

ПОПОВИЧ Сергей Станиславович

**ВЛИЯНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН НА ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в НИИ Механики МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: д.т.н., профессор, академик РАН,
гл.н.с. НИИ механики МГУ, Москва,
Леонтьев Александр Иванович

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор НИУ МЭИ, Москва
Дмитриев Александр Сергеевич;

д.т.н., профессор СПбПУ, Санкт-Петербург,
Митяков Андрей Владимирович

Ведущая организация: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
СО РАН, Новосибирск

Защита диссертации состоится «__» «_____» 2016 г. в __:__ на заседании Диссертационного совета Д 002.110.02 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2, экспозал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН.

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экз., заверенный печатью организации, просим выслать по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2, ОИВТ РАН, ученому секретарю Диссертационного совета Д 002.110.02.

Автореферат разослан «__» «_____» 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.110.02
кандидат ф.-м. наук

Васильев Михаил Михайлович

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2016

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Актуальной проблемой современной теплофизики является разработка и применение методов безмашинного энергоразделения газовых потоков. Под термином «энергоразделение» или «безмашинное энергоразделение» понимается перераспределение полной энтальпии (температуры торможения) в потоке газа без совершения им внешней работы и при отсутствии теплообмена с окружающей средой. Причины, вызывающие энергоразделение потока, могут быть различными. В некоторых случаях это вихревые течения, в других – пульсации давления и ударные волны.

Наиболее эффективным способом осуществления энергоразделения является использование машинных методов воздействия на поток – турбин, компрессоров, поршневых машин. К недостаткам использования машинных методов можно отнести высокую стоимость, малый ресурс и вопросы надежности. Альтернативой машинным методам являются безмашинные методы энергоразделения. К ним относятся вихревые, волновые, резонансные, эжекционные, пульсационные и некоторые другие. К достоинствам безмашинных методов энергоразделения можно отнести простоту изготовления, высокую надежность, низкую инерционность, отсутствие систем смазки, возможность работать в широком диапазоне температур рабочего тела. С другой стороны, им присущ и существенный недостаток, ограничивающий их применение в тепловых двигателях и установках – это высокие потери полного давления на выходе у горячего и холодного потоков.

Академик А.И. Леонтьев в 1997 году предложил новый способ энергоразделения газов, который позволяет сохранить полное давление одного из потоков. Принцип действия нового устройства энергоразделения основан на газодинамическом эффекте температурной стратификации: за счет диссипативных процессов в пограничном слое сжимаемого газа происходит искривление эпюры температуры торможения. Разность между температурой пристенного слоя газа и температурой торможения в основном потоке можно использовать для осуществления энергоразделения. Реализация эффекта температурной стратификации предполагается в устройстве безмашинного энергоразделения. Разделив имеющийся газовый поток с повышенным давлением на две части, один из потоков разгоняется в сопле Лаваля до сверхзвуковой скорости, а другой – дозвуковой высоконапорный поток – направляется с противоположной стороны от разделяющей потоки стенки. Со стороны сверхзвукового потока эпюра температуры торможения перераспределяется. Со стороны дозвукового потока температура стенки практически равняется температуре торможения. В результате взаимодействия через теплопроводную стенку в устройстве энергоразделения сверхзвуковой поток разогревается, а дозвуковой охлаждается.

Эффективность устройства определяется количеством теплоты, передаваемой через разделяющую потоки стенку. Удельный тепловой поток q зависит от коэффициента теплопередачи K и температурного напора между начальной температурой торможения потока T_0^* и адиабатной температурой стенки T_w^* со стороны сверхзвукового потока (1). Коэффициент теплопередачи определяется, прежде всего, коэффициентами теплоотдачи со стороны сверхзвукового $\alpha_{сверх}$ и дозвукового $\alpha_{доз}$ потоков. Температурный напор можно

выразить через коэффициент восстановления температуры r , который показывает долю кинетической энергии потока, переходящей в тепло на стенке. Как показано в ряде работ, эффективность энергоразделения существенно образом зависит от коэффициентов восстановления температуры r и теплоотдачи α . Причем режим максимальной эффективности энергоразделения соответствует минимальному значению r и максимальному значению α .

$$q = K(T_0^* - T_w^*) = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{сверх}} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{mat}} + \frac{1}{\alpha_{доз}}} T_0^* (1-r) \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \lambda^2 \quad (1)$$

Для повышения количества передаваемого тепла в устройстве необходимо уменьшить коэффициент восстановления температуры, например, путем формирования поверхностей особой формы с пониженной адиабатной температурой стенки. Другим направлением повышения эффективности энергоразделения является интенсификация теплоотдачи в дозвуковом и сверхзвуковом каналах устройства энергоразделения. Интенсификация теплоотдачи в сверхзвуковых потоках пока не является объектом пристального внимания исследователей, в отличие от дозвуковых потоков, где методы интенсификации хорошо известны и активно применяются на практике. Объясняется это тем фактом, что любое внесение конструктивных изменений в сверхзвуковой канал с целью интенсификации теплоотдачи сопровождается образованием ударных волн и локальных отрывных течений. Согласно результатам многочисленных исследований взаимодействия ударной волны с пограничным слоем, отрыв пограничного слоя от стенки и его последующее присоединение увеличивает интенсивность теплоотдачи на стенке пропорционально градиенту статического давления. При этом влияние ударных волн и отрывных течений на коэффициент восстановления температуры, который наряду с коэффициентом теплоотдачи определяет эффективность энергоразделения, менее исследовано в литературе.

Целью данной работы является поисковое исследование методов снижения адиабатной температуры стенки и увеличения коэффициента теплоотдачи в сверхзвуковом потоке и применение данных эффектов для повышения эффективности работы устройства безмашинного энергоразделения.

Эта цель достигается решением следующих **задач**:

1. Разработка методики проведения экспериментального исследования тепловых и динамических параметров в потоке сжимаемого газа на сверхзвуковой аэродинамической установке непрерывного действия.

2. Реализация данной методики в виде экспериментального стенда, ориентированного на решение задач, возникающих при моделировании тепловых и динамических процессов в сверхзвуковом канале устройства безмашинного энергоразделения потоков.

3. Исследование отдельных аспектов, определяющих эффективность процесса в устройстве безмашинного энергоразделения, таких как влияние инициированных ударных волн и отрывного течения за ребром на адиабатную температуру стенки, коэффициент восстановления температуры и интенсификацию теплоотдачи на плоской стенке.

4. Применение результатов исследований на плоской стенке к течению в сверхзвуковом канале устройства безмашинного энергоразделения. Определение эффектов нагрева и охлаждения потоков в устройстве энергоразделения с гладким сверхзвуковым каналом и при наличии в канале ребер – генераторов ударных волн.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Адаптирована методика проведения экспериментальных исследований тепловых и динамических параметров сверхзвукового газового потока при наличии ударных волн и отрывных течений на стационарном и нестационарном режимах работы аэродинамической установки.

2. Методика реализована в виде экспериментального стенда, оборудованного современными средствами автоматизации, зондовым оборудованием, бесконтактными оптическими и тепловизионными средствами визуализации картины течения, ориентированного на моделирование тепловых и динамических процессов при течении потока сжимаемого газа в широком диапазоне чисел Маха.

3. Проведено исследование влияния падающей ударной волны и отрывного течения за ребром на адиабатную температуру стенки, коэффициент восстановления температуры и интенсификацию теплоотдачи – параметры, определяющие эффективность процесса безмашинного энергоразделения.

4. Впервые определены абсолютные значения эффекта нагрева сверхзвукового потока и охлаждения дозвукового потока в рамках сравнительного исследования устройства безмашинного энергоразделения при наличии в сверхзвуковом канале ударных волн и при их отсутствии в гладком канале.

5. Экспериментально зафиксирован эффект локального увеличения адиабатной температуры стенки в области падения ударной волны на плоскую стенку. При течении сверхзвукового потока в отрывной области за ребром обнаружено уменьшение адиабатной температуры стенки. Показано, что изменение адиабатной температуры стенки оказывает значительное влияние на величину коэффициента теплоотдачи при течении сжимаемого газа. Учет данных эффектов позволяет повысить точность определения коэффициента теплоотдачи при взаимодействии падающей ударной волны со стенкой и в области отрывных течений за преградами.

Практическая значимость

Результаты проведённых исследований представлены в виде таблиц и графиков зависимости исследуемых величин. Полученные данные могут быть использованы в инженерных расчётах устройств, основанных на эффекте безмашинного энергоразделения, при проектировании современного высокоэффективного теплообменного оборудования и средств тепловой защиты, а также при исследовании аэродинамического нагрева и закономерностей теплоотдачи в сверхзвуковых потоках. Представленные методики исследования коэффициентов восстановления температуры и теплоотдачи могут быть использованы для последующего решения задач по оптимизации конструкции устройства энергоразделения.

Апробация работы

Основные результаты были представлены на конференциях: 15th International Heat Transfer Conference (Kyoto, Japan, 2014); 8th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer (Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2015), XIV и XV Минском международном

форуме по теплообмену (Минск, Беларусь, 2012, 2016); XII, XIII и XV Международных школах-семинарах «Модели и методы аэродинамики» (Евпатория, 2012, 2013, 2015); международная конференция «VIII Окуневские чтения» (Санкт-Петербург, 2013); VIII Международном Аэрокосмическом Конгрессе IAC'2015 (Москва, 2015); XXII Международной конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность Не-За-Те-Ги-Ус» (Звенигород, 2016); XIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2014); V и VI Российской национальной конференции по теплообмену РНКТ (Москва, 2010, 2014); XI Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015); XVII - XX школах-семинарах под руководством академика А.И. Леонтьева (Жуковский, 2009, Звенигород, 2011, 2015, Орехово-Зуево, 2013); VI-VIII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2012-2015); XVII школе-семинаре «Современные проблемы аэрогидродинамики» (Туапсе, 2014); конференции «Ломоносовские чтения» МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, 2012-2016); конференции-конкурсе молодых ученых МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, 2010-2015).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 44 научные работы (16 статей, 28 тезисов докладов и материалов конференций), из них 4 статьи в журналах из списка ВАК.

Личный вклад автора

Диссертационная работа выполнялась в Межвузовской научно-учебной лаборатории «Термогазодинамика» (МГУ-МГТУ) НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова. Автором создан экспериментальный стенд для исследования тепловых и динамических параметров газового потока на базе сверхзвуковой аэродинамической установки непрерывного действия. При непосредственном участии автора разработана методика проведения экспериментального исследования, произведены монтаж и тарировка сенсорного оборудования стенда. Автор принимал участие в разработке, отладке и тестировании программ автоматизации эксперимента и обработки опытных данных в среде LabView. Проведены экспериментальные исследования по двум различным методикам тепловых и динамических параметров потока сжимаемого газа при обтекании плоской теплоизолированной стенки и наличии воздействий в виде инициированной ударной волны и отрывного течения за ребром. Проведено экспериментальное исследование влияния на эффект безмашинного энергоразделения генерации ударных волн в сверхзвуковом канале устройства. Получены данные по значению адиабатной температуры стенки и коэффициента восстановления температуры на стационарном режиме в области взаимодействия ударной волны с пограничным слоем и в отрывной области за ребром. Получены данные по адиабатной температуре стенки, коэффициенту восстановления температуры и интенсификации теплоотдачи при отрывном течении на плоской стенке за ребром в сравнении с обтеканием гладкой стенки. Получены значения нагрева сверхзвукового потока и охлаждения дозвукового при наличии в сверхзвуковом канале устройства ударных волн и при их отсутствии в гладком канале.

Структура и объем работы. Текст диссертации изложен на 164 страницах и состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованной литературы и

приложения из 2 частей. Работа иллюстрирована 97 рисунками и 7 таблицами. Библиография имеет 148 наименований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментального исследования влияния падающей ударной волны на адиабатную температуру стенки и коэффициент восстановления температуры на стационарном тепловом режиме.

2. Результаты экспериментального исследования влияния отрывного течения на адиабатную температуру стенки и коэффициент восстановления температуры на стационарном тепловом режиме.

3. Результаты экспериментального исследования адиабатной температуры стенки, коэффициентов восстановления температуры и интенсификации теплоотдачи при течении сверхзвукового потока за ребром на нестационарном тепловом режиме.

4. Результаты сравнительного экспериментального исследования устройства безмашинного энергоразделения потоков с генераторами ударных волн в сверхзвуковом канале и при их отсутствии в гладком канале.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Вводится понятие безмашинного энергоразделения и приводится ряд известных и наиболее распространенных методов энергоразделения, включая вихревые, волновые, резонансные, эжекционные, пульсационные и некоторые другие. Основное внимание уделено методу безмашинного энергоразделения, предложенному академиком Леонтьевым А.И., основанному на эффекте газодинамической температурной стратификации в потоке сжимаемого газа. Из обзора работ в разделе 1.2 следует, что наиболее ответственной частью рассматриваемого устройства энергоразделения, определяющей его эффективность, является сверхзвуковой канал. Показано, что для повышения эффекта энергоразделения необходимо либо интенсифицировать теплоотдачу, либо уменьшить коэффициент восстановления температуры по сверхзвуковой стороне. В разделе 1.3 обзора представлен анализ влияния различных факторов на коэффициент восстановления, включая числа Прандтля, Маха, Рейнольдса, продольный градиент давления, изменение формы и рельефа обтекаемой поверхности. Отмечается, что в случае установки в сверхзвуковом канале устройства различных интенсификаторов теплоотдачи (выступов, канавок, лунок) неизбежно возникнут ударные волны и локальные зоны отрыва пограничного слоя. В разделе 1.4 обзора показано, что в отрывной области интенсивность теплоотдачи может возрасти многократно. Однако в этом случае актуальным остается вопрос влияния возникающих ударных волн и отрывных течений на коэффициент восстановления температуры, который наряду с теплоотдачей, определяет эффективность устройства энергоразделения. В разделе 1.5 из проведенного анализа работ сделан вывод о необходимости дальнейших исследований в этой области.

ГЛАВА 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТЕНДОВ, ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В разделе 2.1 приводится описание экспериментального стенда для исследования тепловых и динамических параметров в потоке сжимаемого газа на стационарном тепловом режиме. Исследования проводились на сверхзвуковом аэродинамическом стенде непрерывного действия (**Рис. 1**). Скорость потока в рабочей части трубы менялась с помощью регулируемого плоского сверхзвукового сопла в пределах $M=1.7...3.5$. Давление торможения P_0^* варьировалось от 5 до 7 атм, температура торможения менялась в диапазоне $T_0^*=283\div 298$ К. Максимальный расход воздуха через установку составлял до 10 кг/с.

Экспериментальная модель представляла собой плоскую модель из оргстекла – материала с низким коэффициентом теплопроводности $\lambda=0.19$ Вт/(м·К). Использование такого материала позволило считать стенку теплоизолированной. Модель устанавливалась на нижней стенке рабочей части аэродинамической установки параллельно основному потоку. На первом этапе (**Рис. 1**) на верхней стенке рабочей части аэродинамической установки перед моделью устанавливался генератор ударной волны – стальной клин с углом раскрытия 22° . На втором этапе исследований на нижней стенке перед моделью устанавливалась преграда – металлическое ребро под углом 90° к потоку. Регистрация всех измеряемых параметров производилась после установления стационарного теплового режима. Время выхода модели на стационарный тепловой режим составляло 15-20 минут.

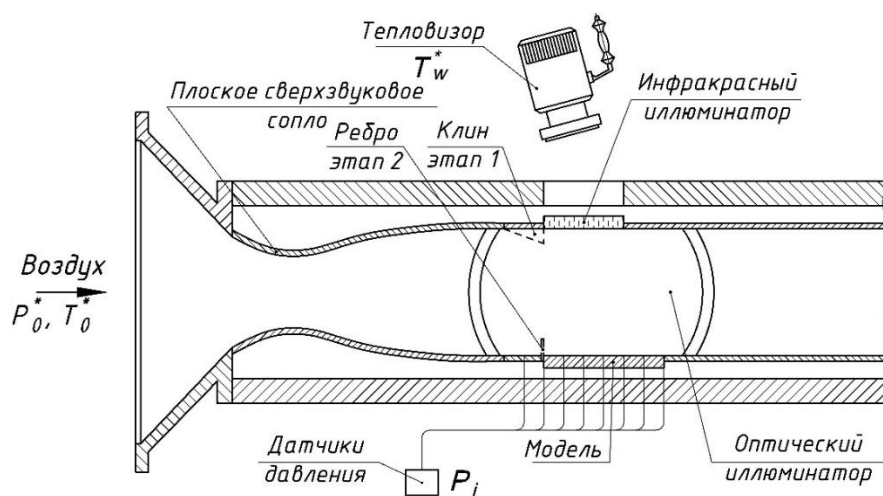


Рис. 1. Схема проведения экспериментального исследования на стационарном тепловом режиме: T_0^* – полная температура набегающего потока; T_w^* – адиабатная температура стенки; P_0^* – полное давление в ресивере; P_i – статическое давление на стенке

Верхней стенкой рабочей части аэродинамической установки является инфракрасный иллюминатор, изготовленный из монокристалла KCl (при исследовании взаимодействия ударной волны с пограничным слоем) и поликристалла ZnSe (при исследовании отрывного течения). Эти материалы прозрачны для инфракрасной области спектра. При помощи тепловизора

(тепловизионная камера Flir ThermoCAM SC3000, Швеция) через инфракрасный иллюминатор фиксировалось температурное поле модели.

В разделе 2.2 приводится описание измерительно-регистрающей системы. Исследования проводились с использованием зондового оборудования, систем регистрации данных National Instruments, автоматизированных программ опроса и обработки показаний сенсорных устройств в среде LabView, оптических методов визуализации картины течения и бесконтактных тепловизионных методов фиксации температурных полей. В разделе 2.2 также приводится краткое описание кодов программ тарировки и проведения эксперимента в среде LabView, схемы которых вынесены в Приложение А диссертации.

В разделе 2.3 описана методика расчета основных параметров потока в сверхзвуковой аэродинамической установке, включая расчет чисел Маха в невозмущенном потоке и за ударной волной, особенности определения температуры адиабатной стенки и коэффициента восстановления температуры по локальным параметрам и параметрам набегающего потока:

$$r = 1 - \frac{T_0^* - T_w^*}{T_0^*} \cdot \left(\frac{2}{(\gamma - 1) \cdot M^2} + 1 \right) \quad (2)$$

В разделе 2.4 приводится описание экспериментального стенда и методики исследования параметров теплообмена на нестационарном режиме. Методика проведения исследования заключалась в регистрации изменения параметров газа от момента запуска аэродинамической установки в течение 90 секунд с частотой 1 Гц. Скорость охлаждения пластины отслеживалась с помощью запрессованных на поверхности модели термодатчиков. Полученные данные позволили восстановить тепловой поток на стенке, решая одномерное уравнение теплопроводности в полубесконечном теле при изменяющемся тепловом потоке на стенке:

$$q(\tau) = \frac{\sqrt{\rho_{mat} \lambda_{mat} C_p}}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{dT_w(\tau)}{(t - \tau)^{1/2}} d\tau \quad (3)$$

Значение адиабатной температуры стенки определялось с помощью экстраполяции линейной аппроксимации графика функции безразмерного теплового потока Ω (4) от отношения температуры стенки к температуре торможения (T_w/T_0^*). На пересечении с осью абсцисс достигается режим нулевого значения теплового потока, что и соответствует значению адиабатной температуры стенки. При этом тангенс угла наклона полученного линейного графика позволяет оценить безразмерный критерий теплоотдачи St.

$$\Omega = \frac{q}{\rho_0 w_0 C_p T_0^*} = St \frac{T_w^*}{T_0^*} - St \frac{T_w}{T_0^*} \quad (4)$$

Описанная процедура позволила в одном эксперименте определить температуру адиабатной стенки (а значит, и коэффициент восстановления температуры) и коэффициент теплоотдачи. Методика использована при исследовании влияния отрывного течения за ребром на коэффициент

восстановления температуры и интенсификацию теплоотдачи в сравнении с обтеканием гладкой стенки. Была проведена серия экспериментов для гладкой стенки и при течении за ребром высотой от 2 до 8 мм.

В разделе 2.5 приводится описание методики сравнительного экспериментального исследования устройства безмашинного энергоразделения с генераторами ударных волн в сверхзвуковом канале и при их отсутствии в гладком канале. Экспериментальные исследования проводились на стенде с прототипом устройства безмашинного энергоразделения (Рис. 2). Рабочая часть установки (сверхзвуковая) была выполнена коническо-цилиндрической (конусность 1:50). Общая длина рабочей части канала – 700 мм, начальный диаметр – 6 мм. Длина конического участка – 400 мм, цилиндрического – 300 мм. Исследованные числа Маха на входе в рабочий участок – 1.9 и 2.5. Температура в форкамере установки и на входе в дозвуковой канал поддерживалась одинаковой (25.5, 40 и 70°C). Давление торможения поддерживалось равным 12 атм при работе с соплом $M=1.9$ и 16.9 атм при $M=2.5$. Расход через сверхзвуковой канал оставался постоянным в течение каждого пуска (около 45 г/с). Расход воздуха через дозвуковой канал варьировался относительно расхода по сверхзвуковому каналу в диапазоне от 0 до 0.9. Материал разделяющей потоки стенки – латунь ($\lambda \approx 110$ Вт/м·К). Конические ребра (генераторы ударных волн) устанавливались в сверхзвуковом канале на длине 100, 200 и 300 мм от среза сопла.

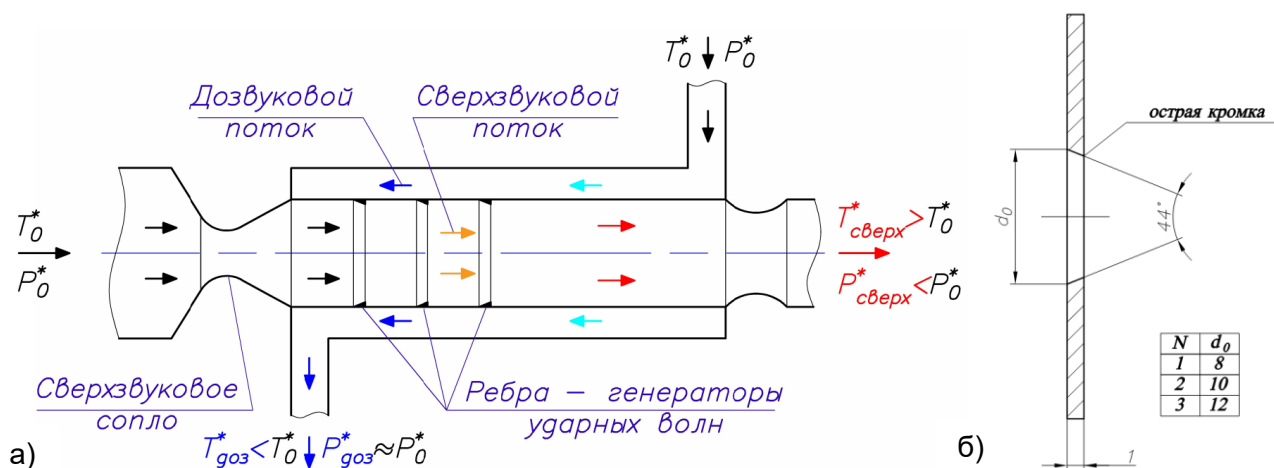


Рис. 2. Схема экспериментального исследования устройства безмашинного энергоразделения противоточной компоновки с ребрами – генераторами ударных волн в сверхзвуковом канале (а); чертеж ребра с основными геометрическими размерами (б)

С целью исследования влияния длины рабочего участка на эффект энергоразделения последний цилиндрический участок сверхзвукового канала (от 600 до 700 мм) был заменен на аналогичный, но сделанный из нетеплопроводного материала – капролона (полиамида) с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{мат} = 0.29$ Вт/(м·К). Такой подход позволил без значительных изменений в конструкции установки провести ряд исследований эффекта энергоразделения на длине 600 мм и сравнить их с данными для основного канала длиной 700 мм. По длине дозвукового канала были установлены турбулизаторы потока в виде круговых кольцевых выступов высотой 1 мм. Использование данных интенсификаторов теплоотдачи было

обосновано на предыдущем этапе исследования устройства безмашинного энергоразделения, поэтому данная конфигурация была использована в настоящем исследовании. Соответствующие потери полного давления дозвукового потока измерялись с помощью зонда на выходе из канала.

В разделе 2.6 представлена методика расчета основных параметров газового потока в устройстве безмашинного энергоразделения. Среди них – абсолютные эффекты нагрева сверхзвукового и охлаждения дозвукового потоков, особенности расчета расхода воздуха по каждому каналу устройства.

В разделе 2.7 приводится расчет неопределенностей измерений основных определяемых в эксперименте параметров (Таблица 1).

Таблица 1

Значения неопределенностей основных величин, определяемых в эксперименте

Методика проведения исследования	$(U_M)_{0.95}$, %	$(U_r)_{0.95}$, %	$(U_{Re})_{0.95}$, %	$(U_{St})_{0.95}$, %	$(U_a)_{0.95}$, %
Стационарный режим в сверхзвуковом потоке (раздел 2.1)	1.2	1.6	2.7	–	–
Нестационарный режим в сверхзвуковом потоке (раздел 2.4)	1.2	0.8	2.7	9.5	9.6
Стационарный режим в устройстве энергоразделения (раздел 2.5)	1.2	–	2.7	–	–

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В разделе 3.1 представлены результаты исследования тепловых и динамических параметров в потоке сжимаемого газа на стационарном тепловом режиме. Основному исследованию предшествовала серия экспериментов на пластине без вносимых в поток возмущений. В подразделе 3.1.1 представлены результаты исследования на гладкой стенке. Экспериментальная величина r при обтекании пластины без вносимых возмущений попадает в область значений 0.885 ± 0.010 , что соответствует результатам многочисленных экспериментальных исследований различных авторов. В диапазоне исследованных чисел Маха (1.75÷3.5) влияния числа Маха на коэффициент восстановления не выявлено. В связи с тем, что температура стенки снижается по длине модели, коэффициент восстановления также уменьшается с увеличением числа Рейнольдса в исследованном диапазоне $10 \times 10^6 \dots 35 \times 10^6$. Однако, как и в большинстве исследований других авторов, уменьшение лежит в пределах точности эксперимента.

В подразделах 3.1.2 и 3.1.3 представлены результаты исследований с искусственно инициированной ударной волной (**Рис. 3, б**) и отрывным течением за ребром (**Рис. 3, в**). Как видно из **Рис. 4, б**) в области падения ударной волны на стенку наблюдается увеличение адиабатной температуры в сравнении со случаем обтекания гладкой стенки без вносимых возмущений в поток. После локального увеличения температура уменьшается до значения безотрывного обтекания стенки. Как отмечалось в разделе 1.4 обзора литера-

турных источников, похожий эффект был отмечен в работе по изучению трехмерного взаимодействия ударных волн с турбулентным пограничным слоем. В абсолютном значении (Кельвинах), данное увеличение составляет до 2%.

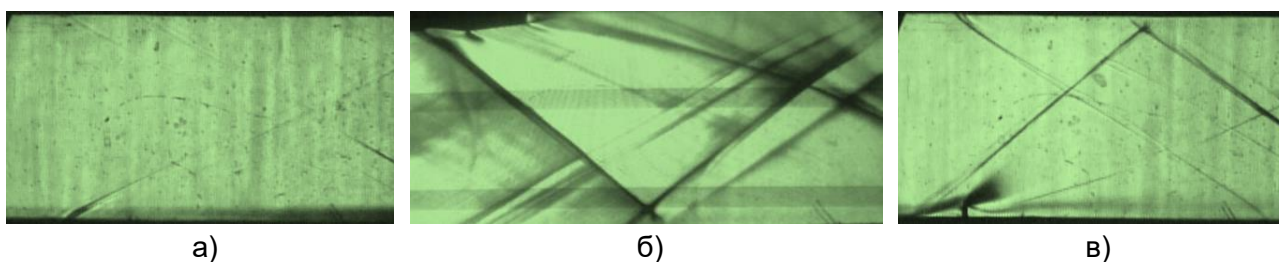


Рис. 3. Теневые фотографии, полученные с помощью прибора Теплера ИАБ-451, при обтекании гладкой стенки (а), при падающей ударной волне (б) и при течении за ребром (в)

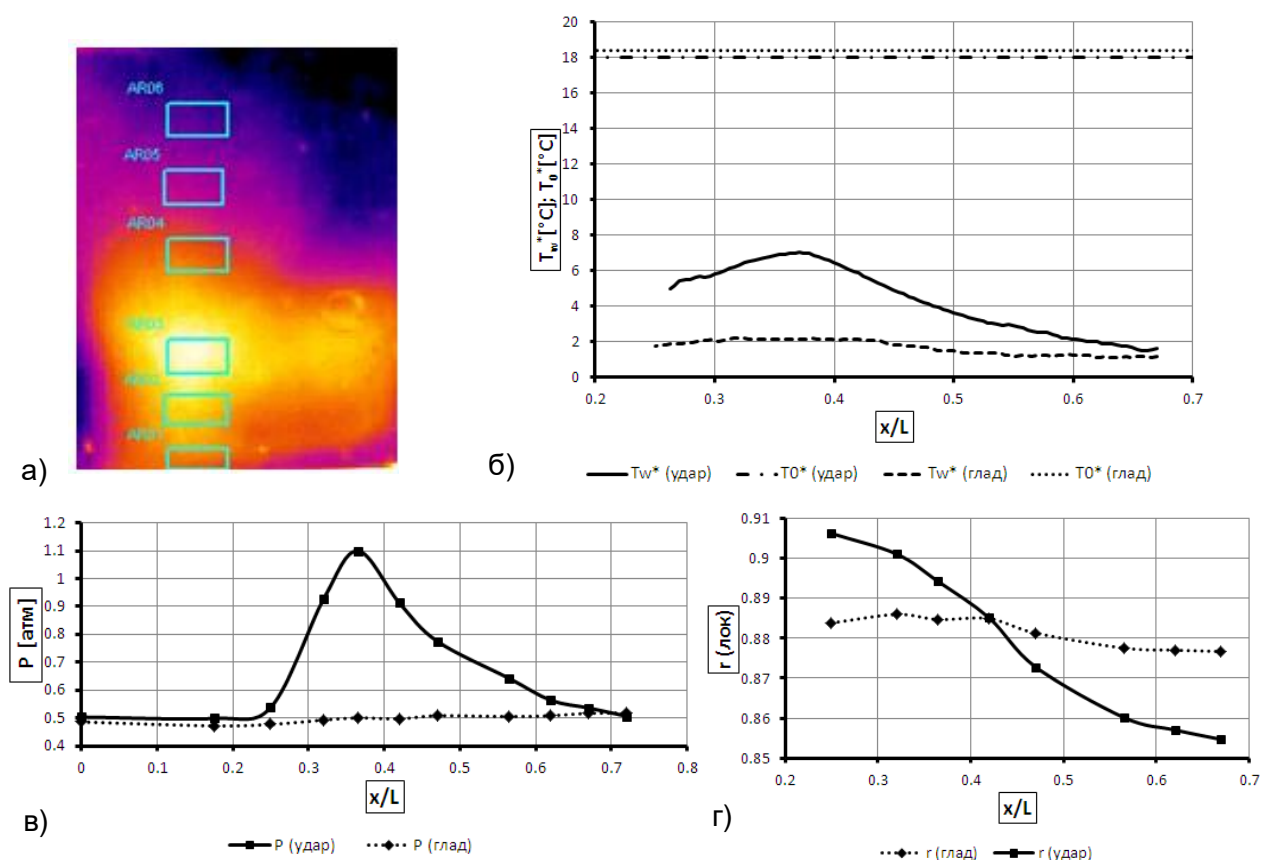


Рис. 4. Снимок тепловизора области падения ударной волны на стенку (а) и графики распределения адиабатной температуры стенки T_w^* , температуры торможения потока T_0^* (б), статического давления на стенке P (в) и коэффициента восстановления γ при расчете по локальным параметрам “лок” (г) вдоль безразмерной координаты x/L на режимах с ударной волной “удар” и при безотрывном обтекании пластины “глад” (б)

На **Рис. 4, в)** представлены результаты измерений распределения статического давления в области падения ударной волны на стенку. Угол раскрытия клина в проведенном эксперименте был выбран таким образом, что интенсивность падающей ударной волны превышала критический перепад давления в пограничном слое, соответствующего данному числу Маха набегающего потока. Вследствие этого в

месте падения ударной волны происходил отрыв пограничного слоя с образованием вихревой зоны на поверхности модели.

Область максимального увеличения статического давления соответствует и максимуму адиабатной температуры стенки (Рис. 4, а). На Рис. 4, б) показаны график распределения коэффициента восстановления температуры по длине модели при расчете по локальным параметрам « r (лок)». График для r (набег) практически повторяет контур графика адиабатной температуры стенки, поскольку в данном случае не учитывается изменение числа Маха в области взаимодействия. На графике r (лок) выделяются две области. Первая – до падения ударной волны на стенку, где коэффициент восстановления выше, чем значение на гладкой стенке. И вторая – после ударной волны, где наблюдается уменьшение коэффициента восстановления ниже значений, характерных для обтекания гладкой стенки.

На Рис. 5, а) представлен график распределения адиабатной температуры стенки при течении за ребром в сравнении с обтеканием гладкой стенки при одинаковом числе Маха набегающего потока. Как и ожидалось, исходя из результатов раздела 3.1.2 и данных

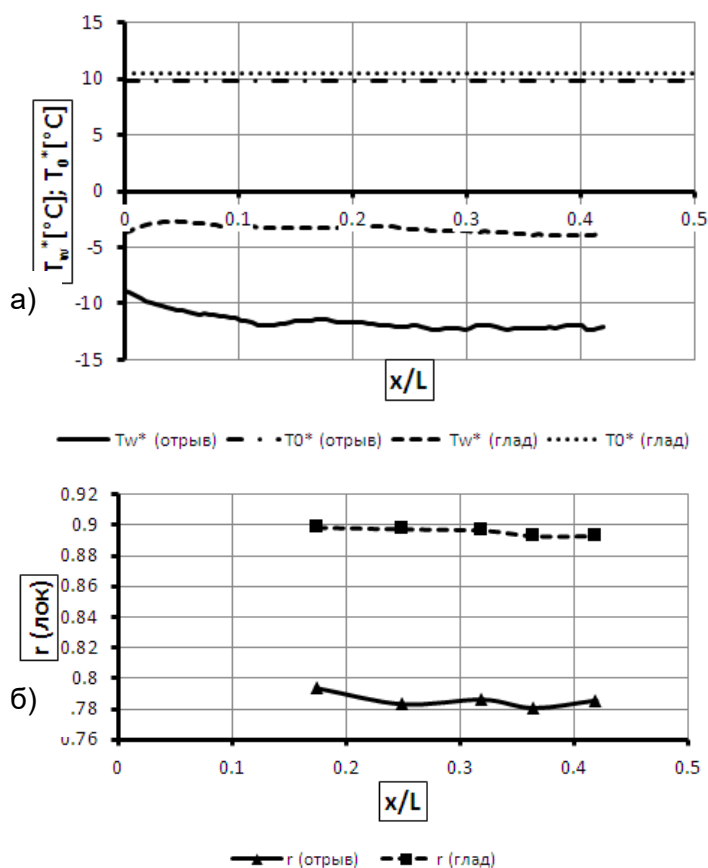
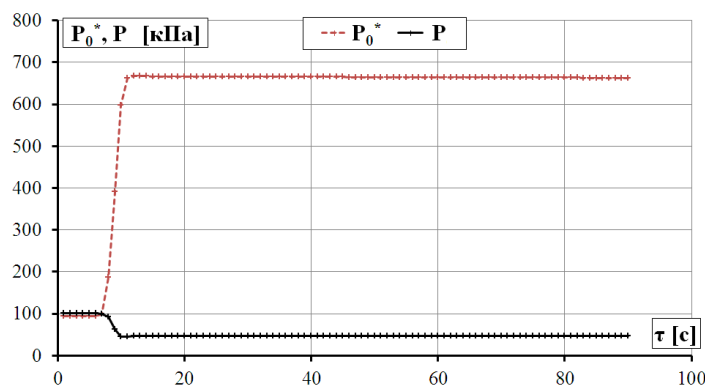


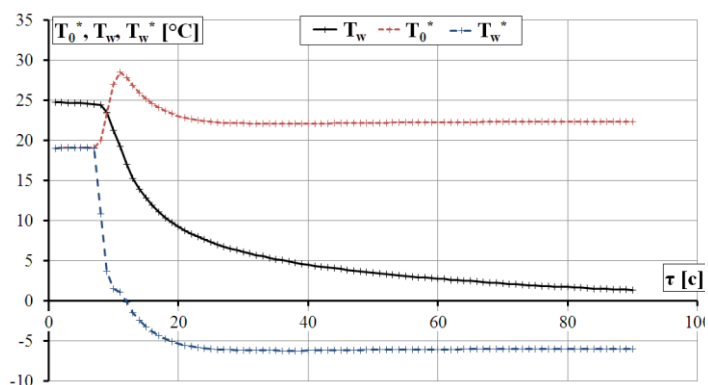
Рис. 5. Графики распределения адиабатной температуры стенки T_w^* , температуры торможения потока T_0^* (а) и коэффициента восстановления температуры r (б) вдоль безразмерной координаты x/L на режимах отрывного течения за ребром высотой 8 мм (отрыв) и при безотрывном обтекании гладкой стенки (глад) при числе Маха $M_0=2.0$

литературного обзора (раздел 1.3), в отрывной области за ребром наблюдается значительное уменьшение адиабатной температуры стенки в сравнении с безотрывным обтеканием гладкой стенки без вносимых возмущений в поток. В абсолютном значении (в Кельвинах) уменьшение составляет до 4%. При этом разность между температурой торможения и адиабатной температурой стенки увеличивается за ребром на величину до 70% в сравнении с гладкой стенкой.

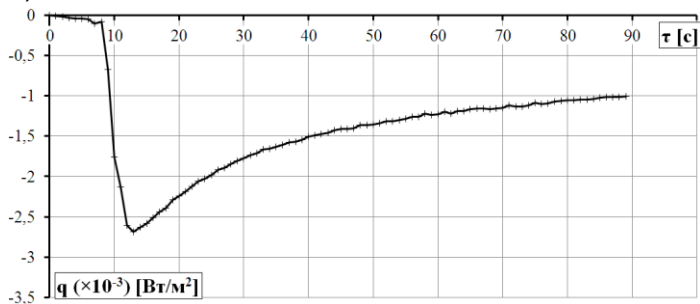
Уменьшение коэффициента восстановления, при расчете по параметрам набегающего потока, составило до 8% в сравнении с обтеканием гладкой стенки. Если учитывать потерю скорости за головной ударной волной, то можно рассчитать коэффициент восстановления по локальным параметрам (Рис. 5, б). В этом случае уменьшение составило до 12% в сравнении с обтеканием гладкой стенки без вносимых возмущений в поток (до значения 0.78).



а)



б)



в)

Рис. 6. Графики изменения полного давления в форкамере, статического давления на стенке канала (а), температуры торможения, температуры стенки, адиабатной температуры стенки (б) и удельного теплового потока (в) в процессе запуска и проведения эксперимента на сверхзвуковой аэродинамической установке

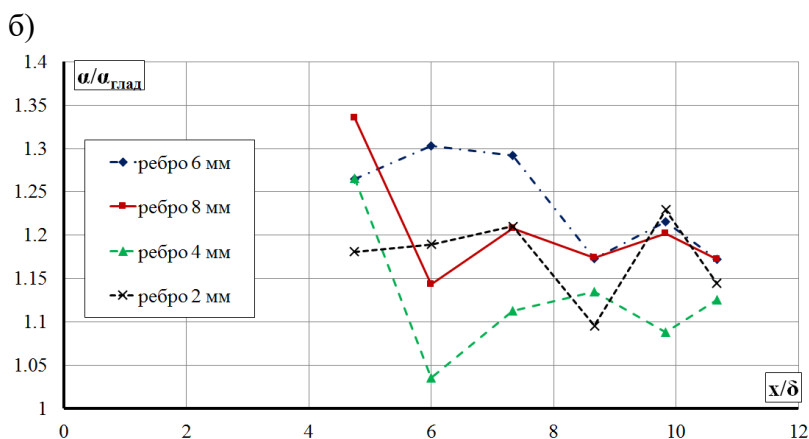
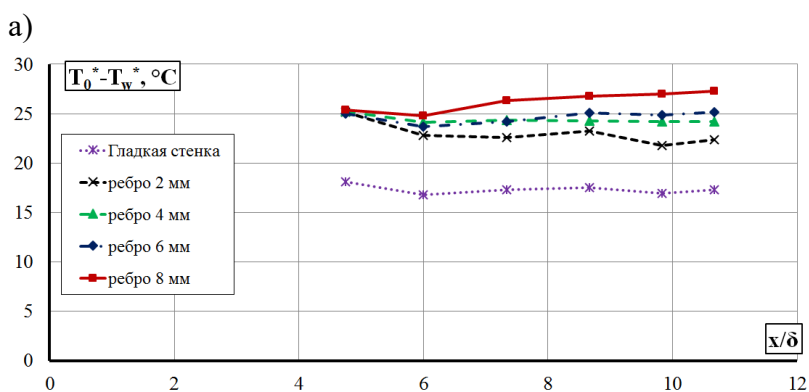
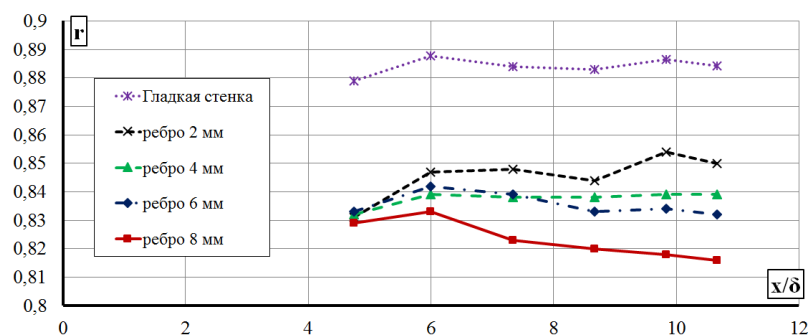
В разделе 3.2 представлены результаты исследования тепловых и динамических параметров в потоке сжимаемого газа на нестационарном режиме. На **Рис. 6, а)** представлен график изменения давления торможения и статического давления набегающего потока (на боковой стенке перед моделью) в процессе запуска аэродинамической установки. После открытия задвижки запуск происходит в течение около 4 секунд, после чего давление в потоке устанавливается и практически не изменяется в процессе проведения эксперимента. Соотношение полного и статического давлений позволяет определить число Маха набегающего потока – около 2.25.

На **Рис. 6, б)** представлен график изменения температуры торможения и температуры стенки в процессе запуска аэродинамической установки. Как видно, температура торможения в потоке устанавливается медленнее, чем давление (**Рис. 6, а)**, но также сохраняется практически постоянной в процессе проведения исследования. Стенка модели при этом охлаждается и в пределе может достигнуть значения адиабатной температуры, однако в данном эксперименте состояния теплового равновесия не достигается за время про-

ведения исследования (в отличие от постановки исследования раздела 3.1).

По темпу охлаждения модели с помощью интегрирования выражения (3) удастся построить график изменения теплового потока за время запуска и проведения эксперимента. Значение теплового потока оказывается отрицательным, поскольку тепло передается от стенки в пограничный слой. Сначала тепловой поток максимальный по модулю и постепенно уменьшается по мере приближения температуры стенки к температуре адиабатически заторможенного газа вблизи стенки.

Изменение коэффициента восстановления температуры r вдоль безразмерной длины модели x/δ (отношение координаты от начала модели на срезе сопла к толщине



в) **Рис. 7.** Графики изменения коэффициента восстановления температуры (а), разности между температурой торможения и адиабатной температурой стенки (б) и интенсификации теплоотдачи (в) вдоль безразмерной длины модели x/δ для безотрывного обтекания гладкой стенки ($Re_x=2.56 \cdot 10^7$) и при течении на плоской стенке за ребром при высотах ребра 2 мм ($Re_x=2.8 \cdot 10^7$), 4 мм ($Re_x=2.7 \cdot 10^7$), 6 мм ($Re_x=2.3 \cdot 10^7$) и 8 мм ($Re_x=2.85 \cdot 10^7$) при одинаковом числе Маха набегающего потока 2.25

высоте ребра 2 мм до 27 градусов при высоте ребра 8 мм. Таким образом, установка ребра привела к повышению температурного напора между температурой торможения и адиабатной температурой стенки на величину от 23 до 58%.

пограничного слоя в этом же сечении – 6 мм) при варьировании высоты ребра от 2 до 8 мм представлено на **Рис. 7, а)**. Зафиксировано уменьшение коэффициента восстановления на величину от 3.6% при высоте ребра 2 мм до 7.7% при высоте ребра 8 мм. При этом по мере удаления от преграды коэффициент восстановления температуры тем меньше, чем выше высота ребра. Данный эффект соответствует результатам ранее проведенных исследований по другой методике определения коэффициента восстановления на стационарном режиме (раздел 3.1.3). Похожий эффект уменьшения коэффициента восстановления в области отрыва пограничного слоя также был отмечен в ряде работ при исследовании отрывного сверхзвукового течения на цилиндре и конусе.

На **Рис. 7, б)** показано изменение разности между температурой торможения и адиабатной температурой стенки по длине модели. При обтекании гладкой стенки этот перепад составляет около 17 градусов. При течении за ребром разность температур увеличивается и составляет: от 21 градуса при

На **Рис. 7, в)** представлено отношение коэффициента теплоотдачи при течении за ребром к значению при обтекании гладкой стенки – $\alpha/\alpha_{\text{глад}}$. Сравнение режимов при варьировании высоты ребра проводилось при одинаковом числе Маха набегающего потока и температуре торможения. Аналогично результатам работ по обтеканию уступа и конуса, упоминаемых в разделе 1.4 обзора литературы, при течении сверхзвукового потока в отрывной области за ребром фиксируется увеличение коэффициента теплоотдачи. Максимальное увеличение коэффициента теплоотдачи составило около 34% (при высоте ребра 8 мм), при этом интенсификация на уровне 30% сохраняется только при высоте ребра 6 мм. Большая часть термодатчиков зафиксировала уровень интенсификации на уровне около 20% почти для всех высот ребра.

В разделе 3.3 представлены результаты сравнительного экспериментального исследования устройства безмашинного энергоразделения с генераторами ударных волн в

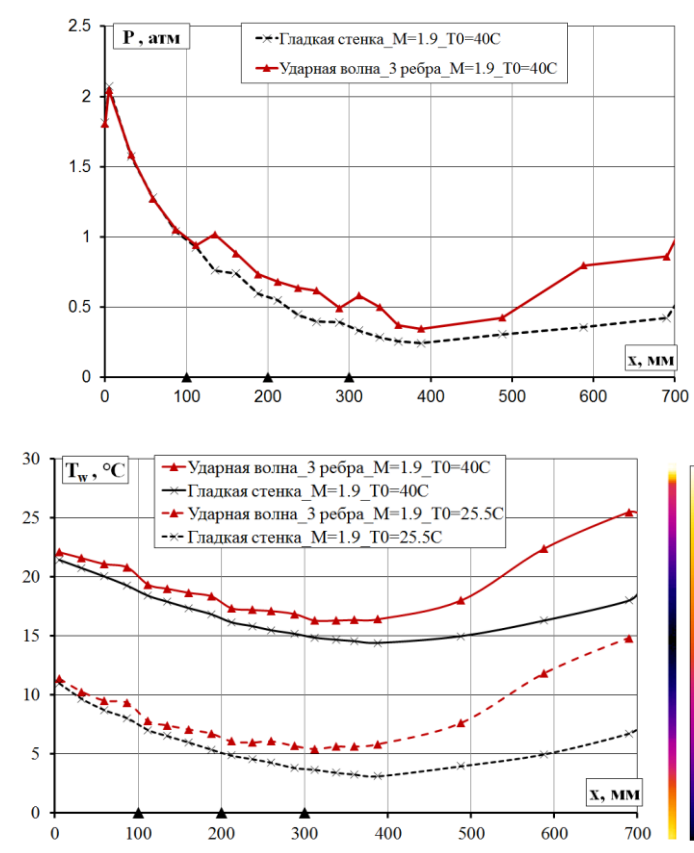


Рис. 8. Графики распределения статического давления (а) и температуры стенки сверхзвукового канала устройства энергоразделения (б) для двух конфигураций: «гладкая стенка» – безотрывное обтекание, «ударная волна» – канал с тремя ребрами по длине при варьировании температуры торможения (25.5°C и 40°C)

сверхзвуковом канале и при их отсутствии. На первом этапе (подраздел 3.3.1) проводилось исследование тепловых и динамических параметров газового потока в сверхзвуковом канале устройства энергоразделения (дозвуковой поток отсутствовал).

На графиках (**Рис. 8**) отчетливо видно влияние на динамические характеристики сверхзвукового потока установленных ребер на длине 100, 200 и 300 мм (от одного до трех ребер). Оно заключается в увеличении статического давления за местом установки ребра, начиная с расстояния 100 мм от среза сопла. Так, например, для конфигурации из трех ребер рост давления составил: за первым ребром – до 34%, за вторым ребром – до 55%, за третьим – до 75%. На цилиндрическом участке максимальное увеличение статического давления в оробренном канале составило до 2.2 раза. Несмотря на установленные ребра за счет расширения сверхзвукового канала частично компенсируется потеря скорости потока.

Таким образом, с помощью геометрического воздействия можно добиться сохранения разности скоростей между сверхзвуковым и дозвуковым потоками и, следовательно, эффект энергоразделения. Также в рамках эксперимента

варьировалась температура торможения в форкамере ($\sim 25.5^\circ\text{C}$ и $\sim 40^\circ\text{C}$), количество ребер (от одного до трех) и их расположение.

Далее с помощью тепловизора фиксировалось температурное поле наружной стенки сверхзвукового канала. Как видно из графика (**Рис. 8**), установка ребер по длине канала увеличивает адиабатную температуру стенки, уменьшая, таким образом, потенциал охлаждения дозвукового потока в устройстве энергоразделения. Локальное увеличение адиабатной температуры стенки наблюдается перед каждым ребром, что аналогично эффекту повышения коэффициента восстановления температуры перед ступенькой. Так, например, для трех ребер и температуры торможения $T_0^* = 40.6^\circ\text{C}$ увеличение адиабатной температуры в абсолютных значениях (Кельвинах) изменяется от долей процента на конечном участке канала и возрастает до 2.5% в конце цилиндрического участка. При этом температурный напор в устройстве энергоразделения ($T_0^* - T_w^*$) уменьшается уже в начале канала с ребрами на величину около 3% в сравнении с гладким каналом. Однако, суммарный эффект безмашинного энергоразделения зависит также от интенсивности теплопередачи через разделяющую потоки стенку – коэффициента теплоотдачи.

В подразделе 3.3.2 представлены результаты измерений эффектов нагрева сверхзвукового и охлаждения дозвукового потоков в устройстве энергоразделения относительно температуры торможения на входе в устройство (**Рис. 9**). Каждое значение разности температур представлено в зависимости от параметра μ , равного отношению расходов дозвукового потока $G_{\text{доз}}$ к сверхзвуковому $G_{\text{сверх}}$: $\mu = G_{\text{доз}}/G_{\text{сверх}}$.

На **Рис. 9**, а, б) показано сравнение трех режимов: разнонаправленное движение потоков с гладким сверхзвуковым каналом – «гладкая стенка_противоток», сонаправленное и разнонаправленное движение потоков с оребренным сверхзвуковым каналом – «канал с ребрами_противоток» и «канал с ребрами_прямоток». Эксперименты проводились с тремя кольцевыми ребрами, установленными на длине 100, 200 и 300 мм при числе Маха на срезе сопла 1.9 и температуре торможения 40°C . Как видно из **Рис. 9**, а, б), режим противотока работы устройства энергоразделения с ребрами в сверхзвуковом канале оказывается эффективнее, чем прямоток. В диапазоне исследованных значений относительного расхода нагрев в противоточном канале оказался больше, чем в прямоточном на величину от 6% до 16.7%, охлаждение – от 11.5% до 16.6%. Противоточная схема с гладким каналом показала наибольший эффект нагрева и охлаждения, хотя отличие от оребренного канала и незначительное и, как правило, находится в пределах точности термомпары ($\pm 0.85^\circ\text{C}$). Суммарный эффект энергоразделения на выходе из устройства для прямоточной схемы с оребрением составил от 11.4 до 13.9°C , для противоточной схемы с оребрением – от 12.4 до 16.1°C , и, наконец, для схемы с гладким сверхзвуковым каналом противоточной компоновки – от 12.7 до 20°C . Таким образом, суммарный эффект энергоразделения в противоточной схеме с оребрением оказалась эффективнее, чем прямоточная на величину до 16.6%. Конфигурации с гладким каналом показала больший эффект энергоразделения, чем с оребрением противоточной схемы, на величину до 4.8%. Как видно из **Рис. 9**, наиболее эффективно устройство энергоразделения работает на охлаждение дозвукового потока, причем эффективность возрастает при уменьшении относительного расхода по дозвуковой стороне устройства.

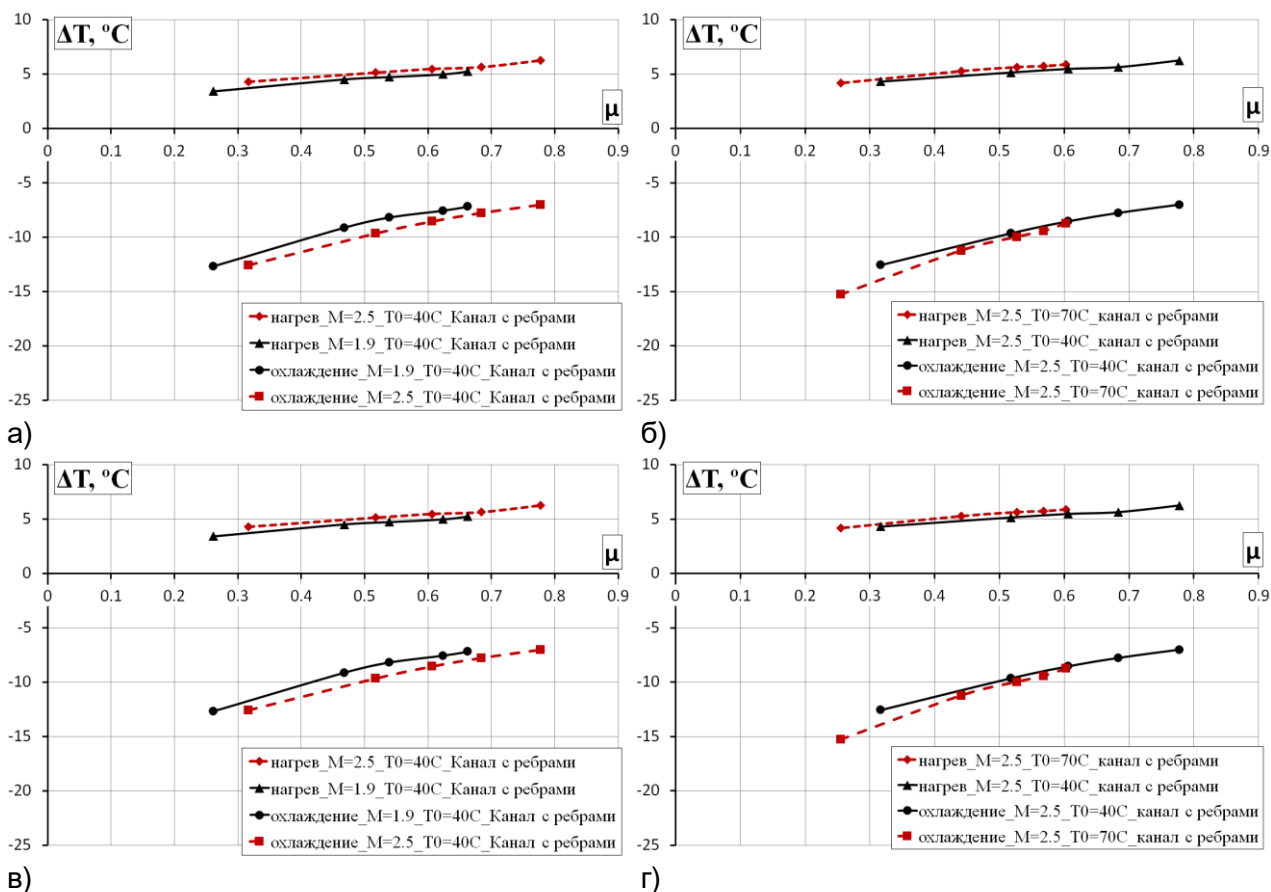


Рис. 9. Эффекты нагрева и охлаждения потоков ΔT на выходе из устройства энергоразделения с оребрением сверхзвукового канала в зависимости от отношения расхода дозвукового потока к сверхзвуковому μ : $T_0^* = 40$ °C, $M_0 = 1.9 / 2.5$ (а); $M_0 = 2.5$, $T_0^* = 40 / 70$ °C (б); $T_0^* = 40$ °C, $M_0 = 1.9 / 2.5$ (в); $M_0 = 2.5$, $T_0^* = 40 / 70$ °C (г)

В рамках эксперимента также проведено сравнение режима работы оребренного устройства энергоразделения с разными соплами, обеспечивающими числа Маха на срезе сопла 1.9 и 2.5 (Рис. 9, в). В ряде работ по исследованию эффекта безмашинного энергоразделения отмечается существование оптимальной приведенной скорости сверхзвукового потока рабочего тела с точки зрения увеличения количества теплоты, которое возможно передать от дозвукового потока к сверхзвуковому. С одной стороны, с увеличением скорости повышается температурный напор (уменьшается адиабатная температура), с другой стороны – начинает уменьшаться коэффициент теплоотдачи со стороны сверхзвукового потока. Как следует из Рис. 9, в), с увеличением числа Маха на входе от 1.9 до 2.5 наблюдается тенденция к повышению эффекта энергоразделения на выходе из устройства: в диапазоне относительного расхода $\mu=0.31\div 0.66$ увеличение составило от 9% до 13%.

Согласно соотношению для теплого потока в устройстве энергоразделения (1), с увеличением температуры торможения на входе эффект энергоразделения также должен повышаться. В рамках исследования оребренного устройства было выполнено сравнение двух режимов работы с начальными температурами 40°С и 70°С. Из графика на Рис. 9, г) видно, что повышение температуры прежде всего влияет на степень охлаждения дозвукового потока. В исследованном диапазоне относительного расхода дозвукового потока (0.31-0.61), увеличение эффекта энергоразделение составило от 4.3 до 9.4%.

Приложение состоит из двух частей. В приложении А представлены коды программы для тарировки и автоматизации проведения экспериментальных исследований в среде LabView. В Приложении Б представлен проект использования эффекта безмашинного энергоразделения для безогневого подогрева и редуцирования природного газа.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Создан экспериментальный стенд для исследования воздействия различных факторов на тепловые и динамические параметры в потоке сжимаемого газа с использованием систем регистрации данных National Instruments, автоматизированных программ опроса и обработки показаний сенсорных устройств в среде LabView, оптических методов визуализации картины течения и бесконтактных тепловизионных методов фиксации температурных полей. На стенде проводится лабораторная работа специального студенческого практикума 4 курса механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, выпущены методические указания.

2. Экспериментально зафиксировано увеличение адиабатной температуры стенки в области падения ударной волны на плоскую стенку на величину до 2% в абсолютном значении в сравнении с обтеканием гладкой стенки без вносимых возмущений в поток. Статическое давление в области падения ударной волны при этом выросло до 2.2 раза. Увеличение коэффициента восстановления температуры составило до 4.5% (до значения 0.92) при неопределенности измерения $\pm 1.6\%$. Разность между температурой торможения и адиабатной температурой стенки в области падения ударной волны уменьшается на величину до 30% в сравнении обтеканием гладкой стенки. Таким образом, уменьшается температурный напор и, соответственно, потенциал для безмашинного энергоразделения. С целью повышения точности определения коэффициента теплоотдачи в потоке сжимаемого газа при взаимодействии падающей ударной волны с пограничным слоем предложено учитывать полученное увеличение адиабатной температуры стенки и коэффициента восстановления в области взаимодействия.

3. В области отрывного течения за ребром зафиксировано уменьшение адиабатной температуры стенки в сравнении с обтеканием гладкой стенки на величину до 4% в абсолютном значении. Коэффициент восстановления температуры (неопределенность измерения $\pm 1.6\%$) при этом уменьшается на величину до 8% (до значения 0.82) при расчете по параметрам набегающего потока и до 12% (до 0.78) – при расчете по локальным параметрам. Разность между температурой торможения и адиабатной температурой стенки возрастает за ребром на величину до 70% в сравнении с обтеканием гладкой стенки. Данный эффект свидетельствует о том, что отрывные течения не только не снижают эффективность безмашинного энергоразделения, но и могут способствовать интенсификации данного процесса.

4. Представлена методика одновременного определения коэффициента восстановления температуры и коэффициента теплоотдачи в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа на нестационарном режиме в процессе запуска аэродинамической установки до выхода на стационарный тепловой режим. Методика применена к исследованию влияния отрывного течения за ребром на коэффициент

восстановления температуры и интенсификацию теплоотдачи в сравнении с обтеканием гладкой стенки. Подтвержден эффект уменьшения коэффициента восстановления при течении сверхзвукового потока за ребром, полученный на стационарном тепловом режиме. Уменьшение коэффициента восстановления температуры (неопределенность измерения $\pm 0.8\%$) при течении на плоской стенке за ребром составило от 3.6% при высоте ребра 2 мм до 7.7% при высоте ребра 8 мм в сравнении с безотрывным обтеканием гладкой стенки. Коэффициент теплоотдачи возрастает на величину до 33% для оребренной стенки в сравнении с гладкой (неопределенность измерения $\pm 9.6\%$). Максимальное увеличение числа Стэнтона наблюдалось при высоте ребра равной толщине пограничного слоя и составило от 29 до 42% (неопределенность измерения $\pm 9.5\%$). При течении за ребром разность между температурой торможения и адиабатной температурой стенки возрастает на величину от 23 до 58% в сравнении с режимом обтекания гладкой стенки. Таким образом, в области отрывного течения сверхзвукового потока за ребром зафиксировано одновременное уменьшение коэффициента восстановления температуры и интенсификация теплоотдачи, что способствует увеличению количества теплоты, передаваемой от дозвукового потока к сверхзвуковому в устройстве безмашинного энергоразделения.

5. Представлены результаты сравнительного экспериментального исследования устройства безмашинного энергоразделения с генераторами ударных волн в сверхзвуковом канале и при их отсутствии в гладком канале. В качестве генераторов ударных волн использовались кольцевые ребра, установленные в коническо-цилиндрическом сверхзвуковом канале устройства энергоразделения. Эффекты нагрева и охлаждения потоков на выходе из устройства сравнивались с данными, полученными при работе установки без генераторов ударных волн при одинаковых начальных параметрах газового потока. Показано, что установка ребер приводит к увеличению статического давления в канале (до 2.2 раза) и росту температуры стенки (в абсолютных значениях – до 2.5% в конце рабочего участка). Наибольший рост параметров наблюдается на цилиндрическом участке сверхзвукового канала. Установка ребер в коническо-цилиндрическом сверхзвуковом канале привела к уменьшению эффекта энергоразделения на выходе из устройства. Максимальное зафиксированное уменьшение суммарного эффекта энергоразделения составило около 11.5% для режима с числом Маха 2.5, температурой торможения 70°C в конфигурации сверхзвукового канала с тремя ребрами.

6. При уменьшении длины цилиндрического участка рабочего канала (с 300 до 200 мм) эффекты энергоразделения для гладкого и оребренного каналов практически сравнялись. Сделан вывод о целесообразности использования ребер в сверхзвуковом канале устройства энергоразделения в случае полностью расширяющегося канала без цилиндрических участков. Несмотря на уменьшение эффекта энергоразделения при возникновении ударных волн в сверхзвуковом канале, работоспособность устройства сохраняется. Этот факт может способствовать внедрению устройства в промышленности, поскольку устраняется риск потери работоспособности в случае непредвиденного возникновения ударных волн в сверхзвуковом канале устройства. В рамках эксперимента получено, что режим

противотока работы исследуемого устройства оказывается эффективнее, чем при прямотоке на величину до 16.6%. С увеличением числа Маха на входе от 1.9 до 2.5 эффект энергоразделения в канале с оребрением возрастает на величину до 13%. Повышение температуры торможения от 40 до 70°C также привело к увеличению эффекта энергоразделения на величину до 9.4%.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Журналы из перечня изданий, рекомендованных ВАК:

1. **Попович С.С.** Экспериментальное исследование влияния падающего скачка уплотнения на адиабатную температуру стенки в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа // Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 6. № 3. С.98-104.
2. **Попович С.С.** Экспериментальное исследование влияния ударных волн на эффект безмашинного энергоразделения газовых потоков // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 3. С. 64-80. DOI: 10.7463/0316.0835444.
3. **Виноградов Ю.А., Егоров К.С., Попович С.С., Стронгин М.М.** Исследование тепломассобмена на проницаемой поверхности в сверхзвуковом пограничном слое // Тепловые процессы в технике. 2010. Т. 1. № 1. С. 7-9.
4. **Попович С.С., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М.** Экспериментальное исследование возможности интенсификации теплообмена в устройстве безмашинного энергоразделения потоков // Вестник СГАУ. 2015. Т. 14. № 2. С. 159-169. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-2-159-169.

Другие издания:

5. **Popovich S.S., Egorov K.S., Vinogradov Yu.A.** Experimental research of adiabatic wall temperature influenced by separated supersonic flow // Proceedings of 15th International Heat Transfer Conference, IHTC-15-8962, 2014, 11 p.
6. **Popovich S., Strongin M., Vinogradov Yu., Zditovets A.** Experimental research of heat transfer augmentation technique in gas dynamic energy separation process // Proceedings of the 8th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2015. Begell House Inc. P. 865-868.
7. **Попович С.С.** Экспериментальное исследование возможности повышения эффективности работы устройства энергоразделения потоков инициацией ударных волн // Труды конференции-конкурса молодых ученых. М.: Издательство Московского университета, 2014. С. 183-191.
8. **Виноградов Ю.А., Егоров К.С., Попович С.С., Стронгин М.М.** Экспериментальное исследование влияния ударной волны на параметры теплоизолированной стенки // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XIX школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева. Издательский дом МЭИ, Москва, 2013. С. 186-190.
9. **Попович С.С., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М.** Экспериментальное исследование влияния отрывного сверхзвукового течения на температуру теплоизолированной стенки // Труды VI Российской национальной конференции по теплообмену. Издательский дом МЭИ, Москва, 2014. С. 262-265.

10. **Попович С.С., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М.** Экспериментальное исследование влияния ударных волн на эффективность устройства безмашинного энергоразделения потоков // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XX школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева. Издательский дом МЭИ, Москва, 2015. С. 237-241.
11. **Попович С.С., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М.** Экспериментальное исследование возможностей интенсификации теплообмена в устройстве газодинамической температурной стратификации // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Сборник докладов. Издательство Академии наук РТ, Казань, 2015. С. 3089-3091.
12. **Виноградов Ю.А., Попович С.С., Стронгин М.М.** Экспериментальное исследование влияния ударной волны на адиабатную температуру стенки в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа // Восьмой Международный Аэрокосмический Конгресс IAC'15. АИР Москва, 2015. С. 76-78.
13. **Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Попович С.С., Стронгин М.М., Леонтьев А.И.** Исследование воздействия ударных волн на температурный перепад в устройстве безмашинного энергоразделения потоков // Будущее машиностроения России. Сборник докладов VIII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. 2015. С. 511-515.
14. **Попович С.С., Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Стронгин М.М.** Экспериментальное исследование механизма влияния генерации ударных волн на температурный перепад в устройстве газодинамической температурной стратификации // XV Минский международный форум по тепломассообмену, 2016. 1-28. С. 1-6.
15. **Виноградов Ю.А., Попович С.С., Стронгин М.М.** Методика экспериментального определения адиабатной температуры стенки и коэффициента теплоотдачи при сверхзвуковом течении в области отрыва пограничного слоя // Фундаментальные основы баллистического проектирования: V Всероссийская научно-техническая конференция: сб. материалов. Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2016. С. 52-55.

Попович Сергей Станиславович

ВЛИЯНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН НА ЭФФЕКТ БЕЗМАШИННОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ

Автореферат

Подписано в печать 06.10.2016		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л.	Усл.-печ.л.
Тираж 100 экз.	Заказ N	Бесплатно

ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2