



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**федеральное государственное автономное**  
**образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Санкт-Петербургский политехнический**  
**университет Петра Великого»**  
**(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)**

**ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,**  
**ОКПО 02068574**

Политехническая ул., 29, С.-Петербург, 195251

Телефон (812) 297-20-95, факс 552-60-80

E-mail: office@spbstu.ru

02.12.2016 № К-114

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**ОТЗЫВ**  
официального оппонента

на диссертацию **С.С.ПОПОВИЧА**  
«Влияние ударных волн на эффект безмашинного энергоразделения», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

К наиболее эффективным методам энергоразделения традиционно относят машинные воздействия на поток посредством турбин и компрессоров. К недостаткам такого решения можно отнести высокую стоимость, малый ресурс и недостаточную надёжность оборудования. Альтернативой являются безмашинные методы энергоразделения, которым посвящена диссертация.

При несомненных достоинствах безмашинного энергоразделения (простоте, надёжности и малой инерционности установок, отсутствии подвижных частей, отказе от смазки, широком диапазоне температур) их применение сдерживают низкая энергетическая эффективность и значительные выходные потери полного давления в горячем и холодном потоках.

В 1997 г. А.И. Леонтьев предложил новый способ энергоразделения газов, позволяющий сохранить полное давление одного из потоков. Устройство, названное «трубой Леонтьева», стало предметом многочисленных исследований, однако до настоящего времени в его конструкции и рабочих процессах остаётся много нерешённых проблем. Сказанное позволяет считать тему диссертации С.С. Поповича вполне **актуальной**.

### **Содержание работы**

**Во введении** сформулированы актуальность работы, ее теоретическая и практическая значимость, цели и задачи.

**В первой главе** представлен литературный обзор. Приводится ряд известных методов энергоразделения, подробно описан эффект газодинамического энергоразделения, дан обзор исследований коэффициентов восстановления температуры и теплоотдачи в сверхзвуковом потоке при наличии падающей ударной волны и отрывного течения. В заключение сформулированы основные цели работы.

**Во второй главе** описаны экспериментальные стенды, измерительное оборудование и методики, позволяющие исследовать тепловые и динамические параметры в стационарном и нестационарном режимах. Особо интересен стенд для сравнительного исследования устройств энергоразделения с генераторами ударных волн в сверхзвуковом канале. В заключение рассчитаны неопределенности измерений для основных параметров.

**Третья глава** содержит результаты экспериментального исследования влияния падающей ударной волны и отрывного течения за ребром на параметры теплообмена. Полученные результаты сопоставлены с известными экспериментальными и расчётными данными. Представлены результаты сравнительного эксперимента, в котором изучены энергоразделители с генераторами ударных волн в сверхзвуковом канале и при их отсутствии в гладком канале. Оценены эффекты нагрева сверхзвукового и охлаждения дозвукового потоков на выходе из энергоразделителя при изменении длины канала, числа Маха и температуры торможения на входе.

**В приложение** вынесены коды программы для градуировки и автоматизации экспериментов в среде LabView, а также проект использования безмашинного энергоразделения для безогневого подогрева и редуцирования природного газа.

**Заключение** весьма подробно описывает полученные результаты.

**Выводы** информативны и отражают содержание диссертационной работы.

**К достоинствам** работы отношу:

1. Подробный обзор литературных источников по исследованию коэффициента восстановления температуры и методам безмашинного энергоразделения.
2. Экспериментальное исследование, выполненное на современном уровне и расширившее представления о проблеме. Диссертант использует современные средства регистрации (включая тепловизор, датчики давления Honeywell и ИКД) и визуализации течения (теневую фотографию). Опыты автоматизированы, их результаты обработаны в среде LabView. Параметры теплообмена в сверхзвуковом потоке исследованы в стационарном и нестационарном режимах.
3. Установленное в работе С.С. Поповича заметное увеличение температурного напора между температурой торможения и адиабатной температурой стенки (за счет ее снижения) в сверхзвуковом потоке за преградой составило до 70% по сравнению с обтеканием гладкой стенки. Это не только позволяет повысить эффективность энергоразделения, но и представляет интерес при изучении теплообмена в сверхзвуковом потоке.
4. Применение результатов исследования в реальном энергоразделителе. Впервые выявленное в работе влияние генераторов ударных волн на уровень энергоразделения представляет как научный, так и прикладной интерес.
5. Достоверность результатов, подтверждённая метрологической обработкой по действующему стандарту.
6. Внедрение полученных результатов в учебный процесс (в виде студенческого практикума с использованием созданного стенда).

**Научная новизна результатов** состоит в следующем:

1. Предложена методика для изучения тепловых и динамических параметров сверхзвукового потока при наличии ударных волн и отрывных течений в стационарном и нестационарном режимах, в широком диапазоне чисел Маха.
2. Изучено влияние падающей ударной волны и отрывного течения за ребром на адиабатную температуру стенки, коэффициент восстановления температуры и интенсификацию теплоотдачи – параметры, определяющие эффективность энергоразделения.
3. Получены новые данные по уровням нагрева и охлаждения потоков при наличии в сверхзвуковом канале ударных волн и при их отсутствии в гладком канале.
4. Экспериментально зафиксировано локальное повышение адиабатной температуры в области падения на плоскую стенку ударной волны. При сверхзвуковом течении в отрывной области за ребром обнаружено снижение адиабатной температуры стенки. Показано, что изменение адиабатной температуры стенки при течении сжимаемого газа заметно влияет на коэффициент теплоотдачи.

**На защиту выносятся** следующие экспериментальные положения:

1. Результаты исследования влияния падающей ударной волны на адиабатную температуру стенки и коэффициент восстановления температуры в стационарном режиме.
2. Результаты исследования влияния отрывного течения на адиабатную температуру стенки и коэффициент восстановления температуры в стационарном режиме.
3. Результаты исследования адиабатной температуры стенки, коэффициентов восстановления температуры и интенсификации теплообмена при течении сверхзвукового потока за ребром в нестационарном режиме.
4. Результаты сравнительного исследования энергоразделителя с генераторами ударных волн в сверхзвуковом канале и при их отсутствии в гладком канале.

**Практическая значимость работы** определяется тем, что полученные данные могут быть использованы в инженерных расчётах безмашинных энергоразделителей, при проектировании высокоэффективных теплообменников и средств тепловой защиты, а также при исследовании аэродинамического нагрева и теплообмена в сверхзвуковых потоках.

**Обоснованность и достоверность выводов** определяется тем, что основные положения, представленные на защиту, получены на основе фундаментальных физических закономерностей и обширного материала экспериментов. Использованы многократно апробированные расчётные методы, дана оценка неопределённости для основных экспериментальных данных.

По теме диссертации **опубликовано** 44 научные работы (16 статей, 28 тезисов докладов и материалов конференций), включая 4 статьи в журналах из списка ВАК. Материалы диссертации доложены на российских и международных конференциях.

**Автореферат** в достаточной мере отражает содержание диссертации и выводы, к которым пришёл автор.

#### **Замечания и пожелания**

По тексту диссертации и автореферата можно сделать следующие замечания.

1. Проблему взаимодействия ударных волн и отрывных течений с пограничным слоем можно было раскрыть полнее, сопоставив результаты экспериментов с данными численного моделирования.
2. При исследовании падающей на стенку ударной волны следовало экспериментально определить коэффициент теплоотдачи в области взаимодействия волны с пограничным слоем. Это позволило бы лучше обосновать предложение автора об учете изменения адиабатной температуры стенки при определении коэффициента теплоотдачи в сверхзвуковом потоке.
3. Течение сверхзвукового потока при взаимодействии падающей ударной волны и наличии отрыва за преградой (раздел 3.1) предполагается двумерным и стационарным, что требует обоснования.
4. Неясно, как автор при расчете неопределенности (стр.88) использовал величину, названную «погрешностью хромель-копелевой термопары», определенную по «данным производителя термопарных блоков National Instruments» в размере  $\pm 0,85^{\circ}\text{C}$  и  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  для разных температурных диапазонов. В неопределенности измерения температуры термопарой, среди прочего, важны ошибки, связанные с заделкой спая и теплоотводом по термоэлектродам.

5. В графических материалах и тексте нарушен ГОСТ 8.417-2002. Например, на рисунках 1.10 и др. дробная часть числа отделена от целой точкой. Подписанные подписи и ссылки на рисунках нарушают требования ГОСТ Р 7.0.11—2011 и ГОСТ 2.105-95.

### Выводы и заключение по диссертации

В целом диссертационная работа С.С. Поповича является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны, а именно: выполнено поисковое исследование методов снижения адиабатной температуры стенки и увеличения коэффициента теплоотдачи в сверхзвуковом потоке и применение полученных результатов для повышения эффективности работы безмашинного энергоразделителя.

Диссертация С.С. Поповича «Влияние ударных волн на эффект безмашинного энергоразделения» по содержанию соответствует пп. 5, 6 и 9 паспорта специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника. Она отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней (п. 9), утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а её автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент:

профессор кафедры

«Теплофизика энергетических установок»

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования

«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,

доктор технических наук,

член Международной академии холода

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29

Тел.: +7 (921) 5907421

e-mail: andrey.mityakov@gmail.com

  
01.12.2016.

Митяков

Андрей

Владимирович

Подпись официального оппонента

Митякова Андрея Владимировича удостоверяю:

Учёный секретарь Учёного Совета

ФГАОУ ВО «СПбПУ»,

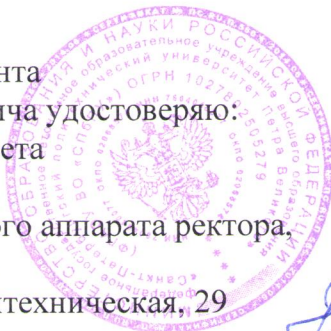
руководитель административного аппарата ректора,

кандидат филологических наук

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29

Тел.: +7 (812) 591 67 21

e-mail: zhivulin@spbstu.ru





Живулин

Владислав

Петрович

