

Evolution of Thermal Fields on a Streamlined Surface Heated by a Shock Wave and Plasma of a Pulsed Surface Discharge

I. A. Znamenskaya¹, M. I. Muratov¹, M. A. Bogdanova²,
E. A. Karnozova¹, N. N. Sysoev¹

¹ *Lomonosov Moscow State University, Physics Faculty, Moscow, 119991, Russia*

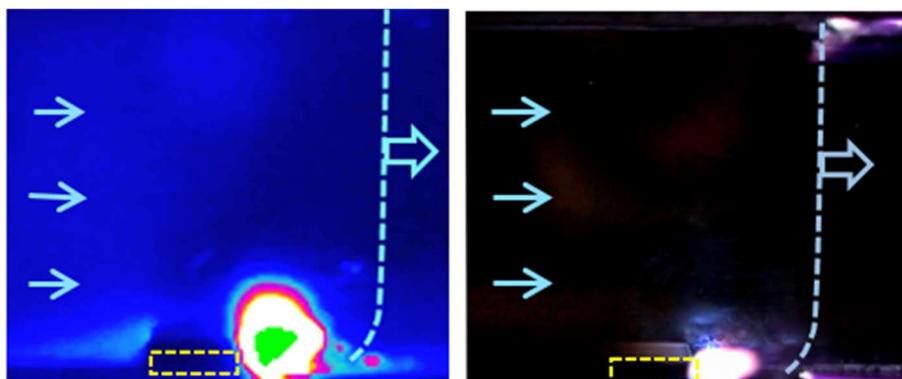
² *Lomonosov Moscow State University,
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991, Russia*

znamen@phys.msu.ru

Abstract

An experimental study was conducted to investigate the thermal fields in the boundary layer along the wall of a gas-dynamic channel near a rectangular insert. The study focused on conditions following the passage of a shock wave and during the initiation of a pulsed surface discharge in the flow. The heating and cooling dynamics of the region affected by the pulsed sliding discharge along the dielectric surface in the flow separation zone were examined. Registration of the radiation of the channel walls in the range of 1.5–5.1 μm was carried out through the side windows of the test (discharge) chamber of the shock tube, transparent both for the thermal radiation of the walls and for the visible radiation of the discharge. It is shown that the cooling of the insert region, heated by a localized nanosecond discharge in the leeward zone, occurs in less than a millisecond; on the shock-heated surface of the channel in the windward zone of the insert, cooling occurs in several milliseconds. The study measured radiative, conductive and convective components of heat fluxes in various supersonic flow configurations. The experiments were conducted in the range of shock wave Mach numbers $M_0 = 2 - 4$ and high-speed flows behind them, respectively, with Mach numbers $M = 1.1 - 1.4$.

Keywords: surface sliding discharge, plasma localization, thermal fields, infrared thermography, shock waves.



Thermographic image upon initiation of a surface discharge in a flow behind shock wave and corresponding integral images of plasma visible glow

УДК 533.9.072

Эволюция тепловых полей на обтекаемой поверхности, нагретой ударной волной и плазмой импульсного поверхностного разряда

И.А. Знаменская¹, М.И. Муратов¹, М.А. Богданова²,
Е.А. Карнозова¹, Н.Н. Сысоев¹

¹ Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
Россия, Москва, 119991, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
МГУ имени М.В. Ломоносова,
Россия, Москва, 119991, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

znamen@phys.msu.ru

Аннотация

Проведено экспериментальное исследование тепловых полей в пограничном слое на стенке газодинамического канала около прямоугольной вставки после прохода ударной волны и при инициировании импульсного приповерхностного разряда в потоке. Исследован процесс нагрева и остывания зоны локализации импульсного скользящего по поверхности диэлектрика разряда в области отрыва потока. Регистрация излучения стенок канала в диапазоне $1.5 \div 5.1 \text{ }\mu\text{m}$ велась через боковые окна рабочей (разрядной) камеры ударной трубы, прозрачные как для теплового излучения стенок, так и для видимого излучения разряда. Показано, что остывание нагретой локализованным наносекундным разрядом области вставки в подветренной зоне происходит за время менее миллисекунды; на ударно-нагретой поверхности канала в наветренной зоне перед вставкой остывание происходит за несколько миллисекунд. Регистрировались излучательная, теплопроводностная, конвективная составляющие тепловых потоков в различных конфигурациях сверхзвуковых течений. Эксперименты проведены в диапазоне чисел Маха ударных волн $M_0 = 2 \div 4$ и высокоскоростных потоков за ними соответственно с числами Маха $M = 1.1 \div 1.4$.

Ключевые слова: поверхностный скользящий разряд, локализация плазмы, тепловые поля, инфракрасная термография, ударные волны.

1. Введение

Использование плазменных технологий для управления процессами тепло-массообмена в газодинамических потоках активно применяется во многих технических системах. Важной задачей является оптимизация течений в различных элементах конструкций высокоскоростных летательных аппаратов, реализуемая с помощью локализованного подвода энергии на основе плазменных актуаторов [1–4]. При этом для оценки эффективности работы плазменной системы необходима информация о скорости преобразования энергии разряда в поток газа, а также величина разрядной энергии, конвертируемой в тепловую.

Определение конвективного и теплопроводностного нагрева стенок канала в пограничном слое высокоскоростного потока имеет как фундаментальное значение, связанное с изучением процессов высокоскоростной газодинамики и физико-химической кинетики [5], так и прикладное значение, связанное с обеспечением оптимальных условий обтекания поверхностей, а также горения в камерах сгорания летательных аппаратов [6, 7]. Нагрев обтекаемой

поверхности может быть вызван как ударно-волновым воздействием высокоскоростного газодинамического потока, так и воздействием плазменных образований различной длительности и конфигураций – при иницировании разрядов в потоке. В задачах плазменного воздействия на потоки наибольший интерес представляет быстрый нагрев газа – на наносекундном масштабе времен. При протекании тока импульсного разряда одновременно идет прямое воздействие короткоживущего плазменного образования на газодинамический поток и поверхность (субмикросекундный диапазон) [8]. Затем в микросекундном и миллисекундном временных диапазонах реализуются: нагрев поверхности ударно-волновыми, газодинамическими процессами, вызванными импульсным энерговыделением в потоке. Далее нагретая плазмой и потоком поверхность остывает.

Для определения пространственно-временных характеристик динамических тепловых полей были использованы тепловизионные устройства: методом панорамной термографической визуализации нестационарных тепловых полей проводилась их регистрация на торцевой стенке прямоугольного канала ударной трубы. Полученные термограммы внешней стороны торцевой стенки канала дают представление о распределении интенсивности теплового излучения для различных моментов времени после отражения ударной волны. Измерения для падающей ударной волны с числом Маха $M = 1.5$ показывают, что интенсивность излучения различна для разных областей исследованного участка ударной трубы – зоны ядра потока и у границ торцевой вставки.

Целью настоящей работы является инфракрасное панорамное исследование эволюции тепловых полей и сравнительный анализ пространственно-временных характеристик областей, связанных с газодинамическим и с плазменным механизмами нагрева участков стенки газодинамического канала с прямоугольной вставкой. Управление высокоскоростным потоком газа включает в себя ударно-волновое воздействие на поток, изменение тепловых потоков на обтекаемых поверхностях, энергоподвод. При этом контролируются зоны отрыва пограничного слоя, ламинарно-турбулентный переход, положение скачков и др. В общем случае механизмы воздействия импульсного (субмикросекундного) приповерхностного энергоподвода в поток на основе электрического разряда различны на разных временных масштабах.

2. Инфракрасная термография в анализе тепловых полей быстропротекающих процессов в газе

Инфракрасная термография в приложениях газовой динамики получила наибольшее распространение в задачах, связанных с изучением конвективного теплообмена при стационарных процессах в аэродинамических. Основная часть исследований, проводимых сегодня, состоит из работ по регистрации ламинарно-турбулентного перехода [9, 10] или теплового потока от обтекаемых моделей для оптимизации геометрии летательных аппаратов как с точки зрения газовой динамики, так и с точки зрения теплообмена по обтекаемой поверхности. Диагностика процессов, происходящих в плазменных устройствах, может также осуществляться по результатам регистрации динамики тепловых полей с помощью инфракрасной термографии [11, 12]. В задачах с использованием плазменных актуаторов регистрируемые тепловые поля дают информацию о пространственном и временном распределении температуры диэлектрика [13] как в покоящейся газе, так и в условиях набегающего потока.

Термографические исследования нестационарных тепловых потоков с обтекаемых поверхностей проводились на ударном стенде УТРО-3 (рис. 1) – однодиафрагменная ударная труба с камерами высокого и низкого давлений, разделенными полимерной диафрагмой. Варьирование толщины разрываемой диафрагмы, а также подбор отношения давлений между камерами позволяло устанавливать числа Маха падающей ударной волны в диапазоне $M = 2 \div 4$ при начальном давлении воздуха $5 \div 30$ Торр. Измерение скорости падающей ударной волны производилось встроенными в камеру низкого давления разнесенными пьезоэлектрическими датчиками давления (рис. 1 А). Формирование плоского фронта ударной волны

завершалось на расстоянии порядка метра от точки разрыва диафрагмы. Скорость спутного потока за фронтом ударной волны оценивалось в диапазоне $630 \div 920$ м/с. В рабочей камере реализовалось однородное спутное течение. Максимальное число Рейнольдса потока, оцененное по ширине канала ударной трубы, составляло $Re \sim 10^5$. В камеру низкого давления вмонтирована рабочая (разрядная) камера, особенностью которой является наличие прозрачных в видимом и инфракрасном диапазоне боковых кварцевых окон, а также возможность инициирования импульсного поверхностного разряда (плазменный лист, скользящий по поверхности диэлектрика). В рабочей камере на нижней стенке было установлено прямоугольное препятствие размером $2 \text{ мм} \times 48 \text{ мм} \times 6 \text{ мм}$ из диэлектрического материала поперек набегающему потоку (рис. 1 D). Длина камер высокого и низкого давления – 52 и 290 см соответственно; внутреннее сечение канала ударной трубы и рабочей камеры – 48×24 мм; размеры двух кварцевых окон – $170 \text{ мм} \times 16 \text{ мм} \times 24 \text{ мм}$. Рабочим и толкающим газами являлись воздух и гелий соответственно. Подключение датчиков к осциллографу (рис. 1 C) позволяло синхронизировать запуск регистрирующего тепловизионного оборудования или теневой регистрации с различными стадиями нестационарного газодинамического процесса, реализуемого в рабочей камере.

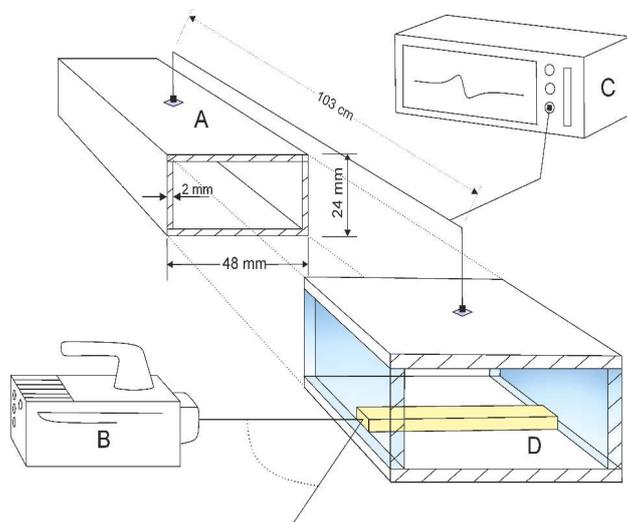


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки УТРО-3

Регистрация интегральных тепловых потоков обтекаемых поверхностей велась тепловизором (рис. 1 B) Telops Fast M200 (рабочий диапазон $1.5 \div 5.1$ мкм) сквозь прозрачные для инфракрасного излучения в данном диапазоне боковые стенки рабочей камеры – кварцевые окна. Снижение пространственного разрешения камеры в несколько раз позволяло проводить регистрацию на частоте до 2000 кадров/с; время интеграции составляло от 500 мкс до 1 мс. Тепловизор был установлен на расстоянии $25 \div 30$ см от области регистрации, при этом оптическая ось детектора была исходно направлена перпендикулярно главной оси ударной трубы; в ряде экспериментов тепловизор устанавливался под некоторым углом к оси трубы для регистрации с интересующих областей стенок канала. Измерение интегральных тепловых потоков проводилось с поверхностями препятствия и со стенок рабочей камеры, нагретых потоком за ударной волной – сверхзвуковым, а позже трансзвуковым. Программное обеспечение диагностической аппаратуры было настроено на конфигурацию отсутствия между объектом съемки и детектором какой-либо среды кроме атмосферы. В обратном случае, цепочку уравнений определения полного потока излучения детектирующим устройством необходимо дополнить членами потока промежуточной среды. Таким образом, наличие пропускающего кварцевого стекла на оптической оси съемки камеры не позволяет делать в данной задаче количественных оценок тепловых полей с заданной точностью.

3. Тепловые поля при газодинамическом нагреве стенок

Проведено экспериментальное исследование тепловых потоков от нагретых высокоскоростным потоком поверхностей канала ударной трубы. Сформированные на внутренних стенках канала тепловые потоки в пограничных слоях, теплопроводностно переносятся в достаточно тонкий слой кварцевых стенок, оставляя за собой тепловой след, который можно зарегистрировать с помощью инфракрасной камеры. Продолжительное взаимодействие потока и обтекаемых стенок, выражается распределением тепловых полей на нагретых стенках канала в соответствии с эволюцией параметров приповерхностного течения [14]. Протекаемый теплообмен существенно нестационарен и, в зависимости от теплофизической реализации, может протекать в обе стороны – от нагретого газа к неадиабатическим стенкам и наоборот. Результирующие визуализируемые распределения тепловых полей на кварцевых окнах получены для нестационарного газодинамического процесса дифракции ударной волны на прямоугольном препятствии и эволюции приповерхностного спутного потока. Показано, что визуализация тепловых полей сложного нестационарного газодинамического течения связана с неоднородным нагревом стенок канала в том числе – внутренней поверхности прозрачных боковых окон.

На рис. 2 представлены термографические изображения распределения тепловых полей, снятые анфас (рис. 2, а) и под углом $\alpha \approx 18^\circ$ (рис. 2, б) относительно нормали канала (течение слева направо). Наиболее длительный (до миллисекунд) и интенсивный нагрев стенок канала потоком в области визуализации связан с наличием застойной зоны отрыва перед препятствием, он сохраняется и после окончания протекания ударно-нагретой пробки в спутном потоке. Действие повышенных значений температуры в застойной зоне у наветренной стенки препятствия (область двойного ударного сжатия) на стенки канала в течение длительного времени приводит к образованию и интегральной регистрации нагретой области. Время нагрева определяется длительностью нагретой пробки газа в спутном потоке с соответствующей температурой. За препятствием формируются зоны с пониженной температурой и плотностью (темно-синий цвет на рис. 2) в области рециркуляции, а также в веере волн разрежения, визуализируемые на подветренной стороне вставки. На термограммах область зона разрежения представляется областью существенного снижения интенсивности излучения с минимумами в зоне за обратным уступом, где максимальна степень разрежения и, соответствующая ей, скорость потока.

Повышение числа Маха падающей волны приводит к увеличению приведенных значений регистрируемого теплового излучения, практически, на всей панорамной тепловой карте в зоне регистрации. Увеличение скорости падающей волны с увеличением характерного времени отхода волны торможения приводят к большей степени сжатия газа и соответствующей интенсификации теплообмена газовой среды с обтекаемыми поверхностями. В результате регистрируются более интенсивные и четкие интегральные за 500 мкс термограммы. Результаты визуализации тепловых полей сравнивались с результатами двумерного численного моделирования нестационарного газодинамического процесса после дифракции ударной волны.

Увеличение угла съемки приводит к горизонтальному пространственному разнесению изображений тепловых полей с их наложением (перекрытием) друг на друга от уже различных квазиустановившихся элементов течения. Получаемые распределения интенсивности излучения двух стенок канала сливаются в единую тепловую карту, с максимумом в области наибольшего наложения интенсивностей излучения от разнесенных поверхностей. Для выделения тепловых потоков от нагретого приповерхностным течением дальнего окна камеры (отдельно от ближнего окна) были проведены эксперименты по регистрации течения под большим углом наблюдения относительно нормали канала ($\alpha \approx 40^\circ \div 45^\circ$ в горизонтальной плоскости).

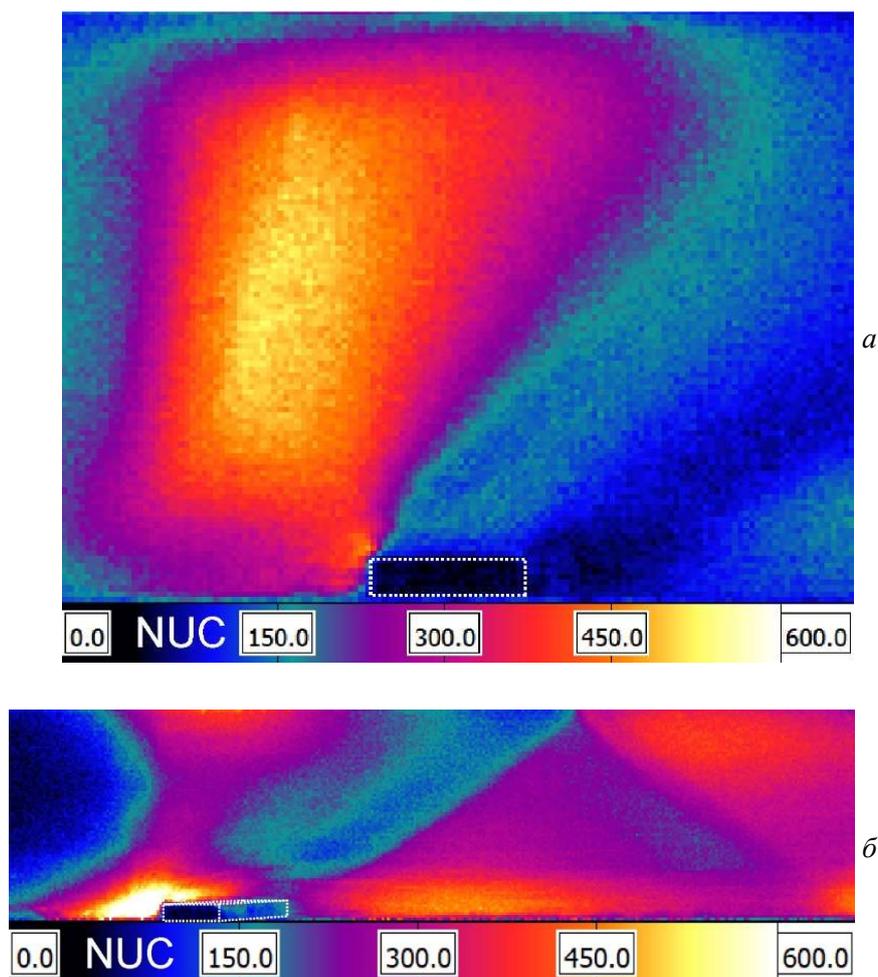


Рис. 2. Термографические изображения распределения тепловых полей: верхнее изображение (а) – съемка анфас, $M = 3.3$; нижнее изображение (б) – съемка под углом $\alpha \approx 18^\circ$, $M = 3.7$

Результирующее распределение интенсивности радиационного потока от нагретых внутренних стенок канала отражает эволюцию этапов течения в канале относительно их длительности и интенсивности. Соответственно, показано – термографическая инфракрасная съемка тепловых полей внутренних поверхностей прозрачных кварцевых стекол позволяет визуализировать элементы газодинамических структур нестационарного течения, примыкающих к окнам, в частности, после дифракции плоской ударной волны в канале на прямоугольном препятствии.

4. Тепловые поля при плазменном нагреве стенок

Проведено исследование тепловых полей, возникающих в канале рабочей секции при иницировании плазмы поверхностного разряда в потоке за ударной волной. В рабочей секции заподлицо на нижней стенке установлены медные электроды, между которыми иницируется поверхностный разряд, скользящий по поверхности диэлектрика (плазменный лист). Поверхностный разряд представляет собой набор параллельных плазменных каналов, достаточно равномерно распределенных по поверхности диэлектрической стенки. Площадь каждого плазменного листа, иницируемого в невозмущенном воздухе в плоском канале, составляет 100×30 мм. Характерный вид осциллограммы тока импульсного поверхностного разряда представлен на рис. 3. Ток разряда зависит от начальной плотности газа, в котором иницируется разряд, и составляет порядка $800 \div 1200$ А. Характерные времена протекания тока

разряда составляют порядка $300 \div 500$ нс [15]. Плазменный лист позволяет создавать область локального приповерхностного импульсного энерговклада субмиллиметровой толщины как в покое газе, так и в ламинарном, и в турбулентном пограничном слое [16].

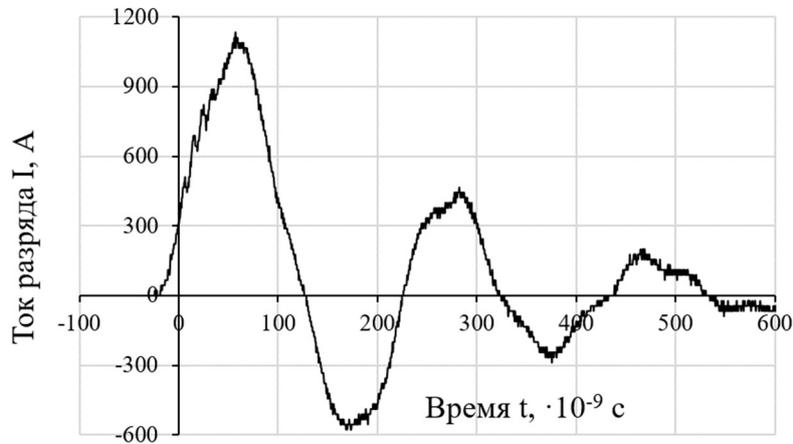


Рис. 3. Характерный вид осциллограммы тока импульсного поверхностного разряда, инициированного в воздухе при начальном давлении $P = 21$ Торр

Разряд поджигался в определенные моменты времени при движении по каналу ударной волны, после ее дифракции на препятствии (теневая съемка, рис. 4, *a*). В соответствии с изменением поля течения при обтекании потоком диэлектрического препятствия происходит пространственное перераспределение плазмы разряда [17]. При инициировании поверхностного разряда в потоке плазма разряда самолокализуется в зону пониженной плотности, образующуюся за уступом рис. 4, *б*, где контактирует с нижней стенкой канала. Поверхностный разряд, инициируемый в данном режиме течения, представляет собой короткоживущее плазменное образование длиной около 30 мм – поперечный сильноточный плазменный канал, параллельный боковой стенке препятствия, локализованный в зоне пониженной плотности.

Основными источниками нагрева нижней стенки канала при инициировании поверхностного разряда в сверхзвуковом потоке являются как газодинамический нагрев, описанный в предыдущем разделе, так и импульсный нагрев плазмой. Полученные экспериментальные кадры инфракрасной съемки (рис. 4, *в*, *г*) показывают две тепловые зоны, отражающие 1) взаимодействие набегающей и отраженной ударных волн в наветренной области с нижней стенкой и 2) взаимодействия плазмы разряда и инициируемых им возмущений с нижней стенкой в подветренной области – за препятствием, в результате которого происходит кратковременный нагрев участка прилегающей к области плазмы стенки канала. Соответствующие интегральные кадры свечения в видимом диапазоне отражают только свечение плазмы разряда, они приведены на рис. 4, *д*, *е*.

Для анализа теплового эффекта плазмы поверхностного разряда в потоке за ударной волной проводилась термографическая регистрация теплового излучения нижней стенки канала. На рис. 5 представлено термографическое изображение, зарегистрированное тепловизором за время экспозиции (250 мкс) через 200 мкс после разряда, инициированного через 850 мкс после прохода ударной волны подветренной стенки препятствия. Интенсивное тепловое излучение наблюдается от участка нижней стенки, расположенного в подветренной зоне – месте локализации плазмы. Однако длительность теплового излучения от плазменного нагрева не превышает 1 мс, затем тепло рассеивается, поскольку импульсно нагретая область быстро сносится высокоскоростным потоком вниз по течению.

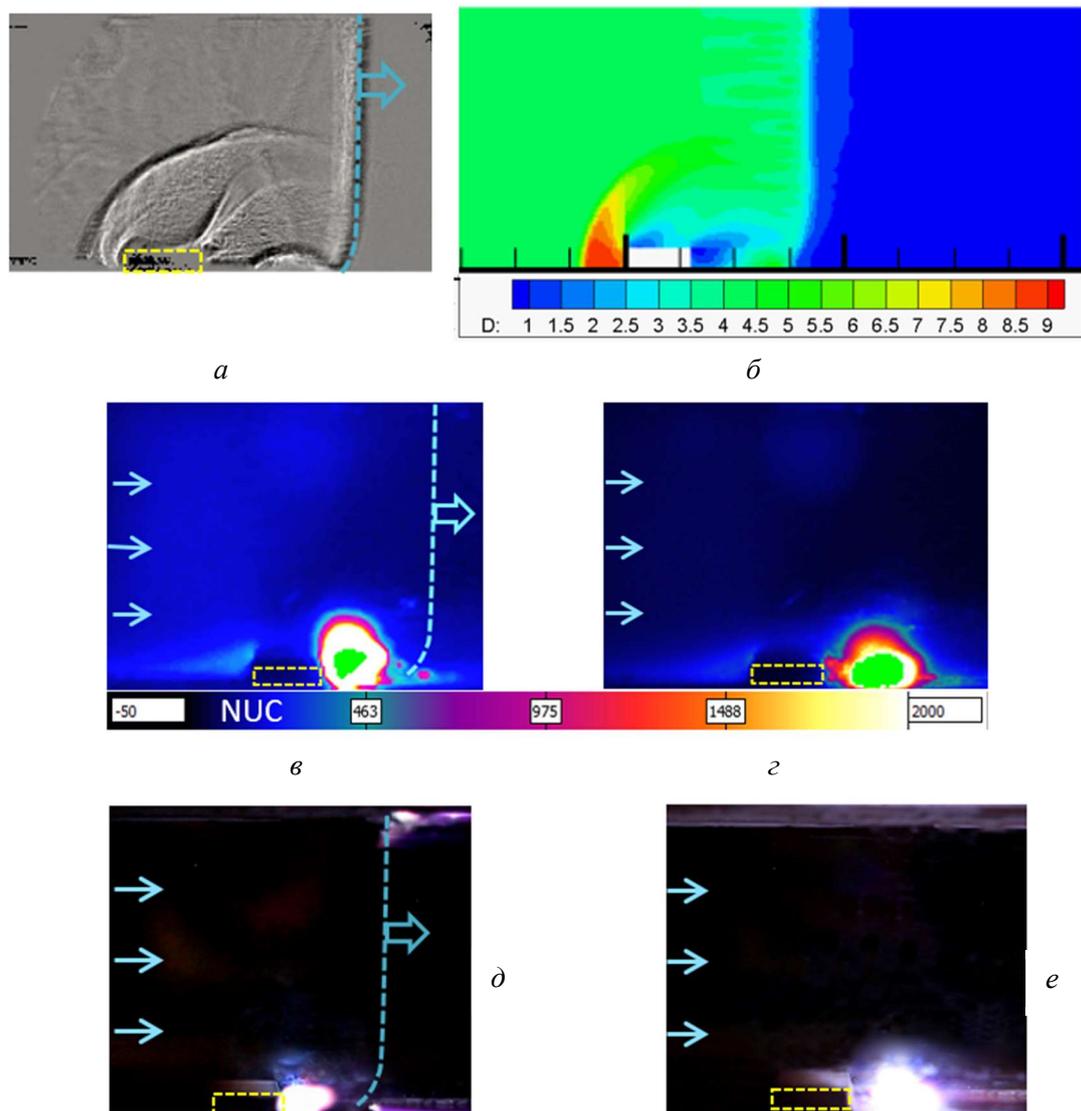


Рис. 4. *a* – кадр теневой съемки обтекания препятствия сверхзвуковым потоком за плоской ударной волной ($M=3$); *б* – численное моделирование поля плотности газодинамического потока; *в*, *г* – термографические изображения при инициировании поверхностного разряда в потоке через 0.006 и 0.34 мс после прохождения ударной волны наветренной стенки препятствия; *д*, *е* – соответствующие интегральные снимки свечения плазмы

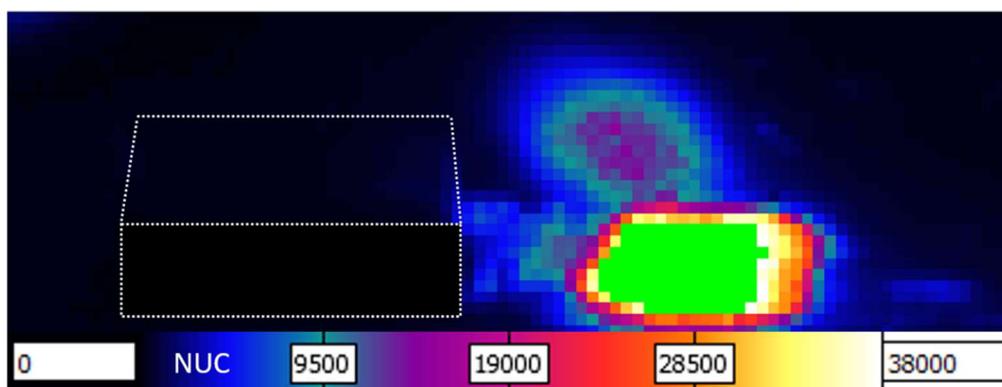


Рис. 5. Термографическое изображение теплового излучения от нижней стенки при инициировании поверхностного разряда в потоке за ударной волной с $M=2.9$

5. Заключение

Проведено исследование эволюции тепловых полей в пограничном слое на обтекаемой поверхности стенки газодинамического канала, нагретой ударной волной и плазмой импульсного поверхностного разряда. На стенке канала была установлена диэлектрическая вставка в форме параллелепипеда размером $48 \times 6 \times 2$ мм. Вставка располагалась между окнами рабочей камеры. Зарегистрированы процессы нагрева и остывания стенки канала перед вставкой и за ней после взаимодействия плоской УВ с числом Маха $M = 2.8 \div 3.3$ с прямоугольным уступом. Сравнивались характеристики тепловых полей: в зонах нагрева и остывания наветренной области за отраженной от вставки ударной волной и в зоне отрыва за вставкой в подветренной области – в зоне самолокализации импульсного скользящего разряда. Показано, что в ударно-нагретой наветренной области нижней стенки канала (в зоне отхода отраженной УВ и торможения потока перед вставкой) увеличение интенсивности излучения тепловых полей происходит в течение сотен микросекунд. Затем за $3 \div 4$ миллисекунд происходит спад интенсивности излучения. Максимальная регистрируемая тепловизором протяженность зоны газодинамического нагрева нижней стенки перед вставкой оценивается как $5 \div 6$ мм. Показано, что остывание области подветренного участка стенки канала за вставкой, нагретой локализованным в зону отрыва наносекундным разрядом, происходит за время менее 1 мс.

Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена в рамках Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ «Фотонные и квантовые технологии: цифровая медицина». Проект № 001986 «Плазменные технологии в междисциплинарных приложениях: плазменная аэродинамика и микроэлектроника».

Литература

1. Ju Y., Sun W. Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry // Progress in Energy and Combustion Science. 2015. Vol. 48. Pp. 21–83.
2. Bulat M., Denisenko B., et al. Plasma-assisted ignition and combustion of lean and rich air/fuel mixtures in low and high-speed flows // Acta Astronautica. 2020. Vol. 176. Pp. 700–709.
3. Солодовников С.И., Рулева Л.Б. Экспериментальные исследования газоразрядной плазмы в потоке // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2023. Т. 24. В. 6.
4. Знаменская И.А., Иванов И.Э., Коротеева Е.Ю., Орлов Д.М., Крюков И.А. Взаимодействие ударной волны с пристеночным слоем остывающей плазмы импульсного поверхностного разряда // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Т. 13. В. 3.
5. Shang J., Surzhikov S. Nonequilibrium radiative hypersonic flow simulation // Progress in Aerospace Sciences. 2012. Vol. 53. Pp. 46–65.
6. Brandis A., Johnson C., Cruden B. Non-equilibrium Radiation for Earth Entry // American Institute of Aeronautics and Astronautics. AIAA Paper 2016-3690. 2016.
7. Суржиков С.Т., Шувалов М.П. Тестирование расчетных данных по радиационному и конвективному нагреву спускаемых космических аппаратов нового поколения (Обзор) // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51. № 3. С. 456–470.
8. Znamenskaya I., Lutsky A., Tatarenkova D., Karnozova E., Sysoev N. Nanosecond volume discharge in the non-stationary high-speed profiled channel flow // Physics of Fluids. 2023. Vol. 35. № 7.
9. Zuccher S., Saric W. Infrared thermography investigations in transitional supersonic boundary layers // Experiments in Fluids. 2008. Vol. 44. Pp. 145–157.
10. Frederick M., Banks D., et al. Flight tests of a supersonic natural laminar flow airfoil // Measurement Science and Technology. 2015. Vol. 26.

11. Горяинов В.Ю., Викторов М.Е., Водопьянов А.В., Воронин А.В. Особенности формирования разряда в ускорителе плазмы и структура струи, истекающей в вакуум // Журнал Технической Физики. 2021. Т. 91. № 2. С. 335–341.
12. Рубцов Н.М., Черныш В.И., Цветков Г.И., Трошин К.Я., Калинин А.П. Особенности воспламенения водорода над металлами платиновой группы при низком давлении. Часть 1 // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2018. Т. 19, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-1/articles/730/>
13. Tirumala R., Benard N. et al. Temperature characterization of dielectric barrier discharge actuators: influence of electrical and geometric parameters // Journal of Physics D: Applied Physics. 2014. Vol. 47.
14. Znamenskaya I., Muratov M. et al. Heat fluxes visualization in high-speed flow behind the shock wave // Scientific Visualization. 2023. Vol. 15. № 3. Pp. 92–100.
15. Знаменская И.А., Коротеева Е.Ю., Карнозова Е.А., Кули-Заде Т.А. Динамика тепловых потоков нагретой импульсным сильноточным разрядом области канала // Теплофизика высоких температур. 2023. Т. 61. № 1. С. 18–23.
16. Mursenkova I., Znamenskaya I., Lutsky A.E. Influence of Shock Waves from Plasma Actuators on Transonic and Supersonic Airflow // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. Vol. 51.
17. Znamenskaya I., Tatarenkova D. et al. Nanosecond volume discharge in the non-stationary high-speed profiled channel flow // Physics of Fluids. 2023. Vol. 35.

References

1. Ju Y., Sun W., Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2015, vol. 48, pp. 21–83, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.12.002>
2. Bulat M., Denisenko B., et al., Plasma-assisted ignition and combustion of lean and rich air/fuel mixtures in low and high-speed flows, *Acta Astronautica*, 2020, vol. 176, pp. 700–709. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.04.028
3. Solodovnikov S., Ruleva L. Experimental studies of gas-discharge plasma in a stream // Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics. 2023. V.24. iss. 6.
4. Znamenskaya I., Ivanov I., Koroteeva E., Orlov D., Kryukov I. Shock wave interaction with a near-wall layer of cooling plasma from a pulsed surface discharge // Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics. 2012. V.13. iss. 3.
5. Shang J. S., Surzhikov S. T., Nonequilibrium radiative hypersonic flow simulation, *Progress in Aerospace Sciences*, 2012, vol. 53, pp. 46–65. DOI: 10.1016/j.paerosci.2012.02.003
6. Brandis A., Johnson C., Cruden B., Non-equilibrium Radiation for Earth Entry, AIAA Paper 2016-3690. <https://doi.org/10.2514/6.2016-3690>
7. Surzhikov S. T., Shuvalov M. P., Checking computation data on radiative and convective heating of next generation spacecraft, *High Temperature*, 2013, vol. 51, issue 3, pp. 408–420. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X13030061>
8. Znamenskaya I., Lutsky A., Tatarenkova D., Karnozova E., Sysoev N., Nanosecond volume discharge in the non-stationary high-speed profiled channel flow, *Physics of Fluids*, 2023, vol. 35, issue 7. DOI: 10.1063/5.0153624
9. Zuccher S., Saric W., Infrared thermography investigations in transitional supersonic boundary layers, *Experiments in Fluids*, 2008, vol. 44, issue 1 pp. 145–157. DOI: 10.1007/s00348-007-0384-1
10. Frederick M., Banks D., et al., Flight tests of a supersonic natural laminar flow airfoil, *Measurement Science and Technology*, 2015, vol. 26. DOI: 10.1088/0957-0233/26/6/064003
11. Goryainov V. Yu., Viktorov M. E., Vodopyanov A. V., Voronin A. V., Peculiarities of the Discharge Formation in a Plasma Accelerator and Structure of a Jet Flowing into Vacuum, *Technical Physics*, 2021, vol. 66, pp. 325–332. DOI: 10.1134/S1063784221020134

12. Rubtsov N. M., Chernysh V. I., Tsvetkov G. I., Troshin K. Ya., Kalinin A. P., The features of hydrogen ignition over platinum-group metals at low pressure. Part. I, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2018, vol. 19, issue 1 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-1/articles/730/>
13. Tirumala R., Benard N., et al., Temperature characterization of dielectric barrier discharge actuators: influence of electrical and geometric parameters, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, vol. 47. DOI: 10.1088/0022-3727/47/25/255203
14. Znamenskaya I., Muratov M., et al., Heat fluxes visualization in high-speed flow behind the shock wave, *Scientific Visualization*, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 92–100. DOI: 10.26583/sv.15.3.10
15. Znamenskaya I. A., Koroteeva E. Yu., Karnozova E. A., Kuli-Zade T. A., Dynamics of Heat Fluxes in a Channel Area Heated by a Pulsed High-Current Discharge, *High Temperature*, 2023, vol. 61, pp. 14–18 [in Russian]. <https://doi.org/10.31857/S0040364423010052>
16. Mursenkova I., Znamenskaya I. A., Lutsky A.E., Influence of Shock Waves from Plasma Actuators on Transonic and Supersonic Airflow, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, vol. 51. DOI: 10.1088/1361-6463/aaa838
17. Znamenskaya I. A., Tatarenkova D., et al., Nanosecond volume discharge in the non-stationary high-speed profiled channel flow, *Physics of Fluids*, 2023, vol. 35. DOI: 10.1063/5.0153624

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2024 г.