

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Хазова Дмитрия Евгеньевича «Численное моделирование процессов энергоразделения в потоках сжимаемого газа», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14— «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Диссертация Д.Е. Хазова посвящена расчетному исследованию газодинамических и теплообменных процессов, приводящих к энергоразделению в высокоскоростных течениях вязкого газа. Более конкретно, в работе исследуются процессы в устройстве газодинамического энергоразделения по методу А.И. Леонтьева и в канале с проницаемой стенкой. Актуальность выполненного Д.Е. Хазовым исследования обусловлена как фундаментальным значением пополняемого объема знаний по физике процесса безмашинного энергоразделения и его эффективности, так и возникающими вызовами по совершенствованию опытных образцов устройств энергоразделения указанного типа.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы, а также списка условных обозначений/сокращений и трех приложений. Материал диссертации изложен на 170 страницах, включающих 97 рисунков и 10 таблиц. Список цитируемой литературы включает 130 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Представлены основные результаты, выносимые на защиту, даны сведения об апробации работы, приведены данные о публикациях автора и его личном вкладе в выполненные исследования

Первая глава, является, в основном, обзорной. В ней сначала, при обращении к уравнению сохранения полной энтальпии, рассматриваются физические механизмы, влияющие на перераспределение полной энтальпии в течениях вязкого газа. Вводятся параметры, количественно характеризующие процесс энергоразделения. Рассмотрены наиболее распространенные методы энергоразделения и устройства для их реализации: вихревая труба Ранка-Хилша и резонансная труба Гартмана-Шпренгера. Основное внимание устройствам для реализации энергоразделения в пограничном слое: устройству газодинамического энергоразделения по методу А. И. Леонтьева и каналу с проницаемой стенкой. Дан обзор экспериментальных и расчетных, посвященных исследованию этих устройств.

Вторая глава посвящена исследованию процессов в устройстве газодинамического энергоразделения, реализующем метод А.И. Леонтьева, и вопросам оптимизации этого устройства. Предварительно, на основе одномерной модели Вигдоровича-Леонтьева проводятся оценки предельного энергоразделения в аппарате, включающем соосные осесимметричные каналы, во внутреннем из которых газ движется со сверхзвуковой скоростью, а во внешнем (кольцевом) — с дозвуковой. Далее описываются разработанные автором одномерная и двумерная (осесимметричная) математические модели для расчета характеристик процессов, протекающих в устройстве газодинамического энергоразделения. Одномерная модель основана на известном методе Шапиро-Хоторна, с замыканием системы уравнений эмпирическими соотношениями для расчета коэффициентов трения и теплоотдачи. Двумерная модель сопряженного теплообмена базируется на системе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) и уравнения энергии. Численное решение данной системы (по методу конечных объемов) осуществлялось автором посредством применения коммерческого пакета ANSYS Fluent. В качестве замыкающих моделей при расчетах использовались двухпараметрические дифференциальные модели турбулентности семейств $k-\varepsilon$, $k-\omega$; турбулентное число Прандтля полагалось либо постоянным, либо оценивалось по известной модели Кейса-Кроуфорда. По представленным в диссертации результатам валидационных расчетов автор заключает, в частности, что наилучшее совпадение с экспериментом демонстрирует стандартная $k-\omega$ модель турбулентности (Вилкокса) с моделью Кейса-Кроуфорда при базовым турбулентном числе Прандтля, равным 0,82. Далее представляются результаты и анализ параметрических расчетов по исследованию влияния различных факторов на интегральный эффект энергоразделения, а именно: начальной (входной) температуры, вида рабочего тела (молекулярного числа Прандтля), профиля сверхзвукового канала (при сохранении входного давления торможения и массового расхода), а также схемы организации течения в дозвуковой части устройства (сонаправленного со сверхзвуковым течением, «прямоточная схема») или противонаправленного («противопоточная схема»). Завершает главу раздел, посвященный вопросам влияния отвода тепла на изменение давления торможения в высокоскоростном потоке. Дано обзор различных способов охлаждения потока и рассмотрена возможность их применения для повышения давления торможения. На основе одномерной модели аэротермопрессора (устройства испарительного охлаждения) проведена серия расчетов, показывающих, что впрыск капель воды в поток при определенных условиях может обеспечить повышение давления торможения до 25 процентов.

В третьей главе рассматривается динамика потока и теплообмен в случае течения вязкого газа в канале с проницаемой стенкой. Разработанные ранее модели, представленные в главе 2, адаптируются для анализа течений в

условиях проницаемых границ. В случае одномерной модели учитывается изменение расхода по длине канала и влияние вдува/отсоса на коэффициенты трения и восстановления температуры (по асимптотической теории Кутателадзе-Леонтьева для турбулентного пограничного слоя). Для расчетов по двумерной модели автором было реализовано специальное граничное условие (в виде «пользовательских» функций, составляемых пользователем пакета ANSYS Fluent на языке C для расширения возможностей данного пакета), которое позволяет учесть наличие вдува/отсоса через проницаемую стенку. Представляются результаты проведенных автором валидационных расчетов по разработанным одномерной и двумерной моделям, в сопоставлении с доступными экспериментальными данными для течений сжимаемой и несжимаемой среды вдоль проницаемых поверхностей. Демонстрируется в целом хорошее соответствие. Показывается также, что при сравнении результатов эксперимента с расчетными данными, полученными на основе модели совершенного газа, следует учитывать влияние эффекта Джоуля-Томсона на данные измерений. Далее автор представляет и обстоятельно анализирует результаты систематических расчетов по определению влияния на величину энергоразделения таких определяющих параметров как число Маха и давление в форкамере. Представляемые расчеты выполнены для трех профилированных сопел, с выходными числами Маха $M = 1, 2$ и 3 ; входное давление торможения на входе варьировалось в интервале от 2 до 100 атм, при сохранении давления с внешней стороны проницаемой стенки (окружающей среды) равным 1 атм. Следующие серии выполненных автором расчетов были направлены на исследование влияния длины проницаемого канала и числа Прандтля протекающего по каналу газа. Автор дает развернутый анализ результатов расчетов данной направленности.

В заключении формулируются основные результаты, полученные автором по теме диссертационной работы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Для устройства газодинамического энергоразделения, реализующего метод А.И.Леонтьева, количественно определено влияние массового расхода в канале с дозвуковой скоростью на интегральный эффект (величину) энергоразделения. Показано, что в случае противопоточной схемы организации течения и при условии малости расхода может иметь место максимум охлаждения.

2. Определено, при каком соотношении массовых расходов в сверхзвуковом и дозвуковом каналах прямоточная схема течения демонстрирует преимущество в охлаждении дозвукового потока по сравнению с противоточной схемой течения; показано также, что для широкого диапазона определяющих параметров схема течения не влияет на величину

энергоразделения, если в сверхзвуковом канале реализуется условие постоянства числа Маха.

3. Для модельного устройства испарительного охлаждения (аэротермопрессора) показано, что при впрыске капель воды в высокоскоростной высокотемпературный поток газа возможно достичь существенной степени повышения давления торможения (до 1,25 при рассмотренных в работе условиях), если скорость впрыскиваемых капель равна скорости основного потока.

4. Показано, что в случае сверхзвукового течения вязкого газа по каналу с проницаемыми стенками имеет место экстремум температур для охлаждаемой и нагретой части потока, в зависимости от входного давления торможения.

5. Количественно определено влияние на эффект энергоразделения в канале с проницаемыми стенками таких определяющих параметров как начальное число Маха, начальное давление, число Прандтля.

6. Получены новые данные, показывающие возможность бескачкового торможения сверхзвукового потока в канале постоянного сечения при отсосе газа через стенки канала.

Достоверность полученных результатов обусловлена приведенным в диссертации обоснованием применимости использованных и разработанных автором математических моделей для условий, при которых изучаются процессы газодинамического энергоразделения, а также использованием для получения численных решений хорошо известного специалистам «авторитетного» CFD кода ASYS Fluent. Результаты, полученные по одномерной и двумерной моделям, удовлетворительно согласуются между собой и с имеющимися экспериментальными данными.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что полученные автором данные и разработанные модели могут быть использованы в инженерных расчетах устройств, основанных на эффекте газодинамического энергоразделения и процессах энергоразделения в каналах с проницаемыми стенками, а также при проектировании теплообменного оборудования. Эти данные, а также представленные подходы и разработанные методики численного исследования эффекта энергоразделения могут быть рекомендованы к использованию в таких научных и учебных организациях как ОИВТ РАН, Институт теплофизики СО РАН, МЭИ, МВТУ, СПбПУ и в других учреждениях.

При прочтении диссертационной работы возник ряд вопросов и замечаний:

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 соотношении 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. Отметим лишь некоторые:

7.1. В отдельных пунктах подраздела, который призван отразить научную новизну исследования (раздел «Введение»), содержатся «вкрапления» просто с констатацией выполненной работы (то же и на страницах автореферата).

7.2. В качестве одного из выводов из материала обзорной (первой) главы автор пишет: «На основе анализа уравнения сохранения полной энергии (энтальпии торможения) газового потока выявлены основные физические механизмы влияющие на перераспределение энтальпии торможения». Разве ранее эти механизмы не были *выявлены* другими исследователями?

7.3. Математически задача, описывающая в одномерном приближении течение и теплообмен в системе коаксиальных каналов, разделенных теплопроводной стенкой (система уравнений (2.15)–(2.25)) является задачей Коши. Поэтому использование на стр. 43 термина «граничные условия» (а не «начальные условия») к этой задаче не вполне корректно.

8. В тексте присутствуют синтаксические погрешности, а также опiski и опечатки (в частности, в формуле (1.3) и в уравнении (2.29));

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, представленных в диссертации Д.Е.Хазова, докладывались на многочисленных (2007-2021 гг.) профильных международных и российских конференциях. Основные результаты диссертации опубликованы в 24 трудах, 2 из которых – в научных журналах из Перечня ВАК, 3 – в изданиях, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science. Содержание автореферата соответствует основным положениям и выводам из представленной диссертационной работы.

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 по проблеме энергоразделения в потоках сжимаемого газа. Автором проведены численные исследования турбулентных течений вязкого газа в устройстве газодинамического энергоразделения и энергоразделения в канале с проницаемыми стенками, получены, проанализированы и обобщены

результаты параметрических расчетов по влиянию основных факторов на интегральный эффект энергоразделения. Автором предложено также использовать испарительное охлаждение для повышения давления торможения в сверхзвуковом канале устройства газодинамического энергоразделения и численно оценен достигаемый эффект.

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 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, ред.11.09.2021 г. Автор диссертации Хазов Дмитрий Евгеньевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14— «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), профессор,
профессор Высшей Школы прикладной математики и вычислительной физики
ФГАОУ ВО «СПбПУ», главный научный сотрудник научно-исследовательской
лаборатории гидроаэродинамики Физико-механического института СПбПУ,

Смирнов Евгений Михайлович

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
192251, С.-Петербург, Политехническая улица, д.29,
тел./факс (812) 552-66-21, email: aero@phmf.spbstu.ru

