

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
теплофизики им. С.С. Кутателадзе
СО РАН, академик РАН



[Signature] Дмитрий Маркович Маркович

1 » *[Signature]* 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Хазова Дмитрия Евгеньевича **«Численное моделирование процессов энергоразделения в потоках сжимаемого газа»** на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника

Работа посвящена численному исследованию процессов энергоразделения при высокоскоростном течении газов в пристенном пограничном слое на проницаемой и непроницаемой стенках трубы (круглого сопла). Исследуемый метод энергоразделения основан на разнице между температурой теплоизолированной стенки (температурой восстановления) и температурой торможения внешнего сверхзвукового потока. Характерной чертой исследуемого метода является образование в газовом потоке областей пониженной и повышенной температуры относительно исходной температуры торможения без совершения потоком технической работы. Это позволяет отнести исследуемый метод к «безмашинным» методам энергоразделения, таким как вихревой метод (труба Ранка-Хилша), резонансный метод (труба Гартмана-Шпренгера) и др. Исследуемый в диссертации метод энергоразделения на непроницаемой стенке был предложен в 1997 году академиком РАН А.И. Леонтьевым. Далее, устройство, реализующее указанный метод энергоразделения, будем называть трубой Леонтьева. Известно, что температурная эффективность трубы Леонтьева зависит от коэффициента восстановления, который, в свою очередь, является функцией молекулярного числа Прандтля. Если между двумя газовыми потоками, истекающими из общего ресивера с разными скоростями (дозвуковой и сверхзвуковой), поместить стенку, при $Pr \neq 1$ через неё будет происходить обмен теплом между потоками, т.е. нагрев одной части газа за счет охлаждения другой. Этот метод позволяет сохранить полное давление дозвуковой части потока, что выгодно отличает его от известных методов «безмашинного» энергоразделения. Известно, что температурная эффективность трубы Леонтьева может быть весьма высока при использовании в качестве теплоносителя смесей газов с сильно отличающимися молекулярными массами, например, гелия и ксенона или, как в рассматриваемой диссертации, водорода и ксенона. Для таких смесей минимальное число Прандтля близко к 0,2. При использовании воздуха эффективность устройства снижается, что вызвано большим и близким к 1 числом Прандтля — 0,7. Высокой эффективности устройства, работающего на воздухе, можно добиться, понижая коэффициент восстановления температуры и повышая интенсивность теплоотдачи на поверхности теплообмена со стороны сверхзвуковой части потока за счёт воздействия на пограничный слой. Вдув части газа из дозвуковой части потока, который обычно обладает большим давлением, в сверхзвуковую часть потока через проницаемую стенку является одним из

способов понижения коэффициента восстановления, что, однако, не приводит к увеличению температурной эффективности устройства. Автором диссертацию проанализирован иной подход к энергоразделению на проницаемой стенке, в котором часть газа с пониженной температурой (температурой восстановления) в непосредственной близости от стенки отсасывается через неё, и собирается в коллекторе холодного газа. Газовый поток вблизи внешней границы пограничного слоя, имеющий повышенную по сравнению с исходной температурой торможения, прокачивается через трубу и собирается в коллекторе горячего газа.

Автор диссертации поставил целью работы исследование одномерными и двумерными численными методами влияния основных параметров организации течения (давление, температура, число Маха, вид рабочего тела, прямоточная или противоточная схема, закон изменения площади поперечного сечения сверхзвуковой части трубы) на энергоразделение в двух устройствах: трубе Леонтьева с непроницаемой стенкой и в канале с проницаемой стенкой. Особое внимание было уделено разработке методик численного моделирования течений и их валидации на известных экспериментальных данных. Подобные исследования в ключе повышения эффективности «безмашинного» энергоразделения по методу А.И. Леонтьева ранее не проводились, что определяет актуальность диссертационной работы.

Объём и структура работы. Текст диссертации изложен на 170 страницах и состоит из введения, трёх глав, заключения, списка использованной литературы и приложения из трёх частей. Работа иллюстрирована 97 рисунками и 10 таблицами. Библиография имеет 130 наименований.

Во введении дано краткое обоснование направления исследований, формулируются цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, с учётом актуальности работы, её научной новизны и практической ценности, а также отмечен личный вклад автора.

В первой главе дан обзор существующих методов энергоразделения. На основе анализа уравнения сохранения полной энергии (энтальпии торможения) газового потока выявлены основные физические механизмы, влияющие на перераспределение энтальпии торможения. Подробно рассмотрены результаты экспериментальных и теоретических исследований трубки Ранка-Хилша, резонансной трубы Гартмана-Шпренгера, трубы Леонтьева и трубки с проницаемой стенкой. Приводятся сведения об основных факторах, влияющих на энергоразделение во всех перечисленных устройствах. На основе литературных данных показано, что температурная неоднородность, возникающая в сжимаемых газовых потоках, может достигать существенных значений. Так для резонансных труб зафиксирован разогрев газа до 460 °С, в вихревой трубе перепад температур зафиксирован на уровне 120 °С, в трубе Леонтьева и в трубе с проницаемой стенкой на уровне 65 °С.

Во второй главе исследуется влияние различных факторов на энергоразделение в трубе Леонтьева с непроницаемой разделительной стенкой. Построены две математические модели рассматриваемого устройства (одномерная и двумерная), проведена валидация моделей, а также проведены параметрические исследования на базе разработанных моделей. В частности показано, что при конической форме расширяющейся части сверхзвукового канала — течение с ростом числа Маха по длине сопла — противоточная схема организации устройства энергоразделения даёт больший эффект охлаждения дозвуковой части потока по сравнению с прямоточной схемой. Для сопла с постоянным значением числа Маха по длине схема течения не оказывает существенного влияния на эффективность энергоразделения. Проведён анализ влияния охлаждения сверхзвукового потока и впрыска жидкости в сверхзвуковой поток на повышение давления торможения, что в перспективе может быть использовано для повышения эффективности устройств энергоразделения. Однако продемонстрировать влияние данных факторов на работу исследуемого устройства автору не удалось.

В третьей главе исследуется энергоразделение в канале с проницаемой стенкой. Разработанные в предыдущей главе модели дополнены соответствующими соотношениями для моделирования процессов трения и теплообмена в канале с проницаемой стенкой. Разработана методика двумерного моделирования процессов вдува и отсоса через проницаемую стенку. На доступных экспериментальных данных проведена валидация разработанной методики. Доказана возможность перехода от сверхзвукового потока к дозвуковому без скачка уплотнения за счёт отсоса газа через стенку трубы. Проанализировано влияние числа Маха на входе в трубку с проницаемой стенкой, а так же 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.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложениях содержится дополнительная, поясняющая информация.

Актуальность темы диссертации. Процессы «безмашинного» энергоразделения вызывают несомненный интерес специалистов, что обусловлено простотой и компактностью таких устройств, применяемых для получения холодного газового потока. Кроме того, энергоразделение является сопутствующим процессом при редуцировании давления в различных системах, и может быть полезно использовано. Исследуемые методы газодинамического энергоразделения актуальны и, в части канала с проницаемой стенкой, оригинальны, что обуславливает актуальность темы диссертационной работы.

Научная новизна. Наиболее важными новыми результатами, полученными автором диссертации, являются

- разработанные и валидированные методики моделирования энергоразделения в трубе Леонтьева и канале с проницаемой стенкой;
- подтверждение на основе результатов численного моделирования возможности перехода от сверхзвукового потока к дозвуковому без скачка уплотнения за счёт отсоса газа через стенку трубы;
- определение зависимости параметров эффективности исследованных методов энергоразделения от схемы течения, чисел Маха и Прандтля, формы сверхзвукового сопла, расхода газа через проницаемую стенку.

Теоретическая значимость работы определяется тем, что автор разработал и на основе известных экспериментальных данных провёл тщательный отбор субмоделей для построения ряда одномерных и двумерных математических моделей, описывающих эффекты энергоразделения в исследуемых устройствах с высокой точностью. Кроме того, получены теоретические результаты по энергоразделению различных газов в существенно более широких диапазонах изменения параметров, чем диапазоны параметров доступные для изучения в эксперименте, и представленные в открытой литературе.

Практическая значимость работы. 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».

Апробация работы. Доклады по материалам диссертации представлены на ведущих российских и международных конференциях, начиная с 2007 года и по настоящее время.

Публикации. По теме работы автором опубликовано 5 статей из перечня ВАК, в том числе в соавторстве, 3 из них опубликованы в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Оценивая диссертационную работу в целом, можно отметить наиболее значимые научные результаты, развивающие фундаментальные представления о процессах энергоразделения в сжимаемых потоках.

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. Показала возможность перехода от сверхзвукового потока к дозвуковому без скачка уплотнения за счёт отсоса газа через стенку трубы.

Замечания и пожелания. 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 двухатомным газ и в смеси с ксеноном даёт значение показателя адиабаты 1,46 при $Pr=0.2$.

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 снимают 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, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., ред. 11.09.2021 г., а её автор Хазов Д.Е. заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертация полном объеме доложена на заседании Секции №2 «Термогазодинамика и турбулентность» Учёного совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) (Протокол №07-2022 от 01.11.2022). Материалы диссертации обсуждены, и на основании положительного решения Секции составлен настоящий отзыв.

630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1, +7(383) 330-67-36,

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук
к.ф.-м.н.
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1, +7 (383) 330-60-44,
sci_it@itp.nsc.ru

Макаров Максим Сергеевич

Главный научный сотрудник лаборатории термогазодинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук
д.т.н., профессор

Терехов Виктор Иванович

630090, г. Новосибирск, проспект Академика
Лаврентьева, д. 1, +7 (383) 330-67-36,
terekhov@itp.nsc.ru

Подписи Терехова В.И. и Макарова М.С. удостоверяю

Заместитель директора по научной работе ИТ СО РАН
к.ф.-м.н.



Сиковский Д. Ф.