

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Доброва Юрия Владимировича на тему: «Исследование нестационарного теплового потока на поверхности обтекаемого тела в условиях локального энергоподвода», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

В диссертации обсуждаются возможности активного управления сверхзвуковыми течениями с помощью локального подвода энергии с целью снижения силовых и тепловых нагрузок на поверхность летательного аппарата. Источником подводимой энергии является газовый разряд. Основное внимание уделяется определению нестационарных тепловых потоков на поверхности тела. **Актуальность** темы диссертации для современных аэрокосмических приложений связана с поиском альтернативных путей управления высокоскоростными аппаратами, снижения сопротивления, улучшения аэродинамического качества, уменьшения нагрева поверхности при сверхзвуковых полетах. Данные вопросы в настоящее время активно изучаются в ведущих мировых научных центрах, при этом чаще всего исследования проводятся численными методами. Особенностью представленной диссертации является сочетание экспериментального и вычислительного подходов, что особенно важно для валидации существующих и новых теоретических моделей.

**Основные результаты.** Первая глава диссертации носит вводный характер, в ней приведен обзор литературы, обсуждаются методы измерения нестационарных быстропотекающих процессов в газах. Рассмотрены методики снижения сопротивления плохообтекаемых тел с помощью локального подвода энергии, показано повышение эффективности таких методик с ростом числа Маха потока. Обоснован выбор экспериментальных методов, использованных далее в диссертационной работе.

Во второй главе подробно описана экспериментальная база и методика проведения эксперимента по формированию плотностной неоднородности в набегающем сверхзвуковом потоке с помощью импульсного межэлектродного разряда. Рассмотрены методы визуализации потока. Достигнута повторяемость реализации разряда и синхронизация с оптическими системами измерения. Основным результатом является методика обработки измерений локального теплового потока с помощью градиентного датчика на основе висмута, методика калибровки датчика, определение погрешности косвенных измерений.

Третья глава посвящена численному решению ряда задач, необходимых для интерпретации экспериментальных результатов: 1) задача о течении в ударной трубе; 2) задача об эволюции температуры и давления после энергосложения в покоящейся газе; 3) задача об обтекании клина сверхзвуковым потоком при различных способах задания локального подвода энергии: с помощью задания плотностной неоднородности и с помощью непосредственного вложения энергии в поток, приводящего к образованию ударных волн. Задача о клине решалась в двумерной и трехмерной постановке. Отмечается качественное совпадение результатов, при этом обнаружены заметные отличия в величине теплового потока и коэффициента лобового сопротивления. Показано,



что, как и в случае плохообтекаемого тела, при взаимодействии ударной волны с плотностной неоднородностью образуется вихрь, движущийся вдоль поверхности клина. Изучено влияние угла наклона нагретой области на тепловой поток и коэффициент лобового сопротивления.

Наибольший интерес представляет последняя глава, в которой проводится систематическое экспериментальное исследование динамики локального теплового потока на поверхности обтекаемого клина при локальном подводе энергии в сверхзвуковое течение с помощью импульсного межэлектродного разряда. Проводится сравнение измеренных газодинамических параметров с результатами численного моделирования, продемонстрировано хорошее совпадение результатов. Показано, что в зависимости от расположения разряда можно менять локальный тепловой поток на поверхности обтекаемого тела. Даны рекомендации по снижению тепловой нагрузки на поверхность клина.

Результаты, полученные в главах 2-4, являются **новыми**. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений. **Достоверность** полученных экспериментальных результатов обоснована повторяемостью эксперимента, использованием проверенных методик и современных измерительных систем; достоверность теоретических выводов подтверждается валидацией моделей на основе сравнения численного решения и результатов эксперимента, хорошим качественным совпадением результатов. **Теоретическая значимость** диссертационного исследования заключается в определении особенностей сверхзвукового течения у поверхности клина при локальном подводе энергии в поток. **Практическая ценность** результатов состоит в создании надежной методики обработки экспериментальных данных, полученных при помощи градиентного датчика теплового потока, рекомендациях по снижению нагрева поверхности аппарата, обтекаемого сверхзвуковым потоком.

По содержанию диссертации можно сделать следующие **замечания**:

1. Размерность величины, приведенной на рис. 2.11 и называемой тепловым потоком, – Вт. Это не тепловой поток. В связи с этим при анализе методики обработки эксперимента в п.2.7 возникает вопрос: как соотносятся истинные значения теплового потока с оценкой величины неопределенности косвенных измерений в  $3393 \text{ Вт/м}^2$ ?
2. В третьей главе отсутствует анализ сеточной сходимости численных решений. Следовало бы прокомментировать, из каких соображений выбиралось число ячеек в сетке, какова погрешность полученных численных решений.
3. Система уравнений RANS, используемая при численном моделировании, не включает уравнения для плотности энергии электронов; при этом в эксперименте для локального подвода энергии используется разряд. Стоило обосновать, почему используется именно такая упрощенная постановка. Также при записи системы уравнений не приведены сведения об источнике в уравнении энергии (который обозначен  $q$ , как и тепловой поток).
4. Экспериментальные исследования быстропротекающих процессов в газах (в частности, измерения тепловых потоков в ударных трубах) проводятся в МГУ И.А.Знаменской с



соавторами. Следовало бы упомянуть и проанализировать эти методы в обзоре литературы.

5. Замечания редакционного плана: в тексте есть опечатки, не везде расшифрованы обозначения. Например, на рис. 1.1 не указано, что такое величина  $Q_0$ , какова ее размерность; на рис. 1.4-1.5 не поясняется, к чему отнесены время, давление, коэффициент сопротивления, на рис. 1.7 не расшифрованы обозначения и т.д.

Указанные замечания не снижают научной ценности работы в целом. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, вносящей вклад в развитие плазменной аэродинамики, содержит новые результаты, представляющие научный и практический интерес. Работа выполнена на высоком экспериментальном и теоретическом уровне, имеет продуманную структуру, хорошо оформлена. Краткие заключения по главам облегчают восприятие материала. Особо следует отметить подробный анализ современных исследований по теме диссертации, представленный в первой главе.

Основные результаты, выносимые на защиту, опубликованы в восьми статьях в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК и/или проиндексированных в международных базах цитирования Scopus и Web of Science. Работа прошла апробацию на международных конференциях и семинарах ведущих научных центров.

Диссертация Доброва Юрия Владимировича на тему: «Исследование нестационарного теплового потока на поверхности обтекаемого тела в условиях локального энергоподвода» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Добров Юрий Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не установлены.

Член диссертационного совета

доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры гидроаэромеханики СПбГУ

Кустова Е.В.

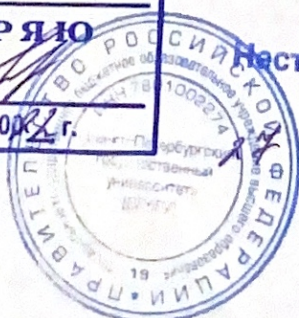
Дата 27.10.2022

Подпись руки *Нестерова Л.И.*

**УДОСТОВЕРЯЮ**

Специалист  
по кадровой работе

« 27 » 09 2022 г.



Нестерова Л.И.

ОКТ 2022