

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФГБУН Институт  
теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
СО РАН, академик РАН



С.В. Алексеенко

«30» ноября 2016 г.



## О Т З Ы В

ведущей организации на диссертацию Поповича Сергея Станиславовича **«Влияние ударных волн на эффект безмашинного энергоразделения»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Под "безмашинным энергоразделением" понимается процесс перераспределения полной энтальпии газового потока, который осуществляется без совершения газом внешней работы. По способу организации газового потока методы безмашинного энергоразделения можно разделить на вихревые, волновые, резонансные, эжекционные и пульсационные. По тепловому взаимодействию с окружающей средой – на адиабатные и неадиабатные. Наиболее известным устройством для безмашинного энергоразделения является вихревая трубка Ранка-Хилша. Устройства, основанные на перечисленных методах энергоразделения, отличаются компактностью, отсутствием подвижных частей, надёжностью в эксплуатации по сравнению с устройствами машинного энергоразделения, однако обладают рядом недостатков. Известные аппараты для безмашинного энергоразделения не позволяют получать высокой тепловой эффективности, а потери полного давления теплоносителя в этих устройствах весьма высоки.

В 1997 году академиком РАН А.И. Леонтьевым был предложен метод безмашинного энергоразделения газа в сверхзвуковом потоке. Метод основан на том, что температура тела, находящегося в высокоскоростном газовом потоке, может существенно отличается от температуры изоэнтропически заторможенного газа (полной температуры). Мерой отклонения температуры теплоизолированной стенки (температуры восстановления) от полной температуры газа служит коэффициент восстановления, который зависит от 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 энергоразделения. Известно, что тепловая эффективность нового устройства, реализующего описанный метод энергоразделения, может быть весьма высока при использовании в качестве теплоносителя смесей гелия 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 динамического воздействия на пограничный слой.

Автор диссертации поставил целью работы поиск методов снижения адиабатной температуры стенки и увеличения коэффициента теплоотдачи в сверхзвуковом потоке, а также применение этих методов для повышения эффективности работы устройства безмашинного энергоразделения. В задачи исследования вошло изучение влияния инициированных ударных волн и отрывного течения за ребром на адиабатную температуру стенки, коэффициент восстановления температуры и интенсификацию теплоотдачи на стенке. Подобные исследования в ключе повышения эффективности безмашинного энергоразделения по методу А.И. Леонтьева ранее не проводились, что определяет актуальность диссертационной работы.

Текст диссертации изложен на 172 страницах и состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованной литературы и приложения из 2 частей. Работа иллюстрирована 100 рисунками и 7 таблицами. Библиография имеет 151 наименование.

Во введении сформулированы актуальность работы, её теоретическая и практическая значимость, цели и задачи исследования, кратко описано содержание работы.

В первой главе представлен литературный обзор. Приводится ряд известных на сегодняшний день методов безмашинного энергоразделения, подробно описывается принцип газодинамического энергоразделения в сверхзвуковом потоке. Представлен обзор исследований коэффициента восстановления температуры и коэффициента теплоотдачи в сверхзвуковом пограничном слое при наличии падающего скачка уплотнения, а также при отрыве потока за ребром и уступом.

Во второй главе представлено описание экспериментального стенда, измерительного оборудования и методики исследований динамических параметров сверхзвукового потока воздуха, процессов теплообмена в пограничном слое и в отрывной области за ребром на стационарном и



нестационарном режимах работы установки. Описывается стенд для экспериментального исследования устройства энергоразделения с генераторами ударных волн в сверхзвуковом канале. Приводятся расчёт неопределённостей измерений основных параметров.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования влияния инициированной ударной волны и отрывного течения за ребром на параметры теплообмена в сверхзвуковом потоке. Проведено сравнение полученных результатов с известными экспериментальными данными и данными теоретических исследований. Показано, что в области взаимодействия падающего скачка уплотнения с пограничным слоем коэффициент восстановления возрастает, что должно учитываться при расчёте эффективности энергоразделения. Показано, что снижения коэффициента восстановления и повышения коэффициента теплоотдачи можно достичь в области отрыва пограничного слоя за ребром. Определено влияние высоты ребра на коэффициент теплоотдачи. Представлены результаты экспериментального исследования устройства энергоразделения с генераторами ударных волн в сверхзвуковом канале в сравнении с устройством энергоразделения с гладкими стенками. Получены эффекты нагрева сверхзвукового и охлаждения дозвукового потоков воздуха на выходе из устройства энергоразделения при вариации длины канала, числа Маха и температуры торможения на входе в устройство.

В приложении представлены блок-схемы программы управления экспериментальными исследованиями в среде LabView, а также способ реализации технологии безогневого подогрева и редуцирования давления природного газа с помощью исследуемого устройства безмашинного энергоразделения.

Заключение отражает основные результаты исследований.

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

1. Экспериментально получено увеличение адиабатной температуры стенки в области падения скачка уплотнения на плоскую стенку. Увеличение коэффициента восстановления температуры не превышало 4,5%, что может приводить к снижению температурного напора в устройстве энергоразделения с генераторами ударных волн до 30% в сравнении с энергоразделением в устройстве с гладкими стенками. Показано, что этот эффект носит локальный характер и не может оказать существенного влияния на процесс энергоразделения в целом.

2. В области отрыва пограничного слоя за ребром экспериментально получено уменьшение адиабатной температуры стенки в сравнении с адиабатной температурой гладкой стенки. Максимальное снижение



коэффициента восстановления температуры составило 8% при расчёте по параметрам набегающего потока и 12% при расчете по локальным параметрам. Показано, что отрыв потока может приводить к локальному увеличению температурного напора в устройстве энергоразделения на 70% в сравнении с температурным напором на гладкой стенке. Отмечено, что положительное влияние (с точки зрения энергоразделения) локальной отрывной зоны сохраняется вниз по потоку на расстоянии десяти и более высот ребра.

3. Представлена методика одновременного определения коэффициента восстановления температуры и коэффициента теплоотдачи в сверхзвуковом потоке на нестационарном режиме работы аэродинамической установки. В экспериментах на нестационарном режиме работы подтвержден эффект уменьшения коэффициента восстановления при течении сверхзвукового потока за ребром. Уменьшение коэффициента восстановления температуры в отрывной области составило от 3,6% при высоте ребра 2 мм до 7,7% при высоте ребра 8 мм в сравнении с коэффициентом восстановления на гладкой стенке. Коэффициент теплоотдачи на оребренной стенке возрастает на 30%. Максимальное увеличение числа Стэнтона наблюдалось при высоте ребра равной толщине пограничного слоя и достигало 40%.

4. Экспериментальные исследования устройства энергоразделения по методу А.И. Леонтьева показали, что установка рёбер в сверхзвуковом канале приводит к увеличению статического давления и температуры стенки, что в целом приводит к снижению эффективности энергоразделения не более чем на 11,5%. Показано, что, меняя длину трубы и конфигурацию выходного диффузора, можно уменьшить снижение эффективности энергоразделения. Качественно исследования показали, что наличие скачков уплотнения в сверхзвуковом канале устройства энергоразделения (инициированных или возникающих случайно) не приводят к необратимому нарушению его работы.

5. Исследования устройства энергоразделения по методу А.И. Леонтьева при противоточном режиме течения теплоносителя показали повышение его эффективности на 16% по сравнению с прямоточным режимом. С увеличением числа Маха на входе в трубу от 1,9 до 2,5 эффект энергоразделения в канале с оребрением возрастает на 13%. Повышение температуры торможения от 40 до 70°C также привело к увеличению эффекта энергоразделения на 9%.

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

1. Обзор литературы по теме диссертации представлен излишне детализированным. Не достаточно полно дан критический анализ работ и выводов по отношению к проблематике исследования.



2. Автор не привёл сравнения полученных экспериментальных данных по энергоразделению в трубе Леонтьева с гладкими стенками с известными результатами теоретических исследований, хотя в диссертации имеются ссылки на результаты этих исследований.

3. К анализу эффективности энергоразделения автор подходит только с позиций снижения температуры воздуха на выходе из дозвукового канала и повышения температуры на выходе из сверхзвукового канала устройства. Автор не использует известных понятий о температурной эффективности и адиабатном КПД процесса энергоразделения и не предлагает иных подходов, позволяющих учесть затраты (падение полного давления в канале) на осуществление энергоразделения.

4. Формулировка научной новизны звучит размыто, что затрудняет выделение главного достижения, полученного автором.

5. В тексте диссертации и автореферата встречаются орфографические и грамматические ошибки.

Приведенные замечания не снижают общей высокой оценки полученных результатов, а диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Полученные результаты имеют существенное значение для науки и практики, могут быть использованы при проектировании теплообменных аппаратов с использованием эффекта безмашинного энергоразделения, а также при исследовании аэродинамического нагрева и закономерностей теплоотдачи в сверхзвуковых потоках.

Материалы работы изложены в 44 научных работах (16 статей, 28 тезисов докладов и материалов конференций), из которых 4 статьи входят в журналы списка ВАК. Результаты работы были доложены на многочисленных международных и российских конференциях и форумах. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Диссертационная работа была заслушана на расширенном научном семинаре отдела термогазодинамики ФГБУН Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН с привлечением ведущих специалистов Института в области теоретических и экспериментальных исследований тепломассообмена в потоках жидкостей и газов (протокол № 7 от «24» ноября 2016 г.) и получила положительную оценку семинара.

Считаем, что диссертационная работа «Влияние ударных волн на эффект безмашинного энергоразделения» отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней (п. 9), утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а её автор – Попович Сергей Станиславович – заслуживает

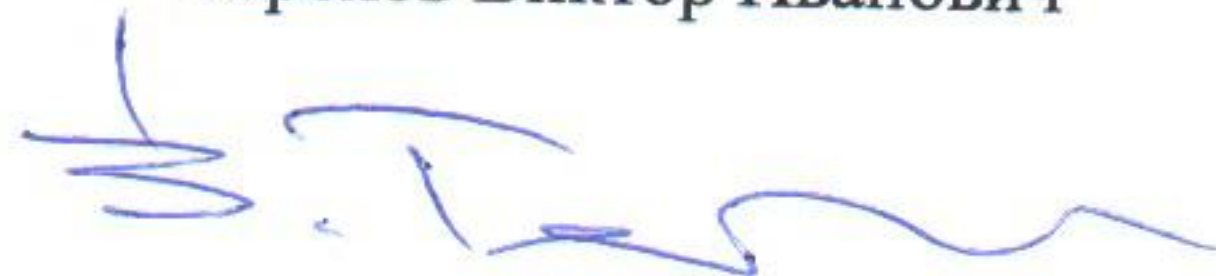


присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв составили:

Зав. отделом термогазодинамики  
ИТ СО РАН, д.т.н., профессор,  
01.04.14-теплофизика и теоретическая  
теплотехника  
e-mail: terekhov@itp.nsc.ru  
тел. (383) 330-67-36  
630090, г. Новосибирск,  
пр. Ак. Лаврентьева, 1

Терехов Виктор Иванович



С.н.с. ИТ СО РАН,  
к.ф.-м.н., 01.04.14-теплофизика и  
теоретическая теплотехника  
e-mail: msmaarov@itp.nsc.ru  
тел. (383) 330-70-08  
630090, г. Новосибирск,  
пр. Ак. Лаврентьева, 1

Макаров Максим Сергеевич



Ученый секретарь ИТ СО РАН  
д.ф.-м.н.  
e-mail: kuibin@itp.nsc.ru  
тел. (383) 330-60-44  
630090, г. Новосибирск,  
пр. Ак. Лаврентьева, 1



Куйбин Павел Анатольевич