const$, где j_w^o — коэффициент отсоса. В расчётах величина параметра отсоса варьировалась в диапазоне $j_w^o = 0.01 \dots 6.00 \cdot 10^{-3}$, а питающее

давление торможения P_0 подбиралось таким образом, чтобы статическое давление на выходе из трубки равнялось $p_{amb} = 1$ атм при $\bar{p} \bar{j}_w^{\circ} \bar{q}_{max}$. Результаты расчётов показывают, что абсолютные значения охлаждения и нагрева потока остаются в тех же пределах. Интересно отметить тот факт, что при определённых значениях \bar{j}_w° асимптотический отсос реализуется в выходном сечении канала и распространяет вверх по потоку при увеличении уровня отсоса $|\bar{j}_w^{\circ}|$. С ростом начального числа Маха M_{is} асимптотический отсос наступает при более низких абсолютных значениях $|\bar{j}_w^{\circ}|$.

Интересно рассмотреть изменение профилей температуры торможения в канале при различных уровнях отсоса. На рис. 12 показаны безразмерные профили скорости $\omega = u_x / u_8$ и температуры торможения $\theta = T / T_{\infty}$ в сечении $x/d_h = 9$ для течения в канале с проницаемыми стенками при $M_{is} = 3$. Сплошными линиями показаны результаты для воздуха, пунктирными — для водорода-ксеноновой смеси. Как видно из рисунка, по мере увеличения уровня отсоса \bar{j}_w° значение θ на стенке (коэффициент восстановления) приближается к единице, а на небольшом расстоянии от стенки образуется пик температуры, увеличивающийся с ростом \bar{j}_w° . Подобные профили температуры торможения получены и при рассмотрении уравнений автомодельного ламинарного пограничного слоя при наличии отсоса.

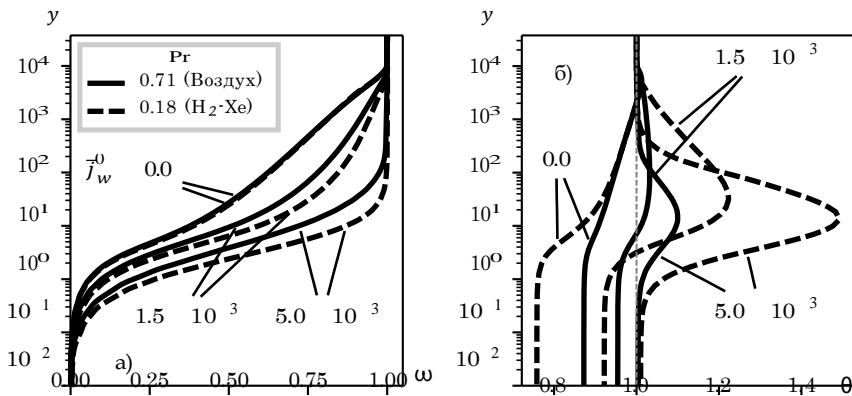


Рис. 12 — Влияние вида рабочего тела и уровня отсоса на профили скорости (а) и температуры торможения (б) при течении в канале с проницаемыми стенками в сечении $x/d_h = 9$. $M_{is} = 3$. $L/d_h = 10$

Характер изменения температуры торможения (см. рис. 12) обусловлен балансом тепла, выделенного при трении о твёрдую поверхность и количеством тепла, отведённого посредством механизма теплопроводности. Именно поэтому при меньших значениях молекулярного числа Прандтля Pr пик температуры торможения выше (см. рис. 12б). При увеличении

уровня отсоса \bar{j}_w^0 коэффициент трения возрастает, а следовательно, возрастает и количество тепла, выделенное за счёт трения. Это приводит к росту значения температуры торможения. С другой стороны, теплопроводность газа остаётся той же самой и, следовательно, большее количество тепла отводится на меньшее расстояние от стенки, что и иллюстрирует рис. 12.

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Проведён обзор методов безмашинного энергоразделения.
2. Подробно рассмотрено газодинамическое устройство энергоразделения. Построены математические модели устройства (1D и 2D). Проведена валидация моделей.
3. Численное моделирование позволило определить влияние массового расхода в дозвуковом канале устройства газодинамического энергоразделения на величину энергоразделения. Показано наличие максимума охлаждения при малых расходах при противопоточной схеме организации течения.
4. Показано влияние схемы течения на величину энергоразделения:
 - а) при разгоне потока в канале со сверхзвуковой скоростью:
 - для $m_1 \{m_2 \quad 0.2$ (m_2 — массовый расход в канале со сверхзвуковой скоростью) прямоочная схема течения демонстрирует преимущество в охлаждении дозвукового потока (ΔT_c 21 °C при $m_1 \{m_2 \quad 0.01$) до 15 % по сравнению с противоточной схемой течения (ΔT_c 18 °C);
 - для $m_1 \{m_2 \quad 0.2$ схема течения не влияет на величину энергоразделения
 - б) при течении в канале, реализующем постоянное число Маха схема течения не влияет на величину энергоразделения в диапазоне рассмотренных параметров.
5. Даны рекомендации по выбору оптимальной проточной части устройства газодинамического энергоразделения. Вне зависимости от основного назначения устройства, рекомендуется использовать сверхзвуковой канал постоянного числа Маха. Уровень числа Маха и соотношение расходов через до- и сверхзвуковые каналы будет определять количество переданного тепла и меру нагрева/охлаждения потоков.
6. Проведён анализ влияния отвода тепла на изменение давления торможения в высокоскоростном потоке. Рассмотрены различные способы охлаждения потока и возможность их использования для повышения давления торможения.
7. На базе одномерной модели устройства испарительного охлаждения (аэротермопрессора) показано, что при впрыске капель воды в высокоскоростной (начальное число Маха $M_0 \quad 1.5$) высокотемпературный ($T_0 \quad 727$ K) поток газа возможно достичь степени повышения давления торможения 1.25 при скорости впрыскиваемых капель равной скорости основного потока.

8. Рассмотрено устройство энергоразделения с проницаемой стенкой. Построены математические модели устройства (1D и 2D). Проведена валидация моделей.
9. Показана, проанализирована и теоретически обоснована возможность бескачкового торможения сверхзвукового потока в канале постоянного сечения при отсосе газа через стенки канала.
10. Показано наличие экстремума температур для охлаждаемого и нагретого потоков в зависимости от начального давления торможения (для канала с заданной геометрией и пористостью).
11. Показано, что эффект энергоразделения в канале с проницаемыми стенками зависит от начального числа Маха, начального давления торможения и числа Прандтля. При изменении начального числа Маха с $M_{is} \left| \begin{array}{l} 1 \\ \Delta T_c \end{array} \right|$ на $M_{is} \left| \begin{array}{l} 3 \\ \Delta T_c \end{array} \right|$ охлаждение воздушного потока увеличивается с $5 \text{ } ^\circ\text{C}$ до $15 \text{ } ^\circ\text{C}$. При изменении числа Прандтля с $P_r \left| \begin{array}{l} 0.7 \\ \Delta T_c \end{array} \right|$ на $P_r \left| \begin{array}{l} 0.2 \\ \Delta T_c \end{array} \right|$, охлаждение потока увеличивается более чем в два раза с $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ до $45 \text{ } ^\circ\text{C}$.
12. 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.

Публикации автора по теме диссертации

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. Energy separation in a channel with permeable wall / D.E. Khazov, A.I. Leontiev, A.G. Zditovets et al. // Energy. — 2021. — Vol. 239. — P. 122427.

Хазов Дмитрий Евгеньевич

Численное моделирование процессов энергоразделения
в потоках сжимаемого газа

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать..... Заказ № _____

Формат 60 90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____